

Belasting door springende mensen op tribunes

Voorstel normbepalingen nieuwbouwontwerp
op basis van literatuuronderzoek

TNO 2025 R11354/A – 16 december 2025

Belasting door springende mensen op tribunes

Voorstel normbepalingen nieuwbouwontwerp
op basis van literatuuronderzoek

Auteurs	A.J. Bronkhorst H.J.J. Weijs R.D.J.M. Steenbergen A. Karapanou I.S. Ritfeld
Rubricering rapport	TNO Publiek
Titel	TNO Publiek
Rapporttekst	TNO Publiek
Aantal pagina's	111 (excl. voor- en achterblad)
Aantal bijlagen	5
Opdrachtgever	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
Programmanaam	
Programmanummer	
Projectnaam	BZK Tribunebelasting
Projectnummer	060.53681

Alle rechten voorbehouden

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

© 2025 TNO

Inhoudsopgave

Contents

1	Inleiding	5
2	Huidige normbepalingen	7
2.1	Inleiding	7
2.2	Gebruiksklassen	7
2.3	Gebruiksbelastingen	8
2.4	Dynamische effecten	9
3	Gebruiksklassen tribunes	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Groepsdichtheid op tribunes	11
3.2.1	Staantribunes	12
3.2.2	Safe-standing tribunes	15
3.2.3	Zittribunes	20
3.2.4	Samenvatting	23
3.3	Gecoördineerd springende mensenmassa's	25
3.4	Voorstel nieuwe gebruiksklassen	26
4	Karakteristieke waarde gebruiksbelastingen op tribunes	28
4.1	Inleiding	28
4.2	Crowd loading chain	28
4.3	Statische belasting <i>qstat</i>	30
4.3.1	Aantal personen <i>n</i>	30
4.3.2	Massa <i>m</i>	31
4.4	Dynamische amplificatiefactor <i>DAF</i>	32
4.4.1	Niet springen	33
4.4.2	Springen	33
4.5	Afleiding karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen	40
4.5.1	Overzicht belastingparameters	40
4.5.2	Karakteristieke waarde voor de gebruiksbelastingen	42
4.6	Toepassing gebruiksbelastingen	43
4.6.1	Huidige methode	43
4.6.2	Nieuwe methode	44
5	Dynamische effecten	50
5.1	Inleiding	50
5.2	Gelijkwaardige statische belastingen	50
5.3	Dynamische barkentine	52
5.3.1	Dynamische belastingmodellen	52
5.3.2	Berekening belastingeffect	53
5.4	Voorstel dynamische effecten	54
6	Voorstel NEN-EN 1991-1-1	56
7	Conclusies en aanbevelingen	59

8	Referenties	61
9	Ondertekening.....	67

Bijlagen

- Bijlage A Normbepalingen tribunes en sprongbelastingen
- Bijlage B Typen en gebruiksvormen Nederlandse tribunes
- Bijlage C Metingen aan Nederlandse stadiontribunes
- Bijlage D Tribunebezoek
- Bijlage E Springdynamica

1 Inleiding

De gebruiksbelastingen voor tribunes worden gegeven in NEN-EN 1991-1-1 (2019). De in Nederland van toepassing zijnde waarden, zijn afgeleid uit TNO rapport B-89-227 (TNO, 1989). Deze belastingen zijn eerst in NEN 6702 (1991) en, via opvolgende uitgaven van de NEN 6702 en NEN-EN 1991-1-1, uiteindelijk geïmplementeerd in de huidige Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 (2019). Sinds 1989 zijn er geen aanpassingen doorgevoerd in de waarden voor deze gebruiksbelastingen in Nederland.

In 2021 stortte een tribunedeel van Stadion de Goffert te Nijmegen in tijdens het juichen en springen van de Vitesse aanhang die op deze tribune stond. In het onderzoek naar de oorzaak van de instorting (RHDHV, 2022a) werd het belastingeffect van de springende mensenmassa op het ingestorte tribunedeel ingeschat op ongeveer 9 kN/m^2 , terwijl de ontwerpbelasting van het tribune element 4 kN/m^2 was. Op basis van dit verschil constateerde RHDHV (2022a) dat de belasting van een springende menigte in de praktijk hoger kan zijn dan de gebruiksbelastingen voorgeschreven in de van toepassing zijnde normen. RHDHV (2022a) benoemt verschillende oorzaken voor het optreden van het grote belastingeffect: (1) de grote dichtheid van de mensenmassa op het tribune element, (2) het gecoördineerd springen van de mensenmassa, en (3) een vergroting van de dynamische belastingeffecten door een afname in de stijfheid van het element ten gevolge van scheurvorming. De verhoging van de statische belasting door het gecoördineerd springen van de mensenmassa is geïdentificeerd als de belangrijkste oorzaak.

Uit onderzoek door ABT en Royal HaskoningDHV naar de tribunebelasting in een aantal Nederlandse stadions (RHDHV, 2022b), blijkt dat springende mensenmassa's regelmatig voorkomen op verschillende type tribunes (staan, safe-standing en zitten) en dat de daarbij optredende belastingen significant hoger kunnen zijn dan de gebruiksbelastingen gegeven in de norm.

Naar aanleiding van deze bevindingen heeft het Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimtelijke Ordening (VRO) aan TNO gevraagd om een literatuuronderzoek uit te voeren naar belastingen door springende mensenmassa's op tribunes. Het doel van dit onderzoek is om tot een voorstel te komen voor een herziening van de bepalingen in NEN-EN 1991-1-1 (2019) voor de te hanteren ontwerpbelasting voor de nieuwbouw van tribunes.

Het toepassingsgebied van het voorstel betreft alle typen en gebruiksvormen van tribunes die in Nederland voorkomen. De resultaten hebben betrekking op nieuwbouw; de afgeleide belastingswaarden in dit rapport zijn niet bedoeld voor beoordeling van bestaande bouw. Het onderzoek richt zich met name op de belastingen ten gevolge van springende mensenmassa's op tribunes, waarbij expliciet een hoge mensendichtheid wordt beschouwd. Dit betreft hoofdzakelijk stadions of andere sportfaciliteiten, maar kan ook bij andere tribunes het geval zijn (zoals bij tribunes gebruikt tijdens muziekevenementen). Met betrekking tot de constructiedynamica, wordt specifiek gekeken naar die constructie-elementen die het meest gevoelig zijn voor de dynamische effecten ten gevolge van de springende mensenmassa, en waar de kans op een hoge mensendichtheid en het effect van de dynamische vergroting van de belasting door de stijfheidsafname het grootst is.

In hoofdstuk 2 wordt eerst een analyse gemaakt van de huidige ontwerpbepalingen voor tribunes in NEN-EN 1991-1-1 (2019). Op basis van deze analyse worden de aspecten met betrekking tot gebruiksklassen, gebruiksbelastingen en dynamische effecten benoemd die nader onderzocht zijn ten behoeve van het voorstel voor een herziening van de bepalingen in NEN-EN 1991-1-1. Hoofdstuk 3 beschrijft de analyse en resultaten voor het vaststellen van de gebruiksklassen, hoofdstuk 4 het onderzoek en resultaten van de gebruiksbelastingen op basis van de nu beschikbare kennis en hoofdstuk 5 de bevindingen met betrekking tot dynamische effecten. Hoofdstuk 6 geeft het voorstel voor herziening van NEN-EN 1991-1-1. Hoofdstuk 7 bespreekt de conclusies en aanbevelingen om tot aangescherpte waarden voor de gebruiksbelastingen te komen en om het toepassingsgebied uit te breiden naar het beoordelen van bestaande bouw conform de NEN 8700 serie.

2 Huidige normbepalingen

2.1 Inleiding

De karakteristieke waarden voor de belastingen op tribunes worden gegeven in NEN-EN 1991-1-1 (2019). Dit normblad maakt voor de belastingen onderscheid in gebruiksklassen. Voor elk van die klassen zijn belastingen gegeven. Naast de gebruiksbelastingen geeft NEN-EN 1991-1-1 bepalingen die toelichten wanneer deze gebruiksbelastingen gebruikt kunnen worden en de voorwaarden waarbij aanvullende dynamische berekeningen benodigd zijn.

Dit hoofdstuk beschrijft de belangrijkste observaties van een analyse van de normbepalingen van toepassing voor tribunes (zie Bijlage A voor een uitgebreide analyse) en definieert welke onderdelen aanpassing behoeven en op welke manier de invulling van deze aanpassingen kan worden vastgesteld. Paragraaf 2.2 gaat in op de gebruiksklassen, paragraaf 2.3 bespreekt de gebruiksbelastingen en paragraaf 2.4 gaat in op de bepalingen met betrekking tot dynamische effecten.

2.2 Gebruiksklassen

Tribunes behoren tot gebruiksklasse C in NEN-EN 1991-1-1 (2019), waarvoor het volgende specifieke gebruik wordt benoemd:

‘Ruimten waar mensen kunnen samenkomen (met uitzondering van de onder klasse A, B en D genoemde ruimten).’

In de Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 (2019) wordt deze gebruiksklasse omschreven als bijeenkomstruimten. Binnen gebruiksklasse C kunnen twee subklassen van toepassing zijn voor tribunes:

- C2: Ruimten met vaste zitplaatsen, bijv. ruimten in kerken, theaters of bioscopen, conferentiezalen, collegezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtkamers/ -lokalen in stations.
- C5: Ruimten waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden, bijv. in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen met inbegrip van tribunes, bordessen en toegangsruimten, stationsperrons.

De aspecten waarop onderscheid gemaakt wordt tussen deze twee subklassen zijn:

- De aanwezigheid van vaste zitplaatsen
- De potentiële aanwezigheid van grote mensenmassa's

TNO rapport B-89-227 (1989) geeft toelichting over de achterliggende overwegingen voor deze onderscheidende aspecten:

‘De vloerbelasting in zalen en tribunes wordt voornamelijk bepaald door het gewicht van de aanwezige personen. De dichtheid die de groep kan aannemen speelt daarbij een belangrijke rol. In bioskoopzalen met vaste zitplaatsen kunnen minder mensen per vierkante meter dan op tribunes met staanplaatsen. Ook de activiteit (dansen, springen enz.) beïnvloedt de hoogte van de belasting. Er wordt daarom onderscheid gemaakt tussen ruimten met en zonder vaste zitplaatsen.’

Uit deze toelichting wordt geconcludeerd dat:

- het aspect “grote mensenmassa’s” bedoeld is als indicator voor de dichtheid van de groep mensen op een constructie(deel),
- het aspect “vaste zitplaatsen” bedoeld is als praktisch hanteerbare indicator voor een beperking in de dichtheid van de groep mensen,
- het type activiteit wel wordt benoemd als invloed op de hoogte van de belasting, maar er wordt geen duidelijke relatie gelegd met de functie van de ruimte (in een bioscoop wordt normaal gesproken niet gesprongen door grote mensenmassa’s).

Op basis van dit rapport beveelt TNO aan om de aspecten “groepsdichtheid” en “type activiteit” als uitgangspunt te nemen om tot een meer expliciete en concrete onderbouwing voor tribune gebruiksklassen te komen. Daarnaast moeten functionele omschrijvingen worden gedefinieerd voor deze gebruiksklassen. Deze omschrijvingen moeten hanteerbaar zijn voor de ontwerp praktijk en zo goed mogelijk gekoppeld worden aan de keuzes voor de aspecten “groepsdichtheid” en “type activiteit” die zijn gemaakt voor de definitie van de gebruiksklassen.

Hoofdstuk 3 geeft een analyse van deze aspecten, en doet op basis hiervan een voorstel voor gebruiksklassen voor tribunes met functionele omschrijvingen.

2.3 Gebruiksbelastingen

NEN-EN 1991-1-1 (2019) geeft gebruiksbelastingen $q_k = 4,0 \text{ kN/m}^2$ voor gebruiksklasse C2 en $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$ voor gebruiksklasse C5. Deze karakteristieke waarden voor de gebruiksbelasting zijn gebaseerd op achtergrondrapport B-89-227 (1989) bij NEN 6702 (1991).

In rapport B-89-227 (1989) wordt opgemerkt dat de gebruiksbelasting slechts in beperkte mate wordt beïnvloed door het soort activiteit. Er wordt daarom onderscheid gemaakt in drie typen ruimten:

‘Een stilstaande menigte blijkt de grootste vloerbelasting te veroorzaken. Het dynamisch effect is klein, maar de dichtheid is groot. Dit betekent dat er een soort vereffeningseffect plaats heeft. De maximale belasting die gehanteerd moet worden voor het ontwerp, wordt slechts in beperkte mate beïnvloed door het soort activiteit.

Besloten is daarom het volgende onderscheid te maken:

- ruimten waar sterke concentraties van personen mogen worden verwacht $p_e = 5 \text{ kN/m}^2$
- ruimten met vaste of verwijderbare zitplaatsen $p_e = 5 \text{ kN/m}^2$
waar dynamische belastingen kunnen optreden
- ruimten met vast aan de vloer verbonden stoelen $p_e = 4 \text{ kN/m}^2$

De redenering dat er een vereffeningseffect optreedt met toenemende groepsdichtheid is gebaseerd op bevindingen van Sentler (1976) en Paloheimo en Ollila (1973). Sentler (1976) constateert een afname in de dynamische vergroting van een bepaalde activiteit met een toename van de groeps grootte van 1 tot 4 personen. Sentler (1976) benoemt hierbij echter ook expliciet dat deze afname niet is gevonden voor springen op de plaats. In een onderzoek naar maximaal waargenomen vloerbelastingen bij verschillende activiteiten vonden Paloheimo en Ollila (1973) de grootste belasting voor een stilstaande menigte (zie bijlage A.4).

Hoewel latere onderzoeken (Ellis en Ji, 2004; Li et al., 2018) ook een afname in dynamische vergroting constateren bij een toename van de groeps grootte¹, is deze afname niet

¹ Er is geen literatuur gevonden die expliciet de relatie tussen groepsdichtheid en dynamische vergroting ten gevolge van springen heeft onderzocht.

dundanig groot dat gesteld kan worden dat een stilstaande menigte de grootste belasting veroorzaakt. De onderzoeken door ABT, AbtWassenaar en Royal HaskoningDHV naar de tribunebelasting in een aantal Nederlandse stadions (RHDHV, 2022b) laten zien dat springende mensenmassa's in hogere belastingen kunnen resulteren dan 5 kN/m^2 .

De toelichting en omschrijvingen die rapport B-89-227 (1989) geeft bij de voorgestelde maximale belastingen, geven een kwalitatief inzicht in de factoren (concentratie van personen en dynamische vergroting) die een rol spelen in de opbouw van de voorgestelde belastingen. Rapport B-89-227 (1989) maakt echter niet expliciet hoe de voorgestelde belastingen zijn opgebouwd, dus welk aandeel wordt bepaald door de statische belasting van de concentratie van personen en welk aandeel door de dynamische vergroting.

Om tot een goed herleidbare vaststelling van de gebruiksbelastingen voor tribunes te komen, wordt deze afgeleid op basis van de onderdelen die de belasting bepalen. Deze onderdelen betreffen (1) de statische belasting ten gevolge van de groep mensen op de tribune en (2) de dynamische vergroting op de statische belasting ten gevolge van de activiteiten door de groep mensen op de tribune.

Naast de afleiding van de gebruiksbelastingen wordt ook onderscheid gemaakt tussen de verschillen in het gebruik van de belastingen bij de toetsing van een tribune-element en de toetsing van de onderliggende draagconstructie of de fundering.

In hoofdstuk 4 wordt de analyse beschreven waarmee de gebruiksbelastingen zijn bepaald en wordt een voorstel gedaan voor de gebruiksbelastingen voor tribunes. Daarnaast wordt een voorstel gedaan voor het gebruik van de belastingen bij de toetsing van de verschillende onderdelen van een tribune.

2.4 Dynamische effecten

NEN-EN 1991-1-1 artikel 2.2 geeft de volgende bepaling met betrekking tot dynamische effecten van een constructie ten gevolge van springende mensen:

'Indien resonantie-effecten kunnen worden verwacht, als gevolg van synchroon ritmische beweging van mensen of door dansen of springen, behoort het belastingsmodel te zijn vastgesteld voor een gespecialiseerde dynamische berekening (volledig dynamische berekening).'

De Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 geeft aanvullende voorwaarden bij artikel 2.2 wanneer een volledig dynamische berekening niet vereist is in de uiterste grenstoestand. Dit is het geval voor:

*'relatief kleine constructiedelen met weinig demping en belast door ten hoogste 10 personen, waarvoor de eigenfrequentie niet kleiner is dan 8 Hz en bovendien is gerekend met een naar boven gerichte belasting van 50% van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting.'*²

De Nationale Bijlage specificeert ook in voetnoot (d) onder Tabel NB.1 de volgende aanvulling met betrekking tot de toepassing van de gebruiksbelasting voor tribunes:

'Bij tribunes moet bovendien rekening zijn gehouden met een gelijkmatig verdeelde opwaartse gebruiksbelasting gelijk aan 50% van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting.'

² TNO is van mening dat deze zin niet duidelijk geformuleerd is. Dit blijkt uit meerdere discussies die hierover gevoerd zijn tussen TNO en gebruikers van de voorschriften. Het komt door de komma (',') in de zin. Het deel dat na de komma volgt is een eigenschap van het voorgaande zinsdeel, en dus niet een voorwaarde zelf. Wij bevelen daarom aan om deze tekst te herformuleren, zodat de ambiguïteit in de interpretatie verdwijnt.

Deze belasting brengt het dynamisch effect in rekening dat kan optreden als gevolg van de bewegende massa van mensen (opspringen). De neerwaartse en opwaartse gebruiksbelastingen moeten afzonderlijk als extreme veranderlijke belasting worden beschouwd. Tevens moet bij de neerwaartse gebruiksbelasting op tribunes gelijktijdig rekening zijn gehouden met een veranderlijke gelijkmatig verdeelde horizontale belasting die kan optreden als gevolg van de bewegende mensenmassa. Deze horizontale belasting bedraagt 10% van de verticale belasting en moet wat betreft de richting zijn beschouwd als een vrije belasting.

Door het in rekening brengen van de opwaartse en gelijkmatige verdeelde horizontale belasting als statische belasting wordt voorkomen dat voor tribunes dynamische berekeningen moeten worden gemaakt om het effect van een bewegende mensenmassa te bepalen op de sterkte van de tribune.'

De laatste alinea van voetnoot (d) onder Tabel NB.1 wekt naar ons oordeel de suggestie dat tribunes categorisch vrijgesteld zijn van een volledig dynamische berekening.

Volgens TNO kan de huidige norm op twee manieren gelezen worden. Oftewel een dynamische berekening is nodig, of deze bepaling dient gelezen te worden in samenhang met de andere bepalingen in NEN-EN 1991-1-1 (2019). Als deze bepalingen in samenhang worden gelezen betekent dit dat voor tribunes met een eigenfrequentie $f_e > 8$ Hz die worden belast door ten hoogste 10 personen geen volledig dynamische berekening vereist is, mits de aanvullende berekeningen worden uitgevoerd die worden beschreven in voetnoot (d) onder Tabel NB.1 in NEN-EN 1991-1-1/NB (2019). In veel gevallen is de uitzondering op de dynamische berekening echter niet van toepassing, omdat meestal niet kan worden uitgesloten dat zich meer dan 10 personen bevinden op de constructiedelen van een tribune. Deze voorwaarde is echter nogal bewerkelijk voor (delen van) tribunes met een eigenfrequentie groter dan 8 Hz, waarbij dynamische effecten maar van beperkte invloed zijn (zie ook Bijlage E). Vanuit praktisch oogpunt is het wenselijk om gebruiksbelastingen te specificeren die breder toepasbaar zijn dan de huidige beperkingen die worden opgelegd door artikel 2.2 in NEN-EN 1991-1-1/NB (2019).

Aanbevolen wordt om bepalingen te definiëren die duidelijk specificeren wanneer een dynamische berekening wel en wanneer deze niet nodig is; de bepalingen met betrekking tot dynamische effecten in NEN-EN 1991-1-1/NB (2019) moeten zodanig worden aangepast dat er geen onduidelijkheid bestaat over het uitvoeren van een dynamische berekening. Daarbij dient de toegevoegde waarde van de voorwaarden in de NEN-EN 1991-1-1/NB artikel 2.2 aan de grootte van de constructie en de demping te worden beoordeeld. Indien deze voorwaarden benodigd zijn, dan behoren deze expliciet te worden gemaakt; het is nu niet duidelijk wat wordt verstaan onder relatief kleine constructiedelen en weinig demping en daarmee wordt het overgelaten aan het inzicht van de gebruiker van het voorschrift.

Hoofdstuk 5 beschrijft de analyse van de hiervoor beschreven aspecten die van belang zijn voor dynamische effecten ten gevolge van springende mensenmassa's op tribunes. Op basis van deze analyse wordt een voorstel gedaan voor de bepalingen over dynamische effecten in NEN-EN 1991-1-1/NB.

3 Gebruiksklassen tribunes

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk doet een voorstel voor nieuwe gebruiksklassen die van toepassing zijn op tribunes. Uit hoofdstuk 2 is gebleken dat de groepsdichtheid en het kunnen optreden van gecoördineerd springen door de toeschouwers belangrijke aspecten zijn. Paragraaf 3.2 geeft voor verschillende type tribunes een overzicht van groepsdichtheden en type activiteiten gevonden in literatuur. Daarnaast wordt op basis van plattegronden van de verschillende tribunes inzicht gegeven in het effect van een bepaalde dichtheid en de factoren die hier een rol in spelen. Paragraaf 3.3 geeft een toelichting van de aspecten die een rol spelen bij gecoördineerd springen door mensenmassa's op tribunes, op basis waarvan voorwaarden worden gedefinieerd wanneer hier rekening mee gehouden dient te worden. Paragraaf 3.4 geeft het voorstel voor de nieuwe gebruiksklassen.

3.2 Groepsdichtheid op tribunes

De groepsdichtheid op een tribune(deel) is in dit rapport gedefinieerd als de hoeveelheid mensen op het tribune(deel) gedeeld door het opwaarts geprojecteerde oppervlak van het tribune(deel). Voor een hele tribune wordt deze dichtheid bepaald door de hoeveelheid mensen die op de tribune mag zijn; in principe worden er nooit meer personen toegelaten dan het aantal beschikbare plaatsen (Veenbrink, 2025). Het kan echter wel voorkomen dat supporters een ander tribunevak binnendringen. Voor een officiële toeschouwer is er normaliter 0,4 m² ruimte beschikbaar per zitplaats, dit betekent dat de gemiddelde dichtheid op een zittribune 2,5 personen per vierkante meter is (Veenbrink, 2025). NEN-EN 13200-1 (2019) beveelt voor staanplaatsen op een horizontaal vlak een dichtheid aan van 35 toeschouwers per 10 m² (3,5 personen per vierkante meter). In geval van ontoereikend veiligheidsmanagement kan lokaal een grotere dichtheid optreden door concentratie van mensen (Veenbrink, 2025). Voor een deel van een tribune, zoals een tribune element, is de groepsdichtheid dus ook afhankelijk van het beschikbare oppervlak en de bewegingsvrijheid van de mensen op de tribune. Op basis van deze twee aspecten (beschikbaar oppervlak en bewegingsvrijheid) worden de volgende type tribunes onderzocht (Veenbrink, 2025):

- Staantribunes
- Safe-standing tribunes
 - o Rechte leuning
 - o Geknikte leuning
- Zittribunes
 - o Klapstoel
 - o Vast kuipje, aantrede gemonteerd
 - o Vast kuipje, optrede

Deze tribunes zijn gedefinieerd op basis van de meest voorkomende tribunes in Nederlandse stadions. Andere stadiontribunes zoals VIP tribunes en tribunes in andere gebruiksruidten, zoals theaters en bioscopen (zie Bijlage B), worden in paragraaf 3.4 ingedeeld in de nieuwe gebruiksklassen op basis van het functionele gebruik in deze ruimten.

3.2.1 Staantribunes

Staantribunes worden gedefinieerd als tribunes voorzien van banken, sectoren voor staande toeschouwers of tribunes zonder stoelen (The Stadium Consultancy, 2015). Bij staantribunes wordt de bewegingsvrijheid van de mensen op de tribune in zeer beperkte mate gehinderd door barrières, waardoor hoge concentraties van mensen kunnen optreden (zie [Figuur 3.1](#)).

Tabel 3.1 geeft maximale groepsdichtheden die zijn gevonden in literatuur voor staande menigtes. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen waarnemingen en limietwaarden gedefinieerd in onderzoeken of voorgeschreven in richtlijnen.

Op een vlakke ondergrond kunnen dichtheden tot 9 personen per vierkante meter optreden als mensen op elkaar gedrukt worden. Dit soort hoge dichtheden komen alleen voor in extreme omstandigheden waarbij mensen dusdanig worden samengedrukt dat ze niet meer kunnen ademen. Deze dichtheid wordt bijvoorbeeld op momenten waargenomen tijdens de Hady in Mekka (Tschechne, 2022). TNO rapport B-89-227 (1989) refereert aan een onderzoek van Paloheimo en Ollila (1973), waarin een statische belasting van $5,5 \text{ kN/m}^2$ is bepaald door middel van een experiment op een oppervlak van $2,34 \text{ m}$ bij $2,34 \text{ m}$ met een stilstaande menigte. Uitgaande van een massa van 85 kg per persoon volgt hieruit een groepsdichtheid van $6,6$ personen per vierkante meter. In een studie naar vloerbelastingen demonstrenen Drewniok en Orr (2019) verschillende groepsdichtheden, waaronder een dichtheid van $7,7$ personen per vierkante meter. De belasting hierbij was $5,6 \text{ kN/m}^2$, waaruit kan worden afgeleid dat de gemiddelde massa van de personen ongeveer 73 kg was. De dichtheid bepaald door Drewniok en Orr (2019) is groter dan die in vergelijking met de dichtheid bepaald door van Paloheimo en Ollila (1973). Het verschil wordt veroorzaakt door de verschillende gemiddelde massa van de groep personen die wordt beschouwd. Dit verschil laat zien dat de massa van de personen een significante invloed heeft op de groepsdichtheid, aangezien zwaardere mensen groter zijn en meer ruimte innemen. ISO 10137 (2007) geeft een maximum waargenomen dichtheid voor een springende groep mensen van $6,0$ personen per vierkante meter. De achtergrond van deze waarde is niet bekend; onduidelijk is in welke situatie deze dichtheid is waargenomen. Oberhagemann (2012) geeft een waarde van $6,0$ personen per vierkante meter voor een stilstaande menigte op een vlakke ondergrond. Still (2019) specificeert een limiet voor staande toeschouwers van $5,0$ personen per vierkante meter. Dit komt goed overeen met de Green Guide (SGSA, 2018) en NEN-EN 13200-1 (2019) die beiden een maximum toelaatbare dichtheid van $4,7$ personen per vierkante meter geven voor staande toeschouwers. Deze limieten zijn vastgelegd als grenswaarden voor crowd management; ze hebben geen directe relatie met de veiligheid van de constructie waarop de toeschouwers staan.

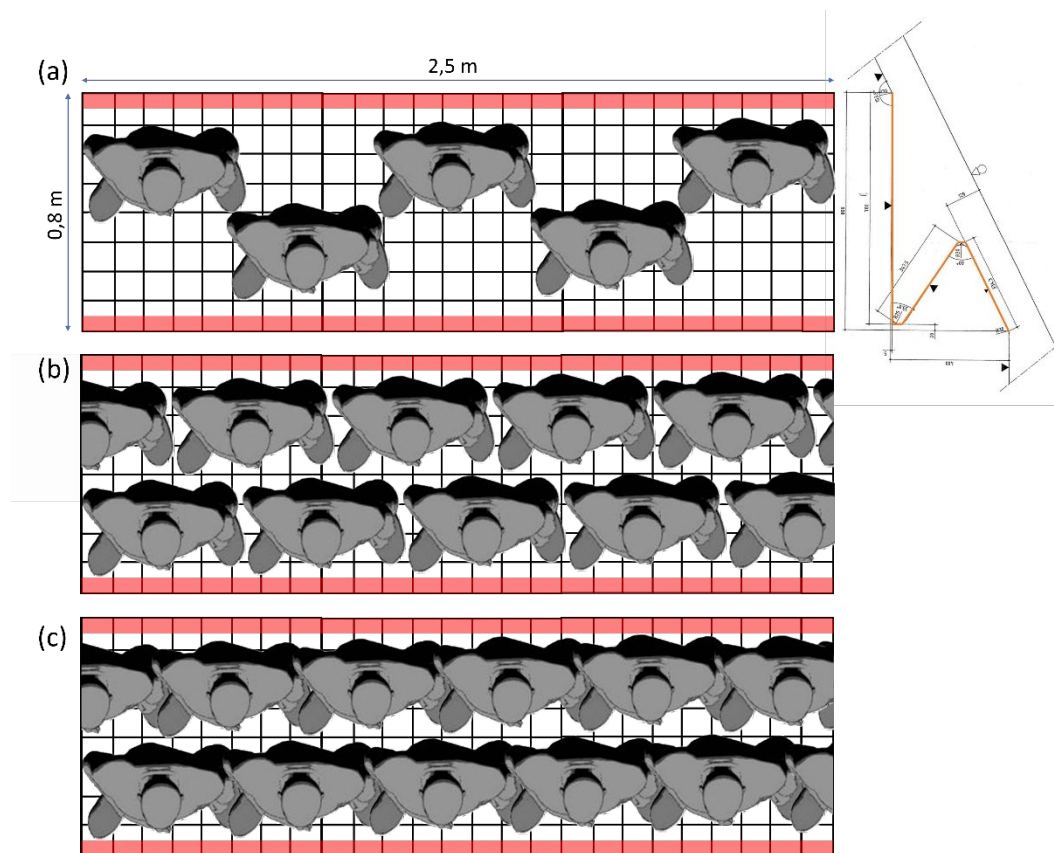
RHDHV (2022a) en ABT (2022c) hebben op basis van videobeelden de groepsdichtheid op staantribunes tijdens twee wedstrijden bepaald. In beide gevallen zijn de dichtheden bepaald op een moment van springen op de tribune. De inschatting van RHDHV (2022a) betreft het incident in de Goffert, waarbij het tribune element brak ten gevolge van de springende supporters. De waarde van $4,9$ personen per vierkante meter is voor één rij van het tribune element bepaald, het gemiddelde voor het gehele tribune element was $4,4$ personen per vierkante meter. De inschatting van ABT (2022c) is bepaald tijdens een wedstrijd van SC Heerenveen tegen Go Ahead Eagles. Deze dichtheid is het maximum bepaald van twee momentopnames (in beide wedstrijdhalften één opname); het is niet bekend of dit de maximum dichtheid is die is opgetreden tijdens deze wedstrijd.



Figuur 3.1: Staantribune Heerenveen (Schulpen, 2017) en de Graafschap supporters arm-in-arm op een staantribune (Willemsen, 2023).

Tabel 3.1: Groepsdichtheden en activiteiten voor staande menigtes en staantribunes.

	Maximale dichtheid (personen/m ²)	Bron	Activiteit	Situatie
Metingen/ observaties	9,0	Tschechne (2022)	Stilstaande menigte	Hadj (Mekka), vlakke ondergrond
	7,7	Drewniok en Orr (2019)	Stilstaande menigte	Experiment, vlakke ondergrond
	6,6	Paloheimo en Allilo (1973)	Stilstaande menigte	Experiment, vlakke ondergrond
	4,4	RHDHV (2022a)	Springende menigte	Staantribune (Goffert)
	4,0	ABT (2022c)	Springende menigte	Staantribune (Abe Lenstra Stadion)
Limieten	6,0	Oberhagemann (2012)	Stilstaande menigte	Niet gespecificeerd
	6,0	ISO 10137 (2007)	Gecoördineerd springen	Niet gespecificeerd
	5,0	Still (2019)	Stilstaande menigte	Niet gespecificeerd
	4,7	Green Guide (SGSA, 2018)	Stilstaande menigte	Stadions, tribunes
	4,7	NEN-EN 13200-1 (2019)	Stilstaande menigte	Stadions, tribunes



Figuur 3.2: Groepdichtheid op een deel van een staantribune voor verschillende concentraties van mensen: (a) 2,5 personen per vierkante meter (standaard dichtheid), (b) 4,7 personen per vierkante meter en (c) 5,2 personen per vierkante meter. Gebaseerd op (Still, 2019), met toestemming van de auteur aangepast.

Figuur 3.2 geeft een bovenaanzicht van een rij van een staantribune met een typische rijdiepte van 0,8 meter en een lengte van 2,5 meter (oppervlakte 2 m^2). Het rood gearceerde deel geeft de randen van de het horizontale oppervlak van de rij weer. In dit gebied zullen weinig toeschouwers staan, vanwege het hoogteverschil met de volgende rij of een (niet-doorlopende) barrière. **Figuur 3.2 (a)** geeft de standaard dichtheid als de toeschouwers gelijkmatig verdeeld zijn over de tribune (2,5 personen per vierkante meter). **Figuur 3.2 (b)** illustreert een dichtheid van 4,7 personen per vierkante meter, wat de maximum dichtheid is die de Green Guide (SGSA, 2018) geeft voor een stilstaande menigte. In deze situatie staan de toeschouwers dicht op elkaar, maar nog niet tegen elkaar aan. **Figuur 3.2 (c)** geeft de situatie weer als de toeschouwers met de armen over elkaars schouder staan, zoals weergegeven in **Figuur 3.1**. In dit geval is er sprake van een dichtheid van 5,2 personen per vierkante meter.

Op basis van de in **Tabel 3.1** en **Figuur 3.2** gepresenteerde resultaten wordt een dichtheid van 5 personen per vierkante meter voorgesteld als bovengrens voor een element van een staantribune, zowel voor een stilstaande menigte als voor een springende menigte. Still (2019), de Green Guide (SGSA, 2018) en NEN-EN 13200-1 (2019) specificeren de 5 personen per vierkante meter als maximum toelaatbare dichtheid voor staande toeschouwers op tribunes. Hogere dichtheden zijn bepaald door Paloheimo en Ollila (1973) en Oberhagemann (2012), deze dichtheden zijn echter bepaald voor een vlakke ondergrond en niet voor een tribune. De herkomst van de bovengrens waarde gespecificeerd in ISO

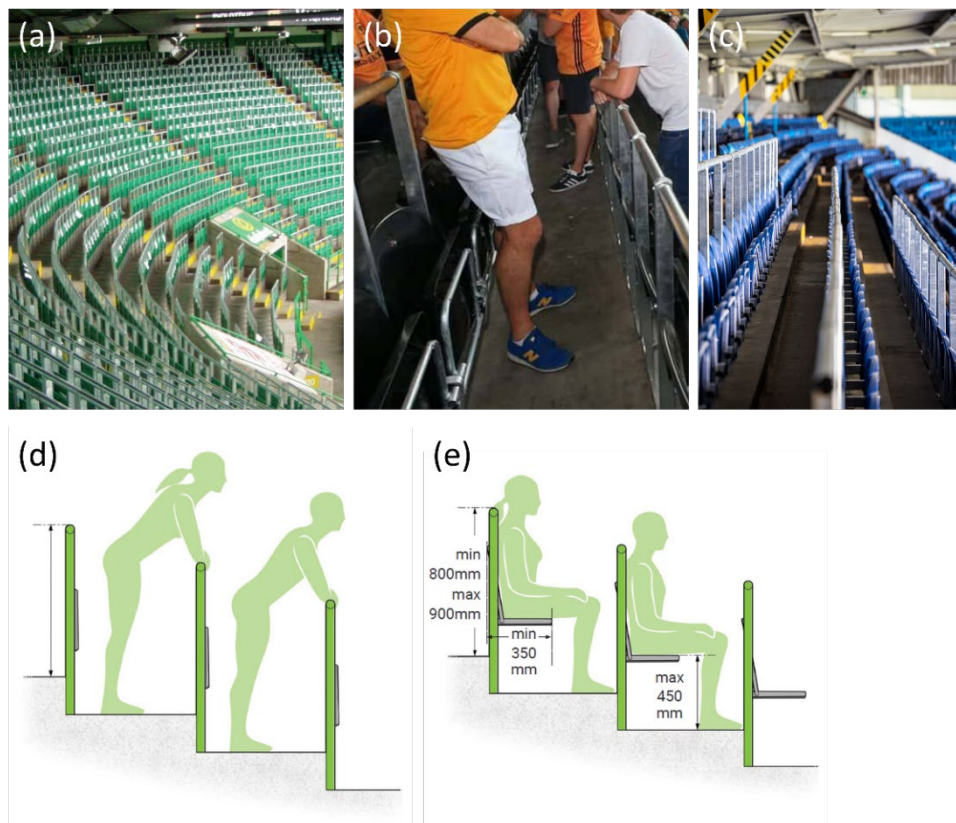
10137 (2007) voor een springende groep mensen kon niet worden achterhaald; onbekend is of deze dichtheid is waargenomen voor een springende groep mensen op een tribune. De extreme dichtheid van 4,9 personen per vierkante meter bepaald voor 1 rij van een tribune element tijdens het incident in de Goffert RHDHV (2022a), komt overeen met de hier voorgestelde bovengrens van 5 personen per vierkante meter voor een springende menigte op een staantribune. Uit de observaties waargenomen op vlakke ondergronden blijkt dat het mogelijk is dat lokaal (op een paar vierkante meter) een hogere groepsdichtheid optreedt. Door het hoogteverschil tussen rijen op een tribune is het echter zeer onwaarschijnlijk dat dit over een volledig tribune-element optreedt; de dichtheid op het gehele tribune-element van het Goffert-incident was ongeveer 4,4 personen per vierkante meter. Voor een grotere groep springende mensen is de 5 personen per vierkante meter mogelijk dus aan de hoge kant. In bovenstaande tabel was bij de twee waarnemingen sprake van iets lagere dichtheden (4-4,4 personen per vierkante meter). Aangezien dit slechts twee waarnemingen zijn wordt voorts nog meer aangesloten bij literatuur, in vervolgonderzoek kan een verlaging van de dichtheid bij springen worden voorgesteld, bijvoorbeeld op basis van extra metingen.

3.2.2 Safe-standing tribunes

Safe-standing is een concept voor staantribunes met speciale voorzieningen, zoals veiligheidshekken en klapstoelen, om het risico op overcrowding te minimaliseren. De constructie bestaat uit een doorlopend metalen frame over de tribune, zie [Figuur 3.3\(a\)](#), in de meeste gevallen uitgevoerd met een klapstoel om de 0,5 m. Een safe-standing tribune helpt om ongecontroleerde verplaatsingen van groepen mensen te voorkomen. Hierbij spelen stewards een belangrijke rol, zij zijn verantwoordelijk voor het controleren van bewegingen van toeschouwers en het voorkomen van overcrowding (SGSA, 2025). In het geval van een horizontale rijdiepte van 0,8 m, is er nog voldoende ruimte voor twee rijen toeschouwers tussen twee barrières als de klapstoelen ingeklapt zijn, zie [Figuur 3.3 \(b\)](#) en (d). Bij kleinere rijdieptes of een rij met een trede, zoals in [Figuur 3.3 \(c\)](#), is er ruimte voor één rij toeschouwers. Indien stoelen zijn neergeklapt op een rij, zoals in [Figuur 3.3 \(d\)](#), dan is er ook alleen ruimte voor één rij toeschouwers tussen twee barrières en wordt de bewegingsvrijheid van toeschouwers binnen die rij ook beperkt. Gezien de rol van de stewards en de aanwezige beperkingen om te bewegen, is bij safe-standing tribunes de kans op groepsdichtheden zoals bepaald voor staantribunes kleiner. Afhankelijk van de rijdiepte kan echter niet worden uitgesloten dat vergelijkbare groepsdichtheden optreden.

Tabel 3.2 geeft de groepsdichtheden gevonden in literatuur die van toepassing zijn voor safe-standing tribunes. De waarden gespecificeerd door Still (2019), de Green Guide (SGSA, 2018) en NEN-EN 13200-1 (2019), in de vorige paragraaf ook gebruikt voor staantribunes, zijn ook van toepassing voor safe-standing tribunes. De Green Guide (SGSA, 2018) benoemt de dichtheid van 4,7 personen per vierkante meter expliciet als maximum toelaatbare dichtheid voor safe-standing tribunes; NEN-EN 13200-1 (2019) benoemt safe-standing niet als specifiek type tribune.

RHDHV (2022c) heeft op basis van videobeelden het aantal personen op een safe-standing tribune tijdens een wedstrijd in de Johan Cruijff Arena bepaald. De onderzochte safe-standing tribune bestond uit barrières met losstaande klapstoelen. RHDHV (2022c) geeft voor verschillende safe-standing vakken dichtheden van 2,1 en 1,9 personen per vierkante meter. De rapportage maakt niet duidelijk of dit de maximum dichtheden zijn die zijn opgetreden tijdens de wedstrijd; met TNO is gecommuniceerd dat alleen van een deel van de wedstrijd beelden zijn vrijgegeven. Het kan niet worden uitgesloten dat hogere dichtheden zijn opgetreden in de onderzochte safe-standing vakken tijdens de wedstrijd.

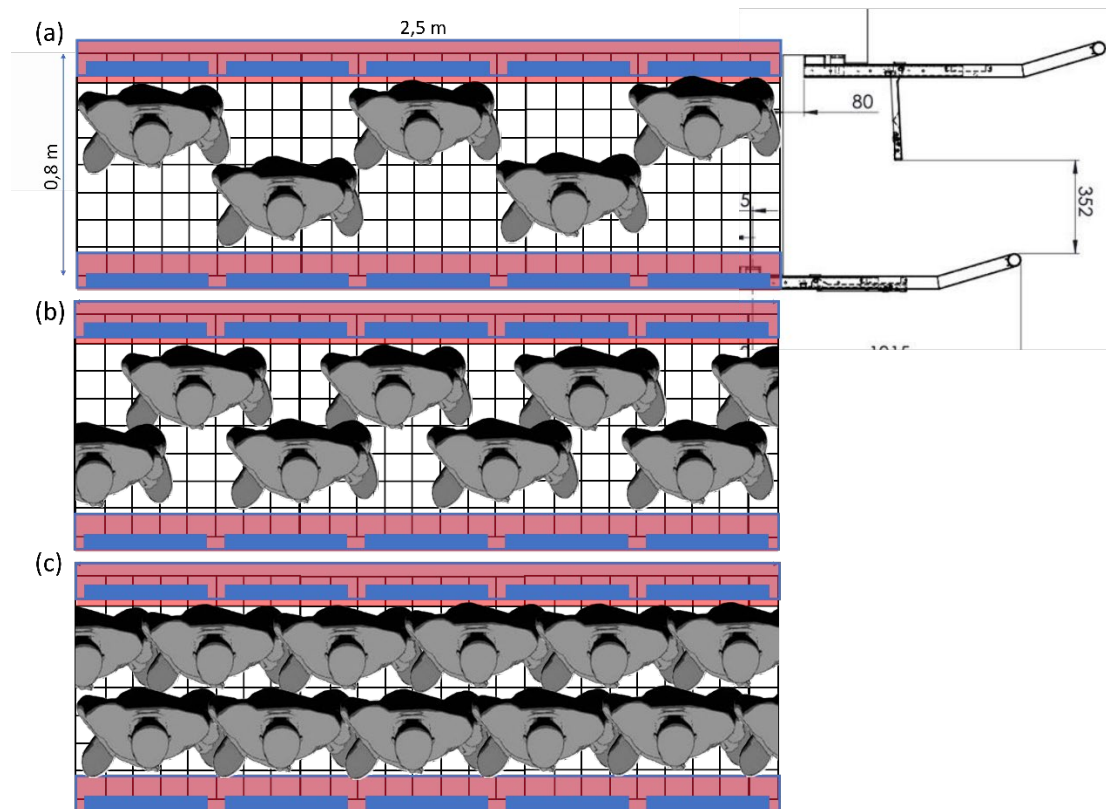


Figuur 3.3: Safe-standing tribunes: (a) doorlopende barrière over de tribune (Thompson, 2022), (b) beperkte ruimte voor twee rijen mensen (Scrafton, 2021), (c) rij met trede in het midden (GL Events, 2025), (d) en (e) staande en zittende mensen op een safe-standing tribune (SGSA, 2018).

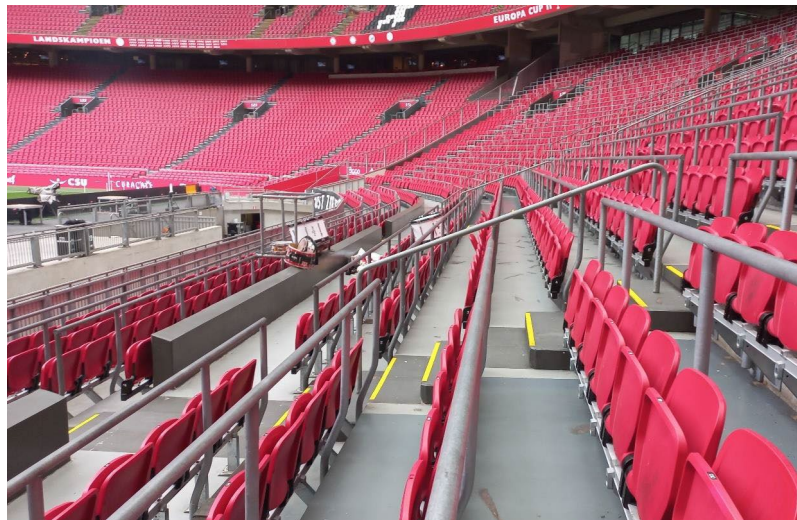
Tabel 3.2: Groepsdichtheden en activiteiten voor staande menigtes en safe standing tribunes.

	Maximale dichtheid (personen/m ²)	Bron	Activiteit	Situatie
Metingen/observaties	2,1	RHDHV (2022c)	Springende menigte	Safe-standing tribune met klapstoeltjes (Johan Cruijff Arena)
	1,9	RHDHV (2022c)	Springende menigte	Safe-standing tribune met klapstoeltjes (Johan Cruijff Arena)
Limieten	5,0	Still (2019)	Stilstaande menigte	Niet gespecificeerd
	4,7	Green Guide (SGSA, 2018)	Stilstaande menigte	Stadions, tribunes
	4,7	NEN-EN 13200-1 (2019)	Stilstaande menigte	Stadions, tribunes

Figuur 3.4 geeft een plattegrond van een safe-standing tribune met geïntegreerde ingeklapte klapstoeltjes in de barrière met een geknikte leuning (zogenaamde rail seating), waarbij verschillende groepsdichtheden zijn weergegeven. De beschikbare diepte voor personen is met 0,55 m (geknikte leuning) tot 0,7 m (rechte leuning) kleiner dan de diepte op een staantribune. Safe-standing tribunes waarbij de stoelen niet zijn geïntegreerd in de barrière, zoals weergegeven in **Figuur 3.4**, hebben nog minder ruimte voor toeschouwers. Voor dit type safe-standing tribune specificeert de Green Guide (SGSA, 2018) een minimale diepte van 305 mm (bestaande bouw) of 400 mm (nieuwbouw) tussen de (ingeklapte) klapstoel en de barrière. De weergegeven dichtheden in **Figuur 3.4** geven dus een conservatief beeld voor andere soorten safe-standing tribunes, uitgaande van een rijdiepte van 0,8 m. **Figuur 3.4** (a) illustreert de gemiddelde dichtheid van 2,5 personen per vierkante meter, op basis van 1 persoon per klapstoel. **Figuur 3.4** (b) illustreert een dichtheid van 3,5 personen per vierkante meter, welke door NEN-EN 13200-1 (2019) wordt aanbevolen voor staanplaatsen. **Figuur 3.4** (c) geeft de situatie weer als de toeschouwers dicht tegen elkaar aan staan, zowel over de lengte als de diepte van de rij. In dit geval is de dichtheid 5,2 personen per vierkante meter.



Figuur 3.4: Groepsdichtheid op een deel van een safe-standing tribune met geïntegreerde klapstoelen voor verschillende concentraties van mensen: (a) 2,5 personen per vierkante meter (standaard dichtheid), (b) 3,5 personen per vierkante meter en (c) 5,2 personen per vierkante meter. Gebaseerd op (Still, 2019), met toestemming van de auteur aangepast.



Figuur 3.5: Safe-standing tribunes in de Johan Cruijff Arena (RHDHV, 2022c).

Figuur 3.5 illustreert groepsdichtheden voor een safe-standing tribune met barrières en losstaande klapstoelen. In dit geval is de beschikbare diepte voor toeschouwers ongeveer 0,55 m. Een verhoging in dichtheid tot 3,5-4 personen per vierkante meter kan waarschijnlijk optreden, doordat de rij supporters iets in elkaar schuift zoals weergegeven in **Figuur 3.5** (b). Er is echter onvoldoende ruimte voor twee rijen achter elkaar staande supporters, zoals in **Figuur 3.5** (c).

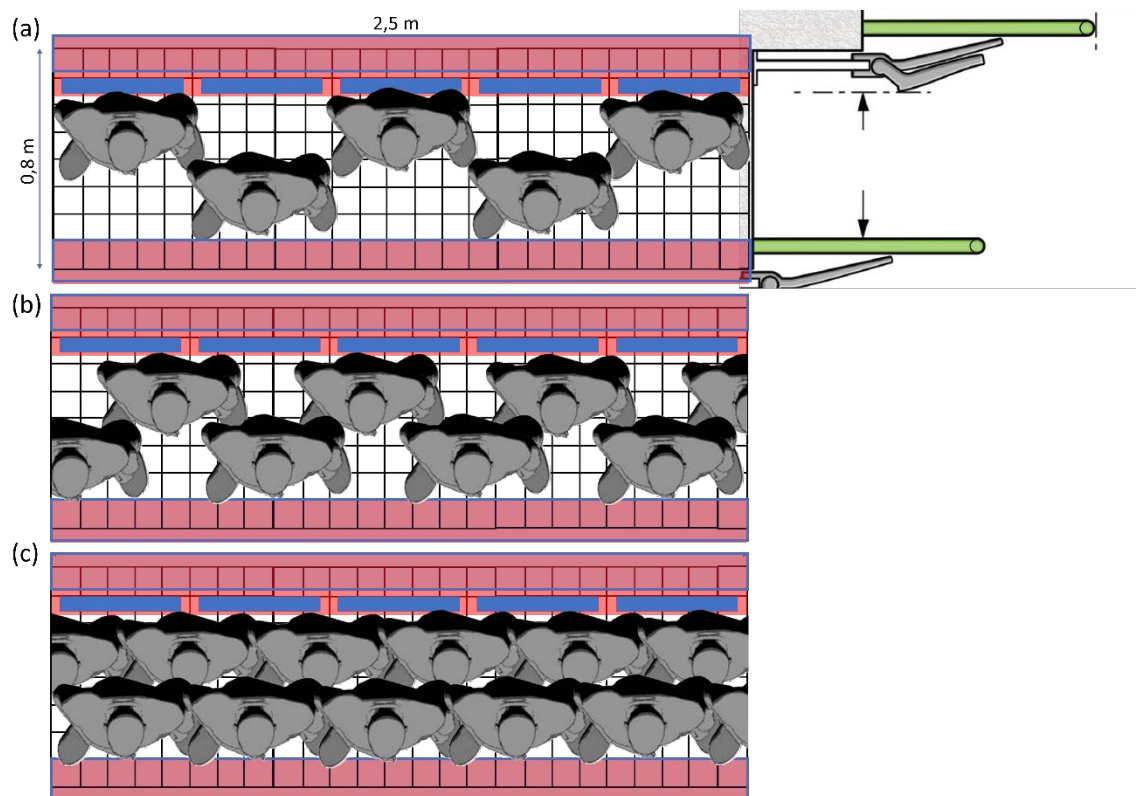
Samengevat wordt geconcludeerd dat safe-standing tribunes in een kleinere kans op grote groepsdichtheden resulteren dan traditionele staantribunes zonder safe-standing, ten gevolge van:

- Een kleinere beschikbare ruimte door barrières en klapstoelen
- Een kleinere bewegingsvrijheid van mensen op de tribune

Met betrekking tot de beschikbare ruimte op safe-standing tribunes kan onderscheid worden gemaakt tussen barrières met geïntegreerde klapstoeltjes (rail seating) en barrières met losstaande klapstoeltjes.

Voor rail seating is de beschikbare diepte voor toeschouwers ongeveer 0,6 m tot 0,7 m (uitgaande van een rijdiepte van 0,8 m), waardoor niet kan worden uitgesloten dat een hoge dichtheid met twee rijen toeschouwers optreedt. Er zijn geen data beschikbaar over de groepsdichtheid voor dit type safe standing tijdens wedstrijden, op een wijze zoals bepaald door RHDHV (2022c) voor safe standing met losstaande klapstoeltjes. Hoewel de kans op grote groepsdichtheden kleiner wordt ingeschat dan voor traditionele staantribunes, ontbreekt data om een lagere groepsdichtheid voor safe standing te onderbouwen. Op basis van Still (2019), de Green Guide (SGSA, 2018) en NEN-EN 13200-1 (2019) wordt daarom een bovengrens voorgesteld van afgerond 5 personen per vierkante meter.

Voor safe standing tribunes met (losstaande) klapstoeltjes, waarbij de beschikbare diepte voor toeschouwers kleiner is dan 0,55 m, is het zeer onwaarschijnlijk (zie **Figuur 3.6**) dat dichtheden groter dan 4 personen per vierkante meter kunnen optreden. Daarom wordt voor dit type safe standing een bovengrens van 4 personen per vierkante meter voorgesteld.



Figuur 3.6: Groepsdichtheid op een deel van een safe-standing tribune met losstaande klapstoelen voor verschillende concentraties van mensen: (a) 2,5 personen per vierkante meter (standaard dichtheid), (b) 3,5 personen per vierkante meter en (c) 5,2 personen per vierkante meter. Gebaseerd op (Still, 2019), met toestemming van de auteur aangepast.

Naast de beschikbare ruimte speelt de beperking in bewegingsvrijheid een belangrijke rol. Dit wordt voornamelijk gerealiseerd door de barrières in combinatie met de stewards. Voor een safe-standing tribune is normaliter een dichtheid van 2,5 personen per vierkante meter van toepassing, zie [Figuur 3.6](#) (a), in geval van een volledig gevulde tribune. Indien een stadion-eigenaar maatregelen treft waardoor het niet (of in zeer beperkte mate) mogelijk is voor toeschouwers om van de ene rij op een safe-standing tribune naar een andere rij te gaan, dan kunnen hogere dichtheden alleen lokaal binnen een rij optreden. Op andere plekken in de rij zal de dichtheid in dit geval lager zijn dan 2,5 personen per vierkante meter. De maximum dichtheid op een tribune element zal in dit geval mogelijk kleiner zijn dan 4 of 5 personen per vierkante meter. Dit wordt bepaald door de lengte en positionering van een tribune element ten opzichte van een rij.

Om tot een nauwkeurigere en waarschijnlijk minder conservatieve bepaling van de groepsdichtheid op safe-standing tribunes te komen is meer data benodigd van extreme groepsdichtheden op de verschillende type safe-standing tribunes en hoe deze groepsdichtheden afhangen van het oppervlak dat wordt beschouwd. Deze informatie kan worden verkregen door middel van het continue monitoren met camera's van groepsdichtheden tijdens een wedstrijd op een safe standing tribune. Op basis van deze continue monitoring over een gehele wedstrijd kan één wedstrijdextreem worden bepaald van de groepsdichtheid op het onderzochte type tribune. Meerdere wedstrijdextremen zijn benodigd om tot een betrouwbare verdeling van wedstrijdextremen voor de groepsdichtheid te komen.

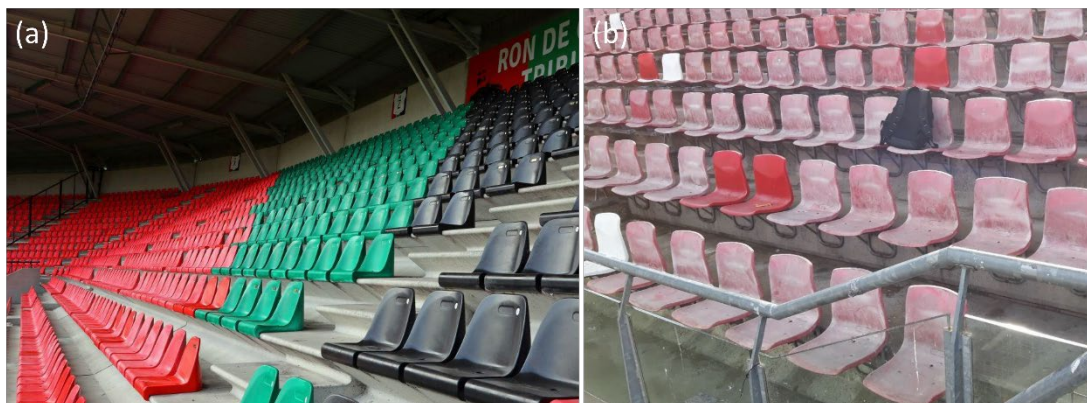
3.2.3 Zittribunes

Zittribunes zijn onderverdeeld in tribunes met klapstoelen, zie [Figuur 3.7](#), vaste stoelen die op de tribunetrede zijn gemonteerd, zoals in [Figuur 3.7](#) (a), en kuipjes die aan de trede zijn gemonteerd, zie [Figuur 3.7](#) (b). NEN-EN 13200-1 (2019) specificeert voor zittribunes dat de capaciteit wordt bepaald door het aantal zitplaatsen. De ruimte die een zitplaats inneemt is meestal 0,4 m² (Veenbrink, 2025). In het geval van een volledig bezette zittribune betekent dit een gemiddelde dichtheid van 2,5 personen per vierkante meter. Op basis van de minimum dimensies voor een zitplaats in NEN-EN 13200-1 (2019) volgt een oppervlakte van 0,315 m², wat overeenkomt met een gemiddelde dichtheid van 3,2 personen per vierkante meter. Er zijn geen waarden voor maximum groepsdichtheden op zittribunes gevonden in literatuur.

[Tabel 3.3](#) geeft een overzicht van groepsdichtheden voor zittribunes met klapstoelen en zittribunes met vaste stoelen aan de trede gemonteerd; er zijn geen resultaten van zittribunes met op de trede gemonteerde vaste stoelen. De resultaten zijn verkregen door middel van videobeelden en metingen:

- De resultaten van abtWassenaar (2022a) voor een stilstaande menigte zijn bepaald op basis van een analyse van videobeelden op 15 minuten intervallen gedurende de wedstrijd, en betreffen de maximum waarden van deze interval registraties.
- De waarde van 2,7 personen per vierkante meter uit ABT (2022b) betreft het maximum van 6 momenten gedurende de wedstrijd.
- De waarde van 2,0 personen per vierkante meter uit RHDHV (2022d) is bepaald op basis van één videobeeld op een moment van springen tijdens de wedstrijd.
- De resultaten van de groepsdichtheid voor een springende menigte (abtWassenaar, 2022a; ABT, 2022b) zijn bepaald met behulp van de gemeten uitwijkingen van de tribune. Beide waarden (3,6 personen en 2,7 personen per vierkante meter) zijn de maximum gemeten waarden tijdens de wedstrijd.

De resultaten van de groepsdichtheid in [Tabel 3.3](#) laten zien dat voor zittribunes met klapstoelen een dichtheid van 3,6 personen per vierkante meter kan optreden tijdens een wedstrijd. Op basis van de data is het niet mogelijk om het effect van de twee onderzochte stoeltypen (klapstoelen en vaste stoelen aan trede) goed te beoordelen. Uit het onderzoek van abtWassenaar (2022a) blijkt dat de dichtheid tijdens een wedstrijd behoorlijk kan variëren. De enige waarden die zijn gebaseerd op registraties over de hele wedstrijd betreffen de waarden van abtWassenaar (2022a) en ABT (2022b) (aangegeven met een *). Deze resultaten suggereren dat in het geval van klapstoeltjes wat hogere dichtheden kunnen optreden dan voor stoelen aan de trede.



Figuur 3.7: Zittribunes: (a) stoeltjes op trede (Reuvers, 2024), (b) stoeltjes aan trede gemonteerd (RHDHV, 2022d).

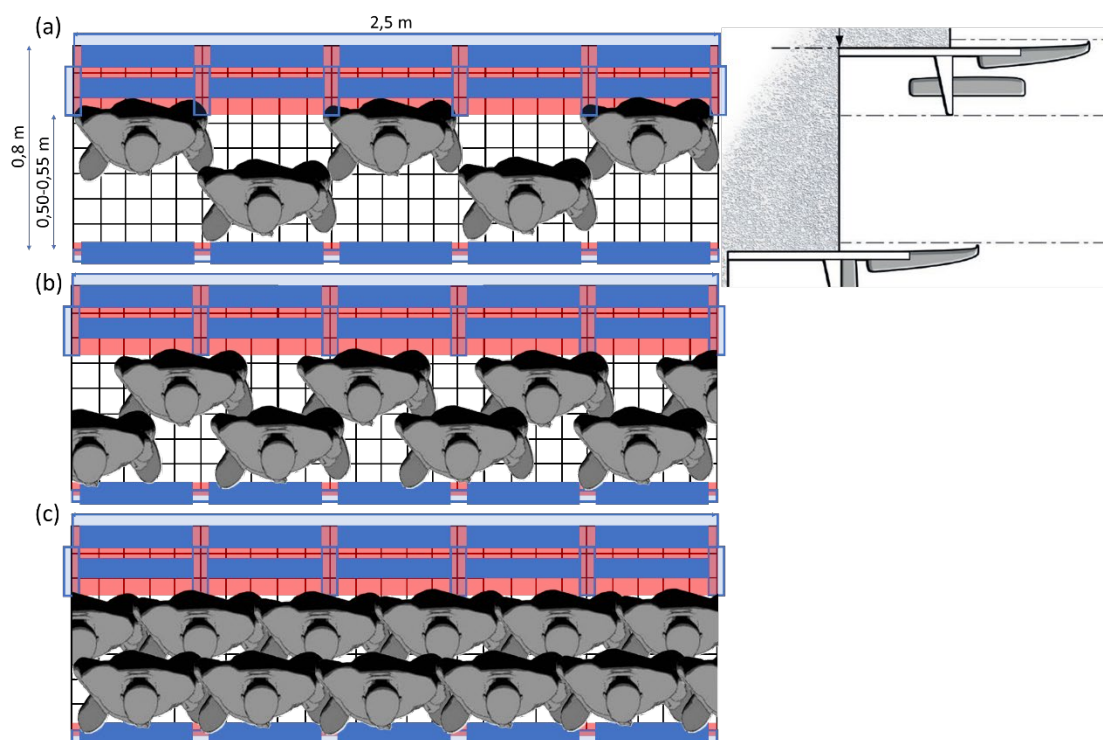
Tabel 3.3: Groepsdichtheden en activiteiten op basis van metingen en observaties aan zittribunes met verschillende type stoeltjes in Nederlandse stadions.

	Maximale dichtheid (personen/m ²)	Bron	Activiteit	Situatie
Metingen/ observaties	3,1	abtWassenaar (2022a)	Stilstaande menigte	Zittribune met klapstoeltjes (de Euroborg)
	3,4	abtWassenaar (2022a)	Stilstaande menigte	Zittribune met klapstoeltjes (de Euroborg)
	2,7	ABT (2022b)	Stilstaande menigte	Zittribune met vaste stoeltjes aan trede (AFAS stadion)
	2,0	RHDHV (2022d)	Springende menigte	Zittribune met vaste stoeltjes aan trede (de Galgewaard)
	2,7*	abtWassenaar (2022a)	Springende menigte	Zittribune met klapstoeltjes (de Euroborg)
	3,6*	abtWassenaar (2022a)	Springende menigte	Zittribune met klapstoeltjes (de Euroborg)
	2,7*	ABT (2022b)	Springende menigte	Zittribune met vaste stoeltjes aan trede (AFAS stadion)

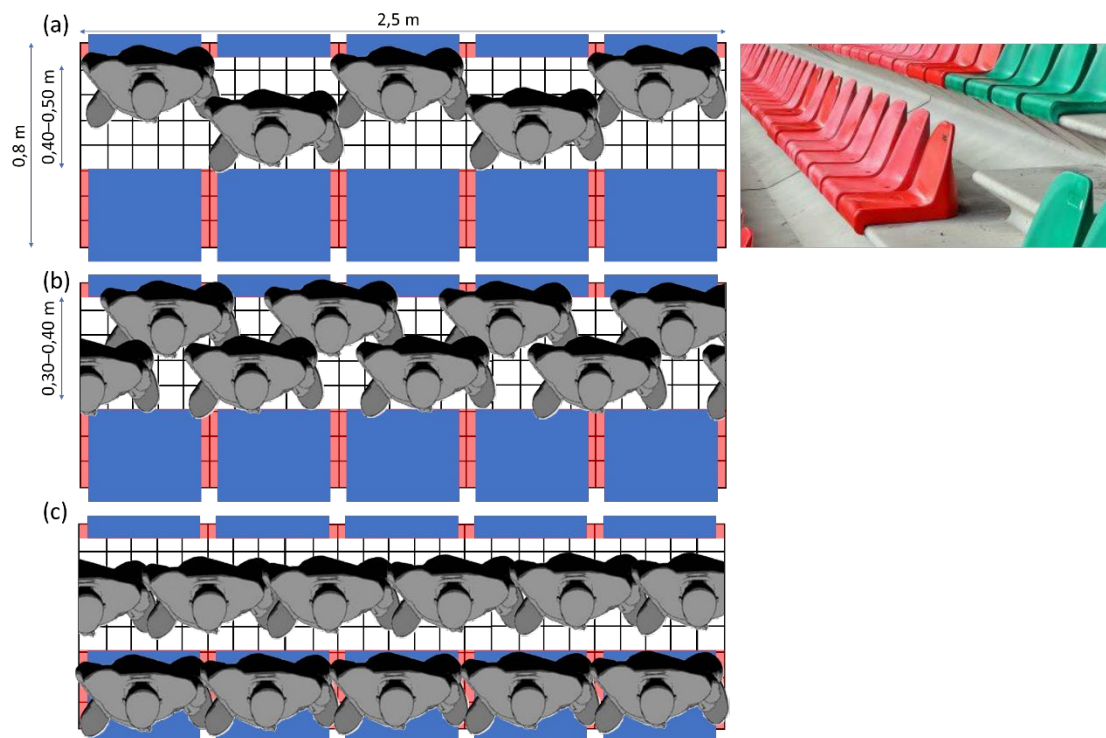
* Groepsdichtheden bepaald op basis van de gemeten uitwijking van de tribune vlak voor het moment van springen.

Figuur 3.8 presenteert een deel van een zittribune met klapstoelen. De diepte van de rij is beperkt tot 0,5 – 0,55 m. Hierdoor is er geen ruimte voor twee rijen toeschouwers, zoals weergegeven in **Figuur 3.8** (c). Het is wel mogelijk dat de toeschouwers wat dichterbij elkaar gaan staan, waardoor dichtheden tot 4 personen per vierkante meter mogelijk zijn. Dit sluit ook aan bij de waarden uit de observaties en metingen in **Tabel 3.3** voor zittribunes met klapstoelen.

Figuur 3.9 geeft de plattegrond van een zittribune met vaste stoelen die op de trede zijn gemonteerd. De diepte van de rij is 0,4 tot 0,5 m, afhankelijk van het type stoel. Als toeschouwers tussen de stoelen blijven staan kunnen dichtheden optreden tot 4 personen per vierkante meter. Als toeschouwers op de stoelen gaan staan zijn hogere dichtheden mogelijk tot 5 personen per vierkante meter. Om deze dichtheid te bereiken moeten er wel toeschouwers van andere rijen/plaatsen toestromen. Voor zittribunes met vaste stoelen aan de trede, zie **Figuur 3.9** (b), is de beschikbare diepte tussen twee rijen stoelen 0,3 tot 0,4 m. Dezelfde bovengrenswaarden voor de dichtheden voor vaste stoelen op de treden zijn van toepassing voor vaste stoelen aan de trede, aangezien hier ook de mogelijkheid bestaat dat toeschouwers op de stoelen gaan staan.



Figuur 3.8: Groepsdichtheid op een zittribune met klapstoelen voor verschillende concentraties van mensen: (a) 2,5 personen per vierkante meter (standaard dichtheid), (b) 3,5 personen per vierkante meter en (c) 5,2 personen per vierkante meter. Gebaseerd op (Still, 2019), met toestemming van de auteur aangepast.



Figuur 3.9: Groepsdichtheid op een zittribune met vaste stoelen op de trede gemonteerd voor verschillende concentraties van mensen: (a) 2,5 personen per vierkante meter (standaard dichtheid), (b) 3,8 personen per vierkante meter en (c) 5,2 personen per vierkante meter. Gebaseerd op (Still, 2019), met toestemming van de auteur aangepast.

Op basis van de bevindingen voor zittribunes wordt onderscheid gemaakt tussen klappstoelen en vaste stoelen (op en aan de trede gemonteerd). Voor zittribunes met klappstoelen wordt op basis van de beperkte diepte (0,5 – 0,55 m) tussen twee rijen klappstoelen voorgesteld uit te gaan van 4 personen per vierkante meter. Deze dichtheid omvat de dichtheden bepaald uit analyses van videobeelden van toeschouwers op zittribunes met klappstoelen. Voor zittribunes met vaste stoelen kan ook worden uitgegaan van 4 personen per vierkante meter. Hierbij dient echter rekening gehouden te worden met de mogelijkheid van meerdere toeschouwers die in een rij op stoelen gaan staan. Indien deze mogelijkheid bestaat op een zittribune met vaste stoelen, dan dient uitgegaan te worden van 5 personen per vierkante meter (zie paragraaf 3.2.1). Bij vaste stoelen dienen dus maatregelen getroffen te worden waarmee wordt voorkomen dat deze situatie zich kan voordoen.

Om tot een betere bepaling van de groepsdichtheid op zittribunes te komen, wordt aanbevolen eenzelfde soort monitoring met camera's in te richten als beschreven in paragraaf 3.2.2 voor safe standing tribunes.

3.2.4 Samenvatting

Tabel 3.4 geeft een overzicht van eigenschappen die zijn besproken voor de verschillende type tribunes. Op basis van de beschikbare diepte binnen een rij en de inschatting van de te verwachten maximum dichtheid met behulp van de tribune plattegronden wordt geconcludeerd dat voor een vrije diepte tussen twee barrières (inclusief stoelen) kleiner dan 0,55 m uitgegaan kan worden van een groepsdichtheid van 4,0 personen per vierkante

meter. Als de afstand gelijk is aan of groter is dan 0,55 m wordt voorgesteld uit te gaan van 5,0 personen per vierkante meter.

Tabel 3.4: Overzicht van eigenschappen (dimensies en dichtheden) voor verschillende typen tribunes.

	Staantribune	Safe standing		Zittribune	
		Klapstoel geïntegreerd	Klapstoel los	Klapstoel	Vaste stoel
Beschikbare diepte binnen rij [m]	0,70 – 0,80 ^[1]	0,55 – 0,70 ^[1]	0,40 – 0,55 ^[1]	0,50 – 0,55 ^[1]	0,40 – 0,5 ^[1]
Maximum dichtheid o.b.v. waarnemingen [personen/m ²]	4,9	Geen	2,1	3,6	2,7
Maximum dichtheid o.b.v. limieten voor tribunes [personen/m ²]	4,7	4,7	4,7	Geen	Geen
Maximum dichtheid o.b.v. plattegrond [personen/m ²]	5,0	4,0 of 5,0	4,0	4,0	4,0 of 5,0
Staan op stoelen	Niet	Niet	Niet	Niet	Wel
Voorstel dichtheid gebruiksklasse [personen/m ²] ^{[2][4]}	5,0	4,0 of 5,0 ^[3]	4,0	4,0	4,0 of 5,0 ^[3]

^[1] Bij deze dimensies wordt uitgegaan van een rijdiepte van 0,80 m.
^[2] Bij de gespecificeerde groepsdichtheden wordt uitgegaan van een massa van 85 kg per toeschouwer; dit is de gemiddelde massa van een volwassen Nederlandse man.
^[3] Indien door middel van maatregelen wordt voorkomen dat de groepsdichtheid in een rij groter wordt dan 4,0 personen per vierkante meter (bv. door tegen te gaan dat toeschouwers in een andere rij kunnen gaan staan, of dat toeschouwers op stoelen gaan staan), dan is een dichtheid van 4,0 personen per vierkante meter van toepassing. Indien geen maatregelen worden getroffen om dit te voorkomen, dan is een dichtheid van 5,0 personen per vierkante meter van toepassing.
^[4] Deze waarde kan mogelijk aangescherpt worden op basis van meer metingen van groepsdichtheden tijdens springen.

Voor zittribunes met vaste stoelen bestaat de mogelijkheid dat toeschouwers op stoelen gaan staan, waardoor een groepsdichtheid van 5,0 personen per vierkante meter kan optreden. Zonder maatregelen dient voor zittribunes met vaste stoelen, op of aan de trede gemonteerd, daarom uitgegaan te worden van 5,0 personen per vierkante meter. Indien maatregelen worden getroffen waarmee wordt voorkomen dat de groepsdichtheid in een rij groter wordt dan 4,0 personen per vierkante meter, dan kan van 4,0 personen per vierkante meter worden uitgegaan. Maatregelen die bijvoorbeeld kunnen worden toegepast zijn het plaatsen van safe-standing railing om rijen zitplaatsen af te bakenen en crowd management waarbij stewards er voor zorgen dat er geen overcrowding optreedt en/of mensen op hun stoelen gaan staan.

Met betrekking tot het type activiteit wordt op basis van de analyse van de typen tribunes in deze paragraaf geconcludeerd dat er geen onderscheid kan worden gemaakt in type activiteit (stilstaan, springen) tussen verschillende type tribunes. Uit de observaties en

metingen van ABT en RoyalHaskoningDHV blijkt dat springen voorkomt op alle type tribunes. In paragraaf 3.3 worden de aspecten besproken die een rol spelen bij gecoördineerd springen door mensenmassa's op tribunes, op basis waarvan voorwaarden worden gedefinieerd wanneer hier rekening mee gehouden dient te worden.

3.3 Gecoördineerd springende mensenmassa's

Gecoördineerde ritmische activiteiten, zoals dansen en springen, door grote mensenmassa's zijn een bekend verschijnsel tijdens muziekconcerten (Ellis et al., 2000). Tijdens dit soort evenementen vindt synchronisatie plaats van de ritmische activiteit, door de coördinatie ten gevolge van de beat in de muziek, vaak ook ondersteund door beeld op grote videoschermen. Evenementconstructies zoals tribunes, waarbij sprake is van een trillingsgevoelige constructie, kunnen bij dit soort ritmische activiteiten een veiligheidsrisico vormen. Als deze combinatie zich voordoet, wat bijvoorbeeld het geval is in het Feyenoord stadion in Rotterdam (Van Staaldunin en Courage, 1994), dan dienen trillingen van de constructie gemonitord te worden en beheersmaatregelen te worden toegepast (zoals het stoppen van de beeldschermen of het terugdraaien van de bass) bij vooraf bepaalde trillingsgrenswaarden.

Andere situaties, bijvoorbeeld sportwedstrijden in stadions, werden tot niet zo lang geleden gezien als evenementen waarbij geen sprake is van een groot risico op synchronisatie van ritmische activiteiten. Ellis et al. (2000) beschrijft dat bij sportevenementen zoals voetbal, er nauwelijks sprake is van coördinatie van de beweging van het publiek, zelfs niet als er een doelpunt wordt gescoord. Ze suggereren dat het publiek zonder muziek niet goed in staat is om zich aan een bepaald ritme te houden. Wel geven ze aan dat het normaal is om voor en na wedstrijden popmuziek te spelen, maar achten ze de kans klein dat een groot deel van het voetbalpubliek hierop gaat springen op de juiste frequentie om significante resonantie te genereren. Ellis et al. (2000) geven aan dat het beste ervoor kan worden gekozen om deze situatie te vermijden door actief beheer van de muziek die wordt uitgezonden, in plaats van te kiezen voor constructieve aanpassingen.

Door de opkomst van ultrasupportersgroepen (ultra's) is de kans op grote groepen gecoördineerd springende mensen op tribunes significant toegenomen. Ultra's zijn fanatieke supportersgroepen die zorgen voor sfeer in het stadion, onder meer door middel van zang, muziek, vlagvertoon, vuurwerk en sfeeracties. Tijdens sportevenementen wordt in tribunevakken waar zich ultrasupportersgroepen bevinden regelmatig synchroon gesprongen door grote groepen mensen. Dit springen wordt doorgaans gecoördineerd door een leider van de ultragroep, vaak met behulp van een luidspreker en ondersteund door trommels (zie [Figuur 3.10](#)). Tijdens het Goffert-incident werd het springende Vitesse-publiek in het uitvak gecoördineerd door de spelers van Vitesse (NOS, 2021).



Figuur 3.10: Supportersvereniging Ultras Almere met op de voorgrond twee supporters die een ritme aangeven op trommels en iets daarboven voor het publiek een supporter met een luidspreker om de andere supporters te instrueren.

Aanbevolen wordt maatregelen om het synchroon springen te beperken alleen te overwegen voor bestaande bouw, indien het praktisch niet mogelijk blijkt om versterkingsmaatregelen te treffen. Maatregelen om het synchroon springen te beperken, indien noodzakelijk, zouden zich moeten richten op de coördinatie ervan, zoals de aansturing door de groepsleider en de trommels die de sprongfrequentie bepalen. Ook zouden toeschouwers geïnformeerd kunnen worden dat synchroon springen om veiligheidsredenen niet is toegestaan. In alle opzichten is het echter beter te streven naar tribunes die sterk en stijf genoeg zijn om deze belasting op te vangen. Dit geldt in de eerste plaats voor nieuwbouw. In het geval voor bestaande bouw dient gestreefd te worden op korte termijn deze toestand te bereiken. Prioritering van vakken waar fanatieke supportergroepen actief zijn ligt daarbij voor de hand.

3.4 Voorstel nieuwe gebruiksklassen

Op basis van de analyse beschreven in de voorafgaande paragrafen wordt voorgesteld om de gebruiksklassen voor tribunes te definiëren op basis van de extreme groepsdichtheid (welke afhankelijk is van de aanwezigheid van barrières op de tribune) en gecoördineerd springen door grote mensenmassa's. Omdat er in de huidige bepalingen slechts twee gebruiksklassen van toepassing zijn voor tribunes (C2 en C5), worden deze in dit voorstel verder onverdeeld in gebruiksklassen C21, C22, C51 en C52. [Tabel 3.5](#) geeft het voorstel voor de vier gebruiksklassen voor tribunes met omschrijvingen en voorbeelden. Voor gebruiksklassen C21 en C22 is een groepsdichtheid van 4,0 personen per vierkante meter van toepassing, en voor gebruiksklassen C51 en C52 een dichtheid van 5,0 personen per vierkante meter.

Op basis van het functionele gebruik zijn VIP tribunes en ruimten die in de huidige NEN-EN 1991-1-1 onder gebruiksklasse C2 en C5 vallen ingedeeld in gebruiksklasse C21 en C51.

Tabel 3.5: Voorstel gebruiksklassen.

Klasse	Omschrijving	Voorbeelden
C21	Ruimten met vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's niet optreedt of met maatregelen wordt voorkomen ^[3]	Safe-standing tribunes, zittribunes ^[2] , VIP tribunes, ruimten in kerken, theaters of bioscopen, conferentiezalen, collegezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtkamers/lokalen in stations
C22	Ruimten met vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's kan optreden	Safe-standing tribunes, zittribunes ^[2]
C51	Ruimten zonder vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's niet optreedt of met maatregelen wordt voorkomen ^[3]	Traditionele staantribunes, bordessen en toegangsruimten, sporthallen, concertzalen, stationsperrons
C52	Ruimten zonder vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's kan optreden	Traditionele staantribunes

^[1] Als de vrije ruimte in een rij tussen twee barrières groter is dan 0,55 m (met uitzondering van VIP tribunes) dan dienen beheersmaatregelen getroffen te worden die verhinderen dat toeschouwers in een andere rij gaan staan. Indien geen beheersmaatregelen worden getroffen in deze situaties, dan is gebruiksklasse C51 of C52 van toepassing.

^[2] Als de kans bestaat dat toeschouwers op stoelen gaan staan, waarbij een verhoging in concentratie van mensen optreedt, dan dienen beheersmaatregelen getroffen te worden die het staan op stoelen tegengaan (bv. door middel van stewards die toeschouwers hierover instrueren). Indien geen maatregelen worden getroffen in deze situaties, dan is gebruiksklasse C51 of C52 van toepassing.

^[3] Maatregelen dienen getroffen te worden om gecoördineerd springen tegen te gaan. Indien er geen maatregelen worden getroffen in een tribunevak waar gecoördineerd springen kan optreden, dan is gebruiksklasse C22 of C52 van toepassing.

4 Karakteristieke waarde gebruiksbelastingen op tribunes

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk beschrijft de bepaling van de karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen voor de gebruiksklassen zoals vastgesteld in hoofdstuk 3. Het betreft gebruiksklassen C21, C51, C22 en C52. De gebruiksbelastingen worden bepaald aan de hand van een zogenaamde *crowd loading chain* (groepsbelastingketen). Deze keten bestaat uit drie schakels en beschrijft de belasting die een springende groep mensen uitoefent op een constructie (zie paragraaf 4.2). Paragraaf 4.3 gaat in op de bepaling van de schakel die betrekking heeft op de statische belasting van een groep mensen. Paragraaf 4.4 beschrijft de bepaling van de totale dynamische vergroting ten gevolge van springen en de dynamische responsie van de constructie. De karakteristieke waarde voor de gebruiksbelastingen worden afgeleid in paragraaf 4.5. Ook is het voorstel voor de nieuwe karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen hier te lezen. In paragraaf 4.6 wordt de toepassingsmethode van de gebruiksbelastingen toegelicht.

4.2 Crowd loading chain

De crowd loading chain beschrijft de belasting door een (springende) groep mensen op een constructie. Deze keten, weergegeven in [Figuur 4.1](#), bestaat uit drie schakels. De gebruiksbelasting is het product van de schakels (in het geval van lineair-elastisch gedrag). De drie schakels zijn:

- De statische belasting van de groep, q_{stat}
- De springdynamicafactor, φ_{sprong}
- De constructiedynamicafactor, φ_c



Figuur 4.1: Crowd loading chain (groepsbelastingketen).

In formulevorm wordt de kracht op de constructie gegeven door:

$$q = q_{stat} \varphi_{sprong} \varphi_c \quad (4.1)$$

Statische belasting van de groep

De parameter q_{stat} is de statische belasting die een groep mensen uitoefent op een constructie-element per vierkante meter. Deze parameter wordt bepaald door het aantal mensen in de groep, het oppervlak van het element waar de groep op staat, de verdeling van de personen over het oppervlak en het gewicht van iedere persoon in de groep.

Springdynamicafactor

De parameter φ_{sprong} beschrijft de vergrotingsfactor op de statische belasting q_{stat} die het gevolg is van de groepsactiviteit. Deze vergroting heeft enkel betrekking op de dynamica van de belasting. De vergroting op de statische belasting wordt bepaald door het type activiteit en de groeps grootte. In hoofdstuk 3 is voorgesteld om onderscheid te maken tussen het wel óf niet springen van een groep. De springdynamicafactor φ_{sprong} is daarmee gelijk aan de verhouding van de dynamische belasting van een sprong en de statische belasting. Bijlage E presenteert een overzicht van springdynamica modellen uit de literatuur.

Constructiedynamicafactor

De parameter φ_c is de dynamische vergrotingsfactor van de constructie. Deze parameter wordt bepaald door de dynamische eigenschappen van de constructie (de eigenfrequentie, de demping en de trilvorm) en de dominante frequentie van de groepsactiviteit. Deze dynamische eigenschappen van de constructie zijn afhankelijk van het constructiemateriaal, de massa, de stijfheid en de overspanningslengte van de constructie, de breedte en dikte van de constructie doorsnede en de oplegging van de constructie.

Dynamische amplificatiefactor, DAF

De dynamische amplificatiefactor, DAF , is geen onderdeel van de crowd loading chain. Deze parameter beschrijft de totale dynamische vergroting op de verplaatsing ten gevolge van de springende menigte en is daarmee het product van de springdynamicafactor φ_{sprong} en de constructiedynamicafactor φ_c

$$DAF = \varphi_{sprong} \varphi_c \quad (4.2)$$

Het doel van de groepsbelastingketen is om de totale belasting in kaart te brengen. Er kan voor gekozen worden om, naast q_{stat} , alleen de dynamische amplificatiefactor DAF te bepalen in plaats van de springdynamicafactor φ_{sprong} en de constructiedynamicafactor φ_c . Hier kan voor gekozen worden als er alleen informatie over de totale dynamische vergroting nodig is. De relatieve bijdragen van φ_{sprong} en φ_c worden namelijk niet inzichtelijk gemaakt. Een voorbeeld waarbij de DAF direct bepaald wordt is wanneer trillingsmetingen worden uitgevoerd aan een constructie waar een springende menigte op staat. De trillingen in de constructie zijn een gevolg van de springdynamica én de constructiedynamica. De dynamische amplificatiefactor is eenvoudiger te meten dan de springdynamica- en constructiedynamicafactoren apart.

Gebruiksbelastingbepaling op basis van de dynamische amplificatiefactor

In dit hoofdstuk is de groepsbelastingketen geïntroduceerd om de karakteristieke waarde van de gebruiksbelasting van een groep te bepalen. Deze waarde komt overeen met de belasting die naar verwachting één keer per 50 jaar overschreden wordt. Dit betekent dat het effect van iedere schakel in de keten stochastisch beschreven moet worden. In dit onderzoek worden de schakels springdynamica φ_{sprong} en constructiedynamica φ_c samengenomen in de dynamische amplificatiefactor DAF . Op deze manier kunnen resultaten uit metingen gebruikt worden om een inschatting te maken van de vergrotingsfactor die geschikt is voor het nieuwbouw ontwerp van constructies.

4.3 Statische belasting q_{stat}

De parameter q_{stat} is de statische belasting die een groep personen uitoefent op een constructie-element per vierkante meter. Deze parameter wordt bepaald door het aantal personen in de groep, het oppervlak van het element waar de groep op staat, de verdeling van de personen over het oppervlak en het gewicht van iedere persoon in de groep.

$$q_{stat} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n m_i \cdot g \quad (4.3)$$

waarbij m_i de massa van persoon i is, g ($= 9,81 \text{ m/s}^2$) de valversnelling is, n het aantal personen is en A het oppervlakte van het constructie-element is waar deze personen op staan. Hier wordt uitgegaan van een oppervlak van $A = 10 \text{ m}^2$.

De procedure waarmee q_{stat} bepaald wordt is als volgt:

1. Kies de gebruiksklasse die voor de berekening van toepassing is en lees de groepsdichtheid d af die bij deze gebruiksklasse hoort (zie paragraaf 3.4).
2. Neem een oppervlakte A van een constructie-element aan waarvan de gemiddelde statische belasting bepaald moet worden.³
3. Bereken het aantal mensen dat op dit constructie-element staat (zie paragraaf 4.3.1).
4. Neem voor iedere persoon n , een trekking uit de kansverdeling van de massa m (zie paragraaf 0).
5. Neem de som van alle n de trekkingen uit de kansverdeling van de massa m , en vermenigvuldig dit met de valversnelling g . Dit levert het statische gewicht G_{stat} van alle personen op.
6. Deel het statische gewicht G_{stat} door de oppervlakte van het constructie element A om q_{stat} te verkrijgen: $q_{stat} = G_{stat}/A$.

De wet van grote aantallen stelt dat het gemiddelde van een reeks trekkingen naar de verwachtingswaarde convergeert, voor een toenemend aantal steekproeven. Dit betekent dat, indien de keuze voor het oppervlak A groot genoeg is, de som van alle massa's m_i richting de verwachtingswaarde van de kansverdeling van de massa m gaat. Voor een groot oppervlak kan gemakshalve dus ook uitgegaan worden van de verwachtingswaarde (i.e., 85 kg, zie paragraaf 0).

4.3.1 Aantal personen n

In hoofdstuk 3 is een voorstel voor vier gebruiksklassen gedaan waarbij onderscheid wordt gemaakt op basis van de te hanteren groepsdichtheid. Voor gebruiksklassen C21 en C22 is een groepsdichtheid d van 4 personen per vierkante meter van toepassing en voor C51 en C52 een groepsdichtheid d van 5 personen per vierkante meter.

De groepsdichtheid d staat niet expliciet genoemd in vergelijking 4.3. Het aantal personen n moet afgeleid worden op basis van de van toepassing zijnde gebruiksklasse en het oppervlak A van het constructie-element waarover de statische belasting q_{stat} bepaald moet worden. Het aantal personen n waarmee gerekend moet worden volgt dan uit

³ Een logische keuze voor A is om deze gelijk te nemen aan het oppervlak van het tribune-element waar de metingen op zijn uitgevoerd.

$$n = dA \quad (4.4)$$

De volgende stap is om voor iedere persoon n een trekking uit de kansverdeling van de massa te doen. Dit wordt in paragraaf 4.3.2 verder toegelicht.

4.3.2 Massa m

De massa m van een persoon bepaalt mede de grootte van de statische belasting q_{stat} (zie vergelijking 4.3). Het statische gewicht van alle mensen wordt gevonden voor de som van alle massa's te nemen en dit te vermenigvuldigen met de valversnelling.

De bepaling van een geschikte waarde voor de massa is gebaseerd op de massaverdeling van volwassen mannen. Het Centraal Bureau van de Statistiek voert onderzoek uit naar de massa van volwassen mannen (CBS, 2019). In Tabel 4.1 is de verdeling van de massa van volwassen mannen gespecificeerd.

Tabel 4.1: Massaverdeling van volwassen Nederlandse mannen (data van CBS, 2019).

Massa [kg]	Fractie van voorkomen [%]
minder 53	0,2
53-57	1
58-62	1,8
63-67	4,7
68-72	10,3
73-77	12,4
78-82	16,7
83-87	14,5
88-92	13
93-97	9,4
98-102	5,7
103-107	3,5
meer dan 108	6,7

De gemiddelde massa van een volwassen man is 85 kg. Zo'n 60 procent van de mannen heeft een massa van 85 kg of lager. Dat houdt in dat er ook hoge uitschieters zijn in de verdeling: zo'n 10,2 procent van de volwassen mannen heeft een massa van 103 kg of meer. Voor een klein oppervlakte A is het daarom niet aan te raden om van een gemiddelde massa uit te gaan bij de bepaling van de gebruiksbelasting. Dit kan tot een onderschatting van de statische belasting leiden.

Bij de bepaling van de gebruiksbelasting wordt de empirische distributiefunctie in rekening gebracht. Hiermee wordt een zo realistisch mogelijke inschatting van de extreme waarde van de gebruiksbelasting gemaakt. Omdat de gegevens in Tabel 4.1 een bereik aangegeven is bij de berekening van het volgende uitgegaan: bij de eerste rij is 52 kg aangenomen, bij de

laatste rij 109 kg en bij iedere tussengelegen rij is het gemiddelde van de twee massa's uit [Tabel 4.1](#) aangenomen.

$$m \sim EV(\bar{x})$$

waarbij $EV(\bar{x})$ de cumulatieve distributiefunctie (CDF) van de empirische verdeling van $\bar{x}$ is, met $\bar{x}$ een combinatie van massa's en bijbehorende overschrijdingskansen. De parameters van $\bar{x}$ zijn gespecificeerd in [Tabel 4.2](#).

Tabel 4.2: Parameters $\bar{x}$ van de CDF die de massa beschrijft.

Massa [kg]	Overschrijdingskans [%]
52	100
55	99,8
60	98,8
65	97,0
70	92,3
75	82,0
80	69,6
85	52,9
90	38,4
95	25,4
100	16,0
105	6,8
109	0,1

In deze paragraaf is enkel rekening gehouden met volwassen mannen. In werkelijkheid bezoeken vrouwen en kinderen ook stadions. Indien een nauwkeurigere (en minder conservatieve) inschatting van de massaverdeling over een tribune-element gewenst is, kunnen vrouwen en kinderen meegenomen worden in de berekening. Dit kan dan op eenzelfde manier als voor mannen, met als extra voorwaarde dat bekend moet zijn welk percentage van de bezoekers man, vrouw of kind is. Er moet rekening gehouden worden met de meest extreme situaties, bijvoorbeeld zoals tijdens het Goffert incident, bij het bepalen van de verdeling.

4.4 Dynamische amplificatiefactor *DAF*

De dynamische amplificatiefactor, *DAF* beschrijft de totale dynamische vergroting op de verplaatsing ten gevolge van de springende menigte en is daarmee het product van de springdynamicafactor φ_{spring} en de constructiedynamicafactor φ_c .

In paragraaf 3.4 is voorgesteld om onderscheid te maken in vier gebruiksklassen C21, C22, C51 en C52. De bijbehorende karakteristieke waarde voor de gebruiksbelasting wordt mede bepaald door het onderscheid dat gemaakt wordt in de dynamische activiteit van de toeschouwers: 1) niet springen; en 2) wel springen. In het geval er niet gesprongen wordt volgt

de dynamische vergroting uit bewegingen zoals lopen of het zitten/opstaan. De volgende twee paragrafen behandelen ieder één van deze twee activiteiten.

4.4.1 Niet springen

Wanneer het tijdens het ontwerp van een tribune-element niet de verwachting is dat er gesprongen wordt, valt de belasting lager uit dan wanneer er wel gesprongen wordt. De dynamische amplificatiefactor volgend uit normale bewegingen – zoals lopen – is aanzienlijk lager dan bij springen.

TNO heeft geen literatuur kunnen vinden die gebruikt kan worden om de dynamische amplificatiefactor statistisch te kunnen onderbouwen in het geval er niet gesprongen wordt. Onderzoek van Sentler (1976) specificeert voor een langzaam verplaatsende menigte een vergroting van de belasting met een factor 1,1. Rainier et al. (1988) en Pernica (1990) vinden, afhankelijk van de stapfrequentie, dynamic load factor (DLF, de verhouding van de kracht amplitude van iedere harmonische ten opzichte van het statisch gewicht van een persoon) waarden variërend tussen 0,1 ($f = 1$ Hz) en 0,3 ($f = 2$ Hz) voor de eerste Fourier term, wat ongeveer overeen komt met een vergroting in de belasting variërend van 1,1 tot 1,3.

De praktijk leert dat de huidige gebruiksbelastingen geen directe aanleiding geven om te twifelen aan de constructieve veiligheid van gebouwen indien er geen ritmische activiteiten plaatsvinden. Daarom wordt bij deze subklassen voor een pragmatische aanpak gekozen, waarbij een dynamische amplificatiefactor van 1,2 aangehouden wordt in combinatie met een massa van 85 kg per persoon. Er wordt ervan uitgegaan dat deze factor de karakteristieke waarde is van de dynamische vergroting. Dit heeft als gevolg dat de waarde van de gebruiksbelastingen zoals deze nu in de norm staan, niet veranderen (zie paragraaf 4.5).

4.4.2 Springen

Ritmische activiteiten, zoals dansen en springen, zorgen voor een grotere belasting op een constructie ten opzichte van de statische belasting. Deze vergroting wordt gekwantificeerd door middel van een *DAF*. Tijdens een wedstrijd voeren supporters activiteiten uit die voor (verticale) trillingen in het tribune-element zorgen. De grootte van de verticale verplaatsing hangt af van de activiteit van de supporters en de (dynamische) constructieve eigenschappen van het tribune-element. [Tabel 4.3](#) geeft een overzicht van 33 maximale dynamische amplificatiefactoren bepaald uit metingen door AbtWassenaar (2022a), ABT (2022b; 2022c) en Royal HaskoningDHV (2022c; 2022d). De datapunten zijn de maximale waargenomen waarden tijdens één periode van springen. Tijdens één wedstrijd kunnen meerdere van dit soort events plaatsvinden. Bijlage C geeft informatie over de uitgevoerde metingen.

Tabel 4.3: Waargenomen dynamische amplificatiefactoren bij 8 voetbalwedstrijden. De dikgedrukte onderstreepte waarden zijn de wedstrijdextremen.

Referentie	Wedstrijd	Tijdstip [hh:mm]	DAF [-]
AbtWassenaar (2022a)	FC Groningen – NEC	18:50	1,6
		18:55	1,8
		19:05	2,0
		19:05	1,7
		<u>19:10</u>	<u>2,3</u>
		20:50	2,1
AbtWassenaar (2022a)	FC Groningen – Ajax	16:30	2,5
		16:33	2,5
		16:35	2,4
		<u>16:50</u>	<u>2,6</u>
		17:00	2,2
		17:05	2,3
ABT (2022b)	AZ – SC Heerenveen	18:35	1,6
		16:05	1,4
		<u>16:10</u>	<u>1,8</u>
		<u>14:40</u>	<u>2,5</u>
		15:00	1,5
		15:05	2,1
ABT (2022c)	SC Heerenveen – Go Ahead Eagles	15:15	2,5
		15:55	2,3
		16:05	2,1
		16:25	1,4
		21:18	2,0
		<u>21:46</u>	<u>2,1</u>
RHDHV (2022c)	Ajax – SC Heerenveen	20:06	1,9
		<u>21:18</u>	<u>2,3</u>
		21:46	2,2
		20:06	1,8
		21:18	1,9
		<u>21:46</u>	<u>2,5</u>
RHDHV (2022c)	Ajax – SC Heerenveen	20:06	1,4
		<u>21:00</u>	<u>2,3</u>
		22:38	2,3

Aandachtspunten gemeten *DAF* waarden

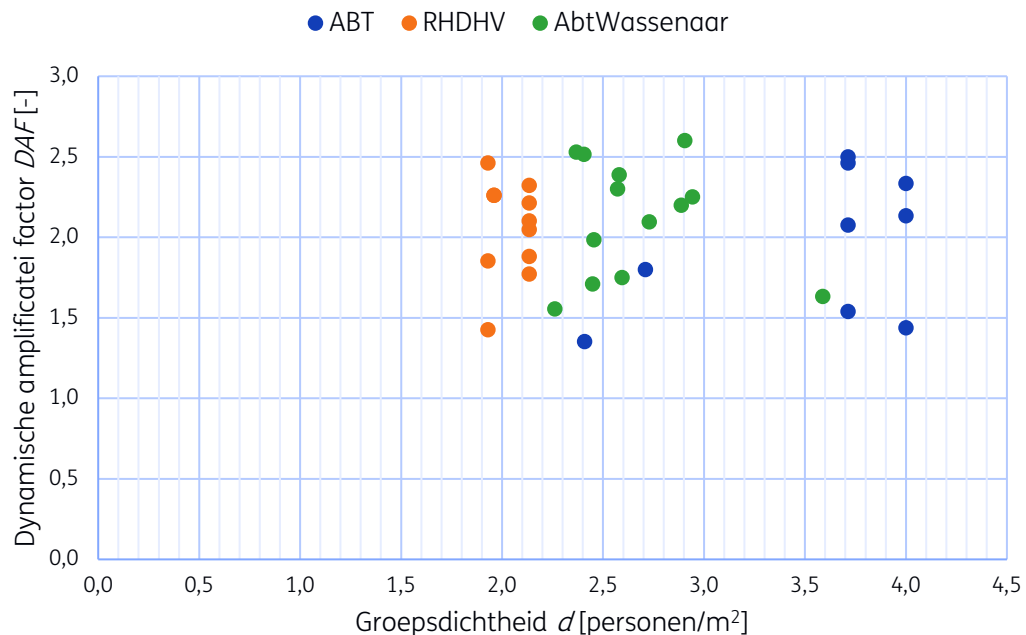
De *DAF* waarden in Tabel 4.3 zijn bepaald op basis van metingen door AbtWassenaar, ABT en RHDHV. In deze metingen zijn verschillende meetopzetten gebruikt en zijn de *DAF* waarden op verschillende manier bepaald, zie bijlage C en de meetrapportages van AbtWassenaar, ABT en RHDHV. Door de verschillende opzetten en analyses worden onzekerheden geïntroduceerd die een invloed hebben op de afgeleide gebruiksbelasting. Op basis van de beschikbare informatie is het niet mogelijk de grootte van deze onzekerheden goed te bepalen. Figuur 4.2 laat zien dat de *DAF* waarden verkregen uit de onderzoeken in hetzelfde bereik liggen. Binnen dit onderzoek zijn alle *DAF* waarden meegenomen bij de bepaling van de gebruiksbelasting.

De *DAF* waarden in Tabel 4.3 omvatten zowel de dynamische effecten van de belasting (φ_{spring}) als die van de respons van de constructie (φ_c). Als uitgangspunt voor afleiding van de gebruiksbelastingen met deze *DAF* waarden is het wenselijk dat de eigenfrequentie van de onderzochte tribune elementen groter is dan 8,4 Hz. In dat geval is het aandeel van de constructiedynamica aan de *DAF* beperkt, en wordt goed aangesloten bij de eigenfrequentie voorwaarde (groter dan 8,4 Hz, zie paragraaf 5.2) voor het gebruik van de gelijkwaardige statische belastingen. Indien bepaalde onderzochte tribune elementen een eigenfrequentie hebben die kleiner is dan 8,4 Hz, dan resulteert het gebruik van de *DAF* waarden uit deze metingen in een overschatting van de gebruiksbelasting, en is daarmee dus een conservatieve inschatting.

Bij de metingen die zijn uitgevoerd door RHDHV is de eigenfrequentie van de constructie vastgesteld. Deze is in alle gevallen groter dan 8 Hz, waarmee de *DAF* waarde voornamelijk wordt bepaald door het springen (φ_{spring}) en het aandeel van de constructie (φ_c) beperkt is. Voor de tribunes waar metingen zijn uitgevoerd door AbtWassenaar en ABT zijn geen eigenfrequenties van de tribune elementen bepaald. Het is voor deze tribunes dus mogelijk dat de eigenfrequenties lager zijn dan 8 Hz.

Hoewel de *DAF* waarden bepaald door AbtWassenaar en ABT mogelijk in een overschatting resulteren van de gebruiksbelasting, is vanwege de beperkte hoeveelheid beschikbare *DAF* waarden uit de metingen ervoor gekozen om deze waarden toch te gebruiken.

Indien metingen worden uitgevoerd om meer *DAF* waarden te bepalen, dan wordt aanbevolen de metingen en analyse op uniforme wijze uit te voeren en de eigenfrequentie van de tribune te bepalen door middel van een hielvalproef op een lege tribune.



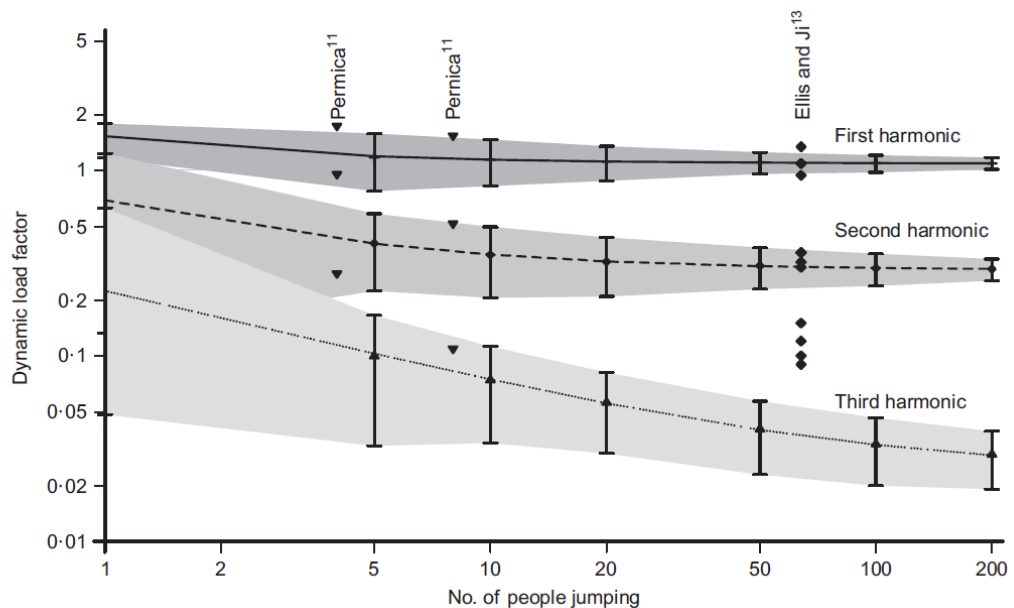
Figuur 4.2: De dynamische amplificatiefactor uitgezet tegen de groepsdichtheid.

Correlatie DAF en groepsgrootte

De groepsgrootte is van invloed op de mate van coördinatie tussen personen, en heeft daarmee een invloed op de grootte van de DAF. Grote groepen bewegen minder gecoördineerd ten opzichte van een individu (Ellis & Ji, 2004; Parkhouse & Ewins, 2004), wat tot een lagere *DAF* waarde leidt.

De *DAF* waarden in dit onderzoek zijn bepaald op basis van metingen aan tribune-elementen. De gebruiksbelasting afgeleid met deze *DAF* waarden behoeft dus geen correctie voor groepsgrootte.

Een tribunevak bestaat uit meerdere tribune-elementen. *DAF* waarden voor een tribunevak zullen daarmee waarschijnlijk lager zijn dan de *DAF* waarden voor een tribune-element. Aangezien er geen data beschikbaar zijn van *DAF* waarden van een tribunevak, kan in dit onderzoek geen expliciete waarde voor de gebruiksbelasting voor een tribunevak worden afgeleid. Uit het onderzoek van Parkhouse & Ewins (2004) blijkt echter wel dat voor groepen groter dan 50 personen de afname in dynamische vergroting beperkt is. [Figuur 4.3](#) laat de dynamic load factor (DLF) waarden van de eerste 3 harmonischen zien van een groep mensen die springt op 2 Hz. Er is alleen in de 3^e harmonische een beperkte afname waarneembaar in de DLF voor groepen groter dan 50 personen.



Figuur 4.3: Afname in dynamic load factor (DLF) voor de eerste 3 harmonische met toename in aantal personen voor groepen mensen die springen op een frequentie van 2 Hz. Overgenomen uit Parkhouse & Ewins (2004).

Correlatie DAF en groepsdichtheid

Bij grote groepsdichtheden wordt springen lastiger, doordat de ruimte om te kunnen springen ontbreekt. De groepsdichtheid heeft daarmee dus een reducerende invloed op de *DAF* waarde. Figuur 4.2 geeft de *DAF* waarden uitgezet tegen de groepsdichtheid bepaald in de onderzoeken door AbtWassenaar, ABT en RHDHV. Deze data laten geen correlatie zien tussen de *DAF* en de groepsdichtheid. Op basis hiervan is besloten om geen rekening te houden met correlatie tussen groepsdichtheid en *DAF*.

Hierbij wordt opgemerkt dat de groepsdichtheden in-situ gemeten waarden betreffen die niet expliciet zijn bedoeld om deze relatie te onderzoeken. Daarnaast zijn er geen groepsdichtheden van meer dan 4 personen per vierkante meter waargenomen in de onderzoeken van AbtWassenaar, ABT en RHDHV. Aanbevolen wordt om deze relatie grondiger te onderzoeken door middel van testen met groepen mensen op een tribune-element van verschillende type tribunes (zie paragraaf 3.2), waarbij wordt gesprongen bij verschillende groepsdichtheden.

Extreme waarde verdeling van één event

Bij de datapunten is een passende extreme waarde verdeling gezocht die het maximum van één event beschrijft. Een extreme waarde verdeling is een kansverdeling die gebruikt wordt om extreme (zeer grote of kleine) waarden te modelleren, gegeven een referentieperiode. De data wordt het beste beschreven als Weibull-verdeeld. De CDF van een Weibull-verdeelde stochast is

$$F(x; k, \lambda, loc) = 1 - e^{-((x - loc)/\lambda)^k} \quad (4.5)$$

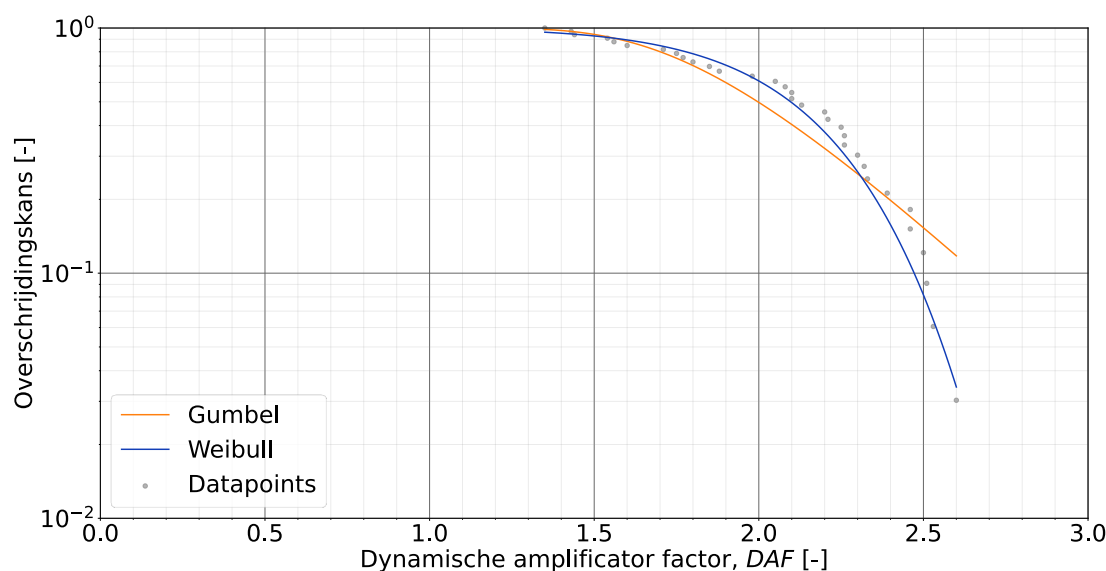
waarbij k de vormparameter is, λ de schaalparameter is en loc de horizontale verschuiving van de CDF is. De Weibull-parameters zijn bepaald met behulp van de Python package *SciPy* (versie 1.14.1), deze zijn terug te lezen in [Tabel 4.4](#).

Geen onafhankelijke datapunten

De extreme-waardetheorie gaat ervanuit dat de data onafhankelijk en identiek verdeeld zijn. Aan deze voorwaarden wordt in deze studie mogelijk niet voldaan bij de bepaling van de extreme waarde verdeling. Er worden *DAF* waarden van meerdere events met springende toeschouwers uit één wedstrijd meegenomen, terwijl het niet duidelijk is of deze events onafhankelijk van elkaar zijn. Dit leidt tot een mogelijke vertekening in de parameterinschatting. Een beter alternatief is door alleen naar de maximale waarde van een wedstrijd te kijken. Parameterbepaling op enkel de wedstrijd-maxima leidt tot minder (8) punten om een verdeling op te fitten. Daarom is er voor gekozen om de extreme waarde verdeling te bepalen aan de hand van alle datapunten. Het verdient de aanbeveling om meer datapunten van wedstrijdmaxima te verzamelen en op basis daarvan de *DAF* te bepalen. Hiermee kunnen de parameters van de verdeling stochastisch beschreven worden. Deze zijn in dit rapport deterministisch aangenomen. Voor het verkrijgen van meer *DAF* waarden beveelt TNO aan het dynamisch gedrag van tribune-elementen te monitoren op dezelfde tribunes waar groepsdichtheden worden bepaald. Op deze manier kan naast de *DAF* waarden ook informatie worden verkregen over de correlatie tussen groepsdichtheid en *DAF* waarden van tribune-elementen.

Tabel 4.4: Gefitte Weibull parameters van de dynamische amplificatiefactor voor één event, *DAF*.

Parameter	Waarde
k	10,93
λ	3,34
loc	-1,14



Figuur 4.4: Gefitte Weibull- en Gumbel verdeling op de data van de dynamische amplificatiefactor *DAF*.

Verschuiving naar het 50-jaars maximum

De standaard ontwerplevensduur van constructie(elementen) volgens NEN-EN 1991-1-1 is 50 jaar. Een eigenschap van een extreme waarde verdeling is dat de parameters behorend

bij een referentieperiode bepaald kunnen worden met behulp van de parameters van een andere referentieperiode.

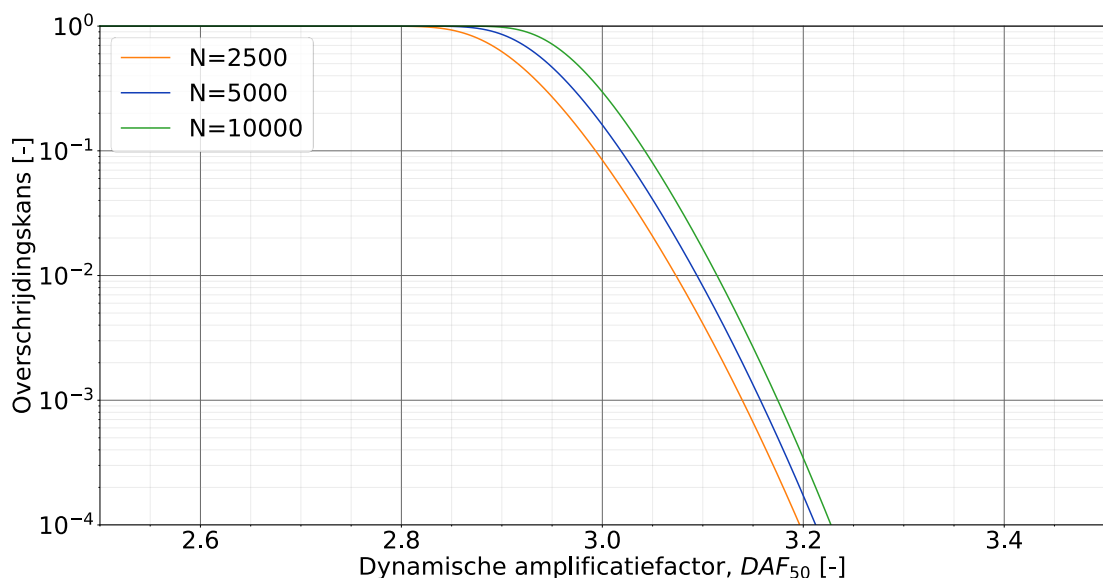
De extreme-waarde verdeling van één event wordt daarom vertaald naar de verdelingsfunctie die het 50-jaars maximum van de *DAF* beschrijft. Daarvoor is het van belang om het verwachte aantal onafhankelijk events te bepalen. Deze wordt ingeschat op $4 \cdot 25 \cdot 50 = 5.000$:

- De verdelingsfunctie is bepaald aan de hand van 33 datapunten over 8 wedstrijden. Dat komt neer op circa 4 events per wedstrijd.
- In Bijlage D is geanalyseerd hoe veel evenementen er verwacht worden in een stadion per jaar. Daaruit volgt dat 25 evenementen per jaar in een stadion een redelijke inschatting is.
- De referentieperiode is 50 jaar.

De CDF van een geschaalde Weibull-verdeelde stochast is

$$F(x; k, \lambda, loc, N) = \left(1 - e^{-\left(\frac{x - loc}{\lambda}\right)^k}\right)^N \quad (4.6)$$

waarbij N het aantal onafhankelijke evenementen is. De functie is niet erg gevoelig voor de keuze van N . In Figuur 4.5 is, naast de ingeschatte waarde van $N = 5.000$, ook weergegeven wat een over- of onderschatting met een factor 2 betekent voor het verloop van de verdeling. Uit de figuur blijkt dat het verschil tussen $N = 2.500$ of $N = 10.000$ ten opzichte van $N = 5.000$ tot een verschil van minder dan $\pm 1\%$ op de *DAF* leidt voor kleine ($< 10^{-3}$) kansen. In de figuur is het subscript 50 toegevoegd aan de *DAF* om aan te geven dat het de 50-jaars maximale waarde voor de dynamische amplificatiefactor betreft.



Figuur 4.5: Overschrijdingskans van de 50-jaars maximale waarde van de dynamische amplificatiefactor DAF_{50} .

De dynamische amplificatiefactor is in werkelijkheid fysisch begrensd. De tijd die een persoon nodig heeft om te landen wordt enkel beïnvloed door de zwaartekracht. Dit heeft tot gevolg dat er een maximale spronghoogte bij een bepaalde sprongfrequentie hoort. Uit

het sprongbelastingsmodel van Ji & Ellis (1994) kan een DAF van 4,8 volgen voor een individu (zie Bijlage E). De DAF waarden in [Figuur 4.5](#) voor de van toepassing zijnde overschrijdingskansen (10^{-3} – 10^{-4}) liggen ruim onder deze waarde. Op basis hiervan is er bij de bepaling van de karakteristieke waarde van de gebruiksbelasting geen rekening gehouden met een fysische begrenzing van de dynamische amplificatiefactor.

4.5 Afleiding karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen

In paragraaf 4.5 worden de gebruiksbelastingen afgeleid. Deze hangen – naast de gedefinieerde gebruiksklassen – ook af van de consequentieklaas en de referentieperiode. De gehanteerde referentieperiode is 50 jaar. Tribune(-elementen) vallen onder gevolgklasse CC2 of CC3 (zie Bijlage A). De bijbehorende aan te houden betrouwbaarheidsindices bij deze referentieperiode zijn $\beta = 3,8$ (CC2) of $\beta = 4,3$ (CC3). De rekenwaarde voor de gebruiksbelasting, q_d , kan worden bepaald middels

$$P(q > q_d) = \Phi(\alpha\beta) \quad (4.7)$$

waarbij $P(q > q_d)$ de kans is dat de gebruiksbelasting q groter is dan de rekenwaarde voor de gebruiksbelasting q_d , $\Phi(\cdot)$ de CDF van een standaard normale verdeling is, α een invloedsfactor is en β de betrouwbaarheidsindex is. De invloedsfactor α verschaft inzicht in de invloed van een variabele op variabiliteit van de betrouwbaarheid. EN 1990 Bijlage C (2019) geeft standaardwaarden voor de invloedsfactoren. In het geval van een springende menigte op een tribune-element is er sprake van een dominante belastingparameter. Hiervoor geldt dat $\alpha_s = -0,7$. De bijbehorende overschrijdingskansen zijn gelijk aan $P(q > q_d) = 3,9 \cdot 10^{-3}$ (CC2) en $P(q > q_d) = 1,3 \cdot 10^{-3}$ (CC3). Met behulp van de overschrijdingskansen en de verdeling van q is het mogelijk om q_d te bepalen.

4.5.1 Overzicht belastingparameters

In tabellen 4.5 tot en met 4.8 zijn de belastingparameters gekwantificeerd voor de gebruiksklassen C21, C22, C51 en C52.

C21

C21 is de gebruiksklasse waarbij geen maximale groepsdichtheid en geen springende groep mensen verwacht wordt. [Tabel 4.5](#) geeft de parameters voor de bepaling van de gebruiksbelasting voor gebruiksklasse C21.

Tabel 4.5: Gebruiksklasse C21: kwantificering van de parameters.

Parameter	Verdelingsfunctie	Gemiddelde waarde, μ	Standaardafwijking, σ
d [p/m ²]	Deterministisch	4	-
m [kg]	Deterministisch	85	-
g [m/s ²]	Deterministisch	9,81	-
DAF_{50} [-]	Deterministisch	1,2	-

C22

C22 is de gebruiksklasse waarbij geen maximale groepsdichtheid, maar wel een springende groep mensen verwacht wordt. [Tabel 4.6](#) geeft de parameters voor de bepaling van de gebruiksbelasting voor gebruiksklasse C21.

Tabel 4.6: Gebruiksklasse C22: kwantificering van de parameters.

Parameter	Verdelingsfunctie	Gemiddelde waarde, μ	Standaardafwijking, σ
d [p/m ²]	Deterministisch	4	-
m [kg]	Empirisch ¹	-	-
g [m/s ²]	Deterministisch	9,81	-
DAF_{50} [-]	Weibull ²	2,94	0,35

¹ zie Tabel 4.2 voor de parameters van m .

² In de berekening is gebruik gemaakt van de Python package *SciPy* (versie 1.14.1). Deze package beschrijft een Weibull-verdeelde parameter met 3 parameters. De parameters zijn gespecificeerd in Tabel 4.4.

C51

C51 is de gebruiksklasse waarbij geen springende groep mensen, maar wel een maximale groepsdichtheid verwacht wordt. [Tabel 4.7](#) geeft de parameters voor de bepaling van de gebruiksbelasting voor gebruiksklasse C21.

Tabel 4.7: Gebruiksklasse C51: kwantificering van de parameters.

Parameter	Verdelingsfunctie	Gemiddelde waarde, μ	Standaardafwijking, σ
d [p/m ²]	Deterministisch	5	-
m [kg]	Deterministisch	85	-
g [m/s ²]	Deterministisch	9,81	-
DAF_{50} [-]	Deterministisch	1,2	-

C52

C52 is de gebruiksklasse waarbij een maximale groepsdichtheid in combinatie met een springende groep mensen verwacht wordt. [Tabel 4.8](#) geeft de parameters voor de bepaling van de gebruiksbelasting voor gebruiksklasse C21.

Tabel 4.8: Gebruiksklasse C52: kwantificering van de parameters.

Parameter	Verdelingsfunctie	Gemiddelde waarde, μ	Standaardafwijking, σ
d [p/m ²]	Deterministisch	5	-
m [kg]	Empirisch ¹	-	-
g [m/s ²]	Deterministisch	9,81	-
DAF_{50} [-]	Weibull ²	2,94	0,35

¹ zie Tabel 4.2 voor de parameters van m .

² In de berekening is gebruik gemaakt van de Python package *SciPy* (versie 1.14.1). Deze package beschrijft een Weibull-verdeelde parameter met 3 parameters. De parameters zijn gespecificeerd in Tabel 4.4.

Karakteristieke waarde voor de gebruiksbelasting

Bij C21 en C51 wordt aangenomen dat de uitkomsten van de berekening gelijk zijn aan het nieuwe voorstel voor de karakteristieke waarde van de gebruiksbelasting.

Bij gebruiksklassen C22 en C52 is de CDF van de gebruiksbelasting bepaald door middel van een Monte Carlo simulatie. Op basis van de overschrijdingskansen die gelden voor CC2 en CC3 is de rekenwaarde van de belasting afgeleid. De relatie tussen een rekenwaarde en een karakteristieke waarde van de belasting is

$$q_d = \gamma_F \cdot q_k \quad (4.8)$$

waarbij q_d de rekenwaarde van de belasting is, γ_F de partiële factor voor de ongunstige variabele belasting is en q_k de karakteristieke waarde van de belasting is. De karakteristieke waarde van de belasting wordt gebruikelijk vastgesteld op statistische gronden, door een eis te stellen aan de overschrijdingskans gedurende een referentieperiode. De partiële factor voor de belasting is daarmee gedefinieerd als de verhouding tussen de rekenwaarde en de karakteristieke waarde van de belasting.

In dit rapport is afgeweken van de formele definitie van de karakteristieke waarde. Om ontwerpberekeningen eenvoudiger te maken is er voor gekozen om geen eigen partiële factor voor sprongbelastingen te definiëren. In plaats daarvan wordt de waarde van de partiële belastingfactor voor ongunstige variabele belastingen aangehouden. Deze hangt af van de gevolgklasse van het te beschouwen constructie-element en is terug te vinden in de nationale bijlage van NEN-EN 1990 (2019). De karakteristieke waarde kan vervolgens worden afgeleid door vergelijking 4.8 te herschrijven.

$$q_k = \frac{q_d}{\gamma_F} \quad (4.9)$$

Voor constructies met gevolgklasse CC2 is de partiële factor voor de ongunstige variabele belasting gelijk aan $\gamma_F = 1,5$; voor constructies met gevolgklasse CC3 is dit $\gamma_F = 1,65$.

4.5.2 Karakteristieke waarde voor de gebruiksbelastingen

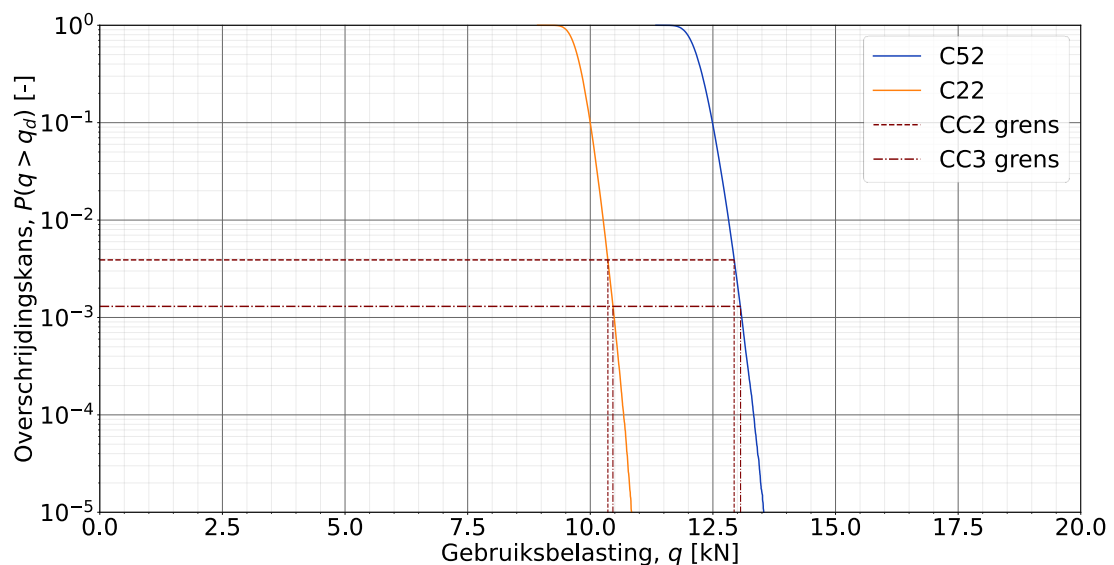
Tabel 4.9 geeft een overzicht van de nieuwe karakteristieke waarde voor de gebruiksbelastingen q_k . Deze zijn afgeleid op basis van de voorgaande analyses. De gebruiksbelastingen zijn voor gebruiksklasse C21 en C51 gelijk gehouden aan de belastingswaarden die worden voorgeschreven voor gebruiksklasse C2 en C5 in NEN-EN 1991-1-1 (2019). De gebruiksbelastingen voor C22 en C52 zijn bepaald door middel van een Monte Carlo simulatie met parameters zoals beschreven in **Tabel 4.6** (C22) en **Tabel 4.8** (C52). De uitkomst van deze simulatie is de verdelingsfunctie voor gebruiksbelastingen, zie Figuur 4.6.5. Op basis van de overschrijdingskansen die gelden voor CC2 en CC3 is de rekenwaarde van de belasting afgeleid. De bijbehorende karakteristieke waarde is vervolgens bepaald door het delen van de rekenwaarde door de van toepassing zijnde partiële veiligheidsfactor voor CC2. Deze zijn gespecificeerd in **Tabel 4.10**.

Tabel 4.9: Voorstel voor de karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen q_k voor subklassen C21, C22, C51 en C52.

Gebruiksklasse	q_k [kN/m ²]
C21	4,0
C22	7,0
C51	5,0
C52	8,5

Tabel 4.10: Bepaling van de karakteristieke waarde van de gebruiksbelasting q_k .

Gebruiksklasse [-]	d [p/m ²]	Consequentieklasse [-]	q_d [kN/m ²]	γ_F [-]	q_k [kN/m ²]
C22	4	CC2	10,4	1,5	6,9
C22	4	CC3	10,5	1,65	6,3
C52	5	CC2	12,9	1,5	8,6
C52	5	CC3	13,1	1,65	7,9

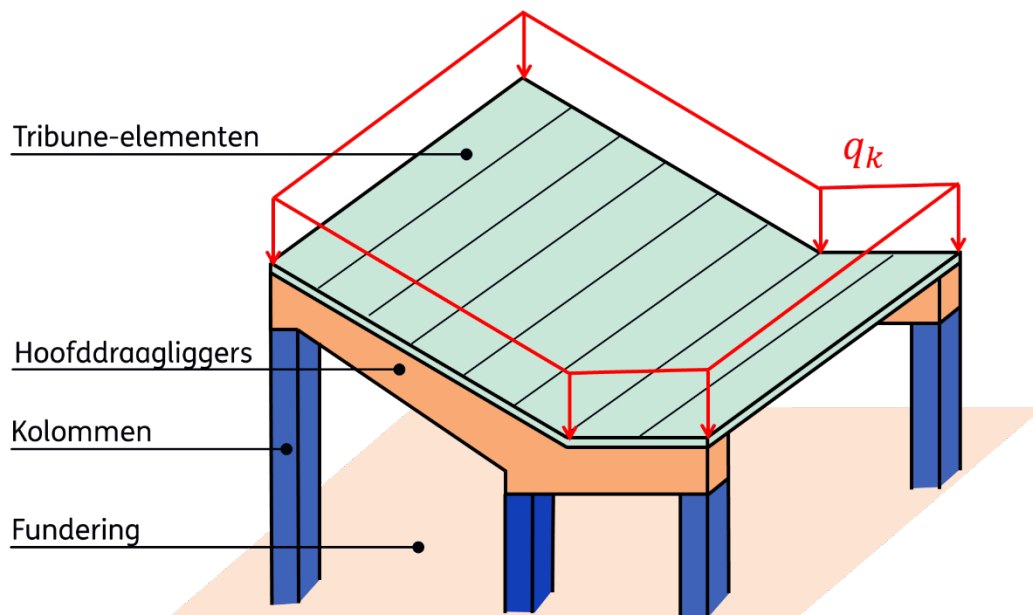
**Figuur 4.6:** Rekenwaarde gebruiksbelasting q_d als functie van de overschrijdingskans.

4.6 Toepassing gebruiksbelastingen

In paragraaf 4.5 zijn nieuwe karakteristieke waarden voor de gebruiksbelasting voorgesteld. Deze belasting kan significant hoger uitpakken dan waar momenteel mee gerekend moet worden volgens NEN-EN 1991-1-1. De verhoging is hoofdzakelijk het gevolg van het in rekening brengen van dynamische effecten die het gevolg zijn van het springen door een menigte. In deze paragraaf wordt toegelicht op welke wijze deze gebruiksbelasting toegepast moet worden.

4.6.1 Huidige methode

In NEN-EN 1991-1-1 wordt het hele oppervlak van een tribune-element belast met een belasting q_k , zie Figuur 4.6. Afhankelijk van de van toepassing zijnde gebruiksklasse is q_k gelijk aan 4 kN/m² (C2) of 5 kN/m² (C5). Met deze belasting worden alle onderdelen doorgerekend.



Figuur 4.6: Toepassingsmethode van q_k in NEN-EN 1991-1-1 (2019).

De tribune in Figuur 4.6 bestaat uit tribune-elementen, hoofddraagliggers, kolommen en een fundering. De tribune-elementen samen worden het tribunevak genoemd. Deze tribune is indicatief en niet representatief voor alle tribunes: het is mogelijk dat een andere tribune andere elementen bevat. Deze onderdelen moeten volgens dezelfde gedachtegang berekend worden zoals in dit rapport geschetst.

4.6.2 Nieuwe methode

Door het in rekening brengen van de dynamische effecten kunnen de nieuwe gebruiksbelastingen significant hoger uitpakken ten opzichte van de huidige waarden in NEN-EN 1991-1-1. Het is niet realistisch om ieder onderdeel van de tribune met deze belasting door te rekenen. Er is bijvoorbeeld uitgegaan van een maximale groepsdichtheid van 5 personen per vierkante meter. Lokaal kan deze groepsdichtheid weliswaar bereikt worden, maar dit zal niet op ieder tribune-element tegelijk voorkomen. De maximale capaciteit van een tribunevak ligt lager.

Bovendien is de meetdata die gebruikt is voor de bepaling van de dynamische amplificatiefactor, DAF_{50} , gebaseerd op metingen aan een element (zie paragraaf 4.4). Het toepassen van deze amplificatiefactor impliceert dat de DAF voor een tribunevak gelijk is aan de DAF van een tribune-element. Onderzoek laat zien dat, voor een toenemend aantal mensen, de onderlinge coördinatie afneemt (zie Bijlage E). Dit resulteert in een afname van de gebruiksbelasting. Dit effect wordt verdisconteerd in de wijze waarop de nieuwe gebruiksbelastingen toegepast dienen te worden. Er wordt onderscheid gemaakt tussen twee situaties:

1. Een situatie waarbij de toeschouwers homogeen verdeeld zijn over het tribune-element;
2. Een situatie waarbij een deel van de toeschouwers in de maximale optredende groepsdichtheid samenkomt.

Beide belastinggevallen moeten worden doorgerekend.

4.6.2.1 Homogene verdeling van toeschouwers

De situatie waarbij wordt uitgegaan dat de toeschouwers homogeen verdeeld over het tribune-element staan komt overeen met het uitgangspunt dat gehanteerd is in NEN 1991-1-1.

De grootte van de karakteristieke waarde van de gebruiksbelasting bij een homogene verdeling van de toeschouwers op de tribune, $q_{k,h}$, hangt af van de maximale groepsdichtheid over het gehele tribunevak tijdens de ontwerplevensduur. Als uitgangspunt wordt aangenomen dat voor C21 en C22 een maximale groepsdichtheid over het tribunevak geldt van 2,5 persoon per vierkante meter; voor C51 en C52 is dit 3,5 persoon per vierkante meter. Deze groepsdichtheden zijn bepaald op basis van de capaciteit voor deze tribune gebruiksklassen in de praktijk gehanteerd wordt (zie paragraaf 3.2). Deze capaciteit dient gehandhaafd te worden door de eigenaar over de levensduur van de tribune.

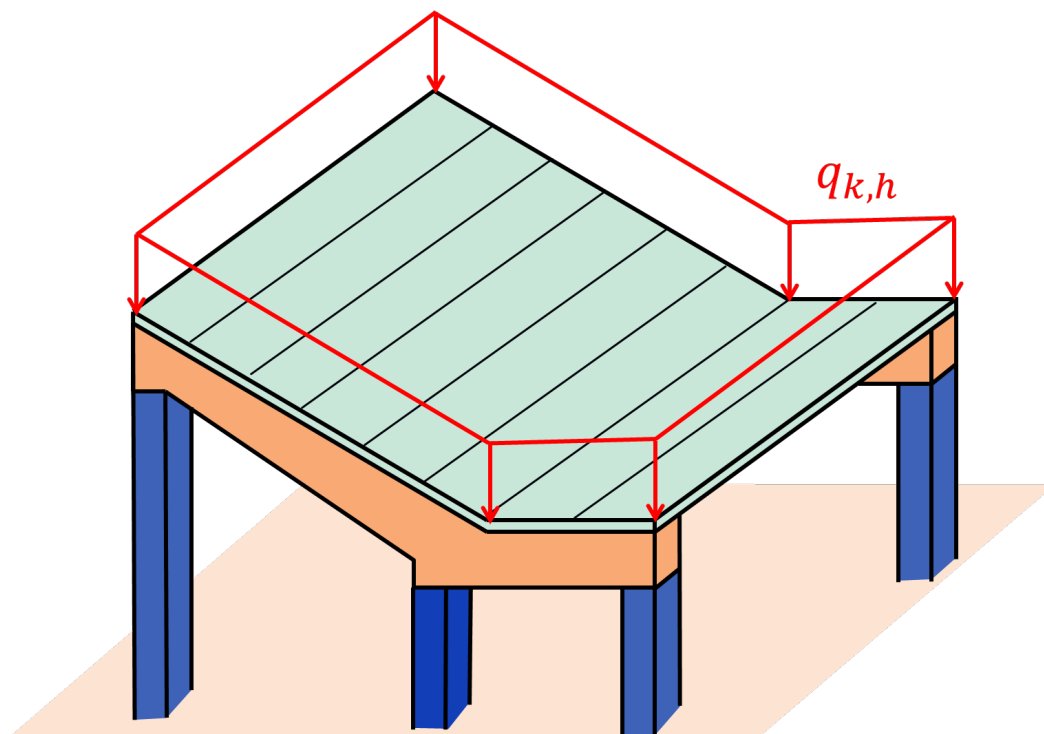
De maximale groepsdichtheden die lokaal kunnen optreden zijn 4 personen per vierkante meter voor C21 en C22 en 5 personen per vierkante meter voor C51 en C52. De karakteristieke waarde van de gebruiksbelasting op de tribune $q_{k,h}$ is bepaald volgens

$$q_{k,h} = \frac{d_{vak}}{d_{max}} \cdot q_k \quad (4.10)$$

waarbij d_{vak} de maximale groepsdichtheid van een tribunevak is en d_{max} de lokale maximale groepsdichtheid is. Dit leidt tot de belastingen zoals gespecificeerd in Tabel 4.11. Merk hierbij op dat voor C22 en C52 de *DAF* niet vertaald is van tribune-element niveau naar tribunevak niveau. Hiermee wordt de belasting $q_{k,h}$ overschat.

Tabel 4.11 laat zien dat de gebruiksbelastingen gereduceerd kunnen worden in het geval dat gebruiksklassen C21, C22 en C51 van toepassing zijn. Voorgesteld wordt om vast te blijven houden aan de huidige gebruiksbelastingen van 4 en 5 kN/m², om aan te blijven sluiten bij NEN 1991-1-1. Voor gebruiksklassen C52 wordt geadviseerd om te rekenen met 6,0 kN/m².

Om tot een nauwkeuriger en waarschijnlijk minder conservatieve inschatting van de belasting $q_{k,h}$ te komen wordt aanbevolen het dynamisch gedrag van hoofd dragers en/of kolommen van de tribunes te monitoren. Door deze monitoring te combineren met de groepsdichtheid monitoring voorgesteld in paragraaf 3.2 en de monitoring van dynamisch gedrag van tribune-elementen in paragraaf 4.4.2 kan ook de correlatie met deze parameters worden bepaald.



Figuur 4.7: Homogene verdeling toeschouwers en de bijbehorende gebruiksbelasting $q_{k,h}$.

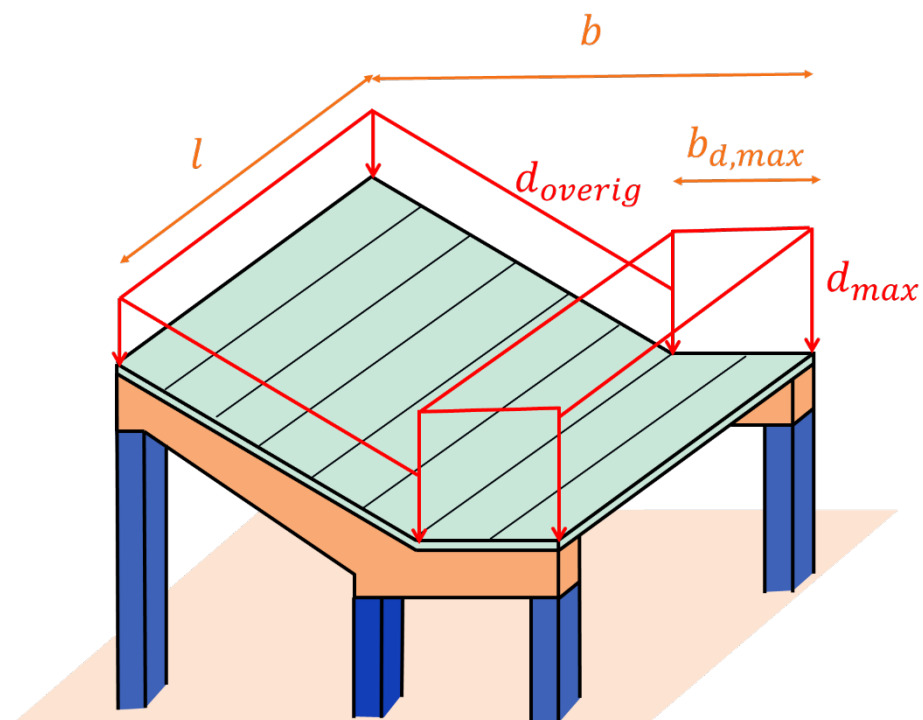
Tabel 4.11: Voorstel karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen op een tribune $q_{k,h}$ bij een homogene verdeling van de toeschouwers.

	C21	C51	C22	C52
Gebruiksbelasting q_k (kN/m ²)	4,0	5,0	7,0	8,5
Groepsdichtheid d_{max} (p/m ²)	4,0	5,0	4,0	5,0
Groepsdichtheid d_{vak} (p/m ²)	2,5	3,5	2,5	3,5
Berekende gebruiksbelasting $q_{k,h}$ (kN/m ²)	2,5	3,5	4,4	6,0
Voorstel gebruiksbelasting $q_{k,h}$ (kN/m ²)	4,0	5,0	5,0	6,0

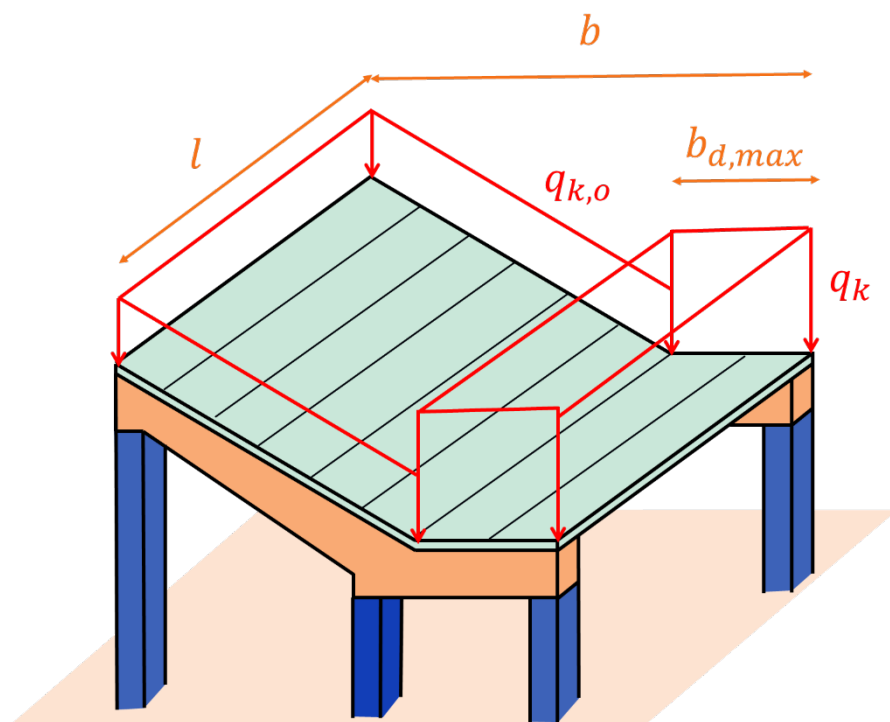
4.6.2.2 Lokale maximale groepsdichtheid van toeschouwers

De situatie waarbij wordt uitgegaan dat de toeschouwers lokaal met een grotere dichtheid op het tribune-element staan is nieuw ten opzichte van het uitgangspunt in NEN 1991-1-1. In Figuur 4.8 is dezelfde tribune weergegeven als in Figuur 4.6. Merk hierbij op dat, in tegenstelling tot Figuur 4.6, de groepsdichtheid d weergegeven is (in plaats van de gebruiksbelasting q_k).

De figuur maakt duidelijk dat er met twee verschillende groepsdichtheden rekening gehouden moet worden: een maximale groepsdichtheid d_{max} en een resterende groepsdichtheid d_{overig} . De maximale groepsdichtheid werkt over de gehele invloedslengte l van een tribune-element en heeft een breedte van $b_{d,max}$. Op het resterende deel van het tribune-element geldt dat de overige groepsdichtheid van toepassing is.



Figuur 4.8: Verdeling toeschouwers indien er een lokale maximale groepsdichtheid d_{max} kan optreden. Merk op dat het blok met de maximale belasting op iedere locatie kan staan. Het blok met de zware belasting kan op iedere locatie van de tribune staan. Afhankelijk van het te toetsen onderdeel moet de locatie gekozen worden, zodanig dat deze resulteert in het meest ongunstige belastinggeval.



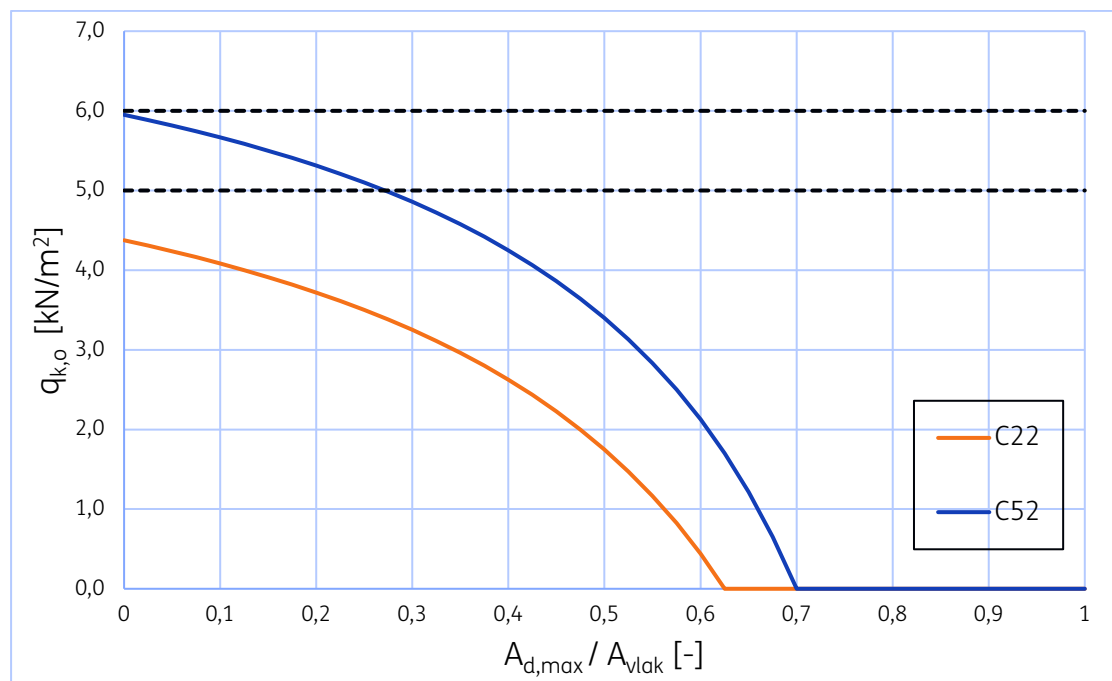
Figuur 4.9: Verdeling toeschouwers en de bijbehorende maximale en overige belastingen q_k en $q_{k,o}$.

De verschillende groepsdichtheden resulteren in verschillende gebruiksbelastingen, zie **Figuur 4.9**. Vergelijkbaar met vergelijking 4.10 kan de gebruiksbelasting op de overige delen, $q_{k,o}$, worden bepaald volgens

$$q_{k,o} = \frac{d_{overig}}{d_{max}} \cdot q_k \quad (4.11)$$

Op basis van vergelijking 4.11 kan de grootte van $q_{k,o}$ berekend worden als functie van het oppervlak dat met een maximale groepsdichtheid belast wordt ten opzichte van het totale oppervlak van de tribune: $A_{d,max}/A_{vlak}$; dit is weergegeven in **Figuur 4.10**. Vanaf een bepaalde verhouding $A_{d,max}/A_{vlak}$ is de belasting op de overige delen gelijk is aan 0. Dit komt doordat er een absoluut aantal mensen te verdelen is (2,5 personen per vierkante meter voor C22; 3,5 personen per vierkante meter voor C52). Bij gebruiksklasse C22 wordt dit punt bereikt voor een verhouding tussen $A_{d,max}/A_{vlak}$ van 0,625, voor C52 ligt deze verhouding op 0,70. Dit is een bovengrens voor de aan te houden breedte. Omdat het met de huidige informatie niet mogelijk is om onderbouwd tot een minder conservatieve inschatting van $b_{d,max}$ te komen, stellen wij voor om $b_{d,max}$ gelijk te nemen aan deze, gebruiksklasse afhankelijke, waarde.

Op basis van de beelden van de instorting van het tribune-element in het Goffert stadion in Nijmegen blijkt dat er met hoge dichtheid gesprongen werd op de eerste zes rijen. Het komt echter ook voor dat er over veel meer rijen gesprongen wordt. Uit videobeelden van de wedstrijd Ajax-Besiktas⁴ op 28-09-2012 blijkt dat over de gehele tribune gesprongen wordt.



Figuur 4.10: De belasting op de overige delen van het tribunevak, $q_{k,o}$, als functie van de verhouding tussen het oppervlak dat met een maximale groepsdichtheid belast $A_{d,max}$ wordt en het totale oppervlak van het tribunevak A_{vlak} .

⁴ Ajax - Besiktas 28-09-2021: https://www.youtube.com/watch?v=F6He-EC-m_c&t=29s en <https://www.youtube.com/watch?v=Bua9CpHsrl4&t=14s>

Op basis van de beelden lijkt er sprake te zijn van een beperkte mate van synchronisatie in springen over de tribune. Er ontbreekt echter goede informatie om tot een onderbouwde bovengrens voor het aantal rijen te komen, waarvoor de afgeleide gebruiksbelastingen van toepassing zijn. Als conservatieve keuze stellen wij daarom voor om $b_{d,max}$ maximaal 20 rijen breed aan te nemen⁵.

Omdat de twee voorstellen voor $b_{d,max}$ ovengrensbenaderingen zijn, is de laagste van deze twee waarden van toepassing:

$$b_{d,max} = \min(n \cdot b; 20b_{rij}) \quad (4.12)$$

$$n = \begin{cases} 0,625 & \text{voor gebruiksklasse C22} \\ 0,70 & \text{voor gebruiksklasse C52} \end{cases}$$

Het blok met de zware belasting kan op iedere locatie van de tribune staan. Afhankelijk van het te toetsen onderdeel moet de locatie gekozen worden, zodanig dat deze resulteert in het meest ongunstige belastinggeval.

⁵ De keuze voor 20 rijen is een inschatting welke nog nader geverifieerd dient te worden.

5 Dynamische effecten

5.1 Inleiding

Dynamische belastingen resulteren in dynamische effecten van een constructie. NEN-EN 1990 artikel 5.1.3 onderscheidt twee manieren om dynamische effecten van een constructie in rekening te brengen bij de beoordeling van die constructie (gelijkwaardige statische belastingen of dynamische berekeningen) en geeft voorwaarden wanneer welke methode van toepassing is. Dit hoofdstuk beschrijft in paragraaf 5.2 onder welke voorwaarden volgens NEN-EN 1990 5.1.3 gebruik kan worden gemaakt van gelijkwaardige statische belastingen, zoals bepaald in hoofdstuk 4 voor gecoördineerd springende groepen mensen. Daarnaast worden de aspecten besproken waar rekening mee gehouden dient te worden bij gebruik van gelijkwaardige statische belastingen. Paragraaf 5.3 benoemt de voorwaarden waaronder een dynamische berekening benodigd is en bespreekt literatuur waarin handvatten worden gegeven voor het uitvoeren van een dynamische berekening. Paragraaf 5.4 geeft het voorstel voor bepalingen voor dynamische effecten voor een update van NEN-EN 1991-1-1.

5.2 Gelijkwaardige statische belastingen

Gelijkwaardige statische belastingen zijn hypothetische statische belastingen die worden gebruikt om de effecten van dynamische belastingen op een constructie na te bootsen. In plaats van een tijds- of frequentieafhankelijke belasting te gebruiken in een dynamische berekening, wordt een gelijkwaardige statische belasting gebruikt die dezelfde structurele respons veroorzaakt. Met betrekking tot het beschouwen van dynamische effecten door middel van gelijkwaardige statische belastingen stelt NEN-EN 1990 (2019) artikel 5.1.3: *‘(5) Wanneer van toepassing (bijvoorbeeld bij trillingen veroorzaakt door wind- of aardbevingsbelastingen) mogen de belastingen door middel van een frequentieberekening gebaseerd op geometrisch-lineair gedrag en lineair-materiaalgedrag zijn bepaald. Voor constructies die een regelmatige geometrische, stijfheids- en massaverdeling hebben, op voorwaarde dat enkel de laagste frequentie van toepassing is, mag een expliciete frequentieberekening zijn vervangen door een berekening met gelijkwaardige statische belastingen.’*

Gelijkwaardige statische belastingen kunnen volgens NEN-EN 1990 (2019) dus worden toegepast voor constructies:

- met een regelmatige geometrische, stijfheids- en massaverdeling,
- waarbij sprake is van lineair geometrisch gedrag en lineair materiaalgedrag, en
- waarvoor alleen de laagste eigenfrequentie van belang is voor de belasting.

Hoewel trillingen door springende mensen in NEN-EN 1990 (2019) 5.1.3 niet expliciet als voorbeeld worden benoemd, zijn deze voorwaarden ook voor dit type trillingen van toepassing.

NEN-EN 1990 (2019) en NEN-EN 1991-1-1 (2019) geven geen nadere toelichting over wat wordt verstaan onder een regelmatige geometrische, stijfheids- en massaverdeling. De voorwaarde is bedoeld om het gebruik van gelijkwaardige statische belastingen af te bakenen. Een onregelmatige constructie kan bijvoorbeeld resulteren in asymmetrisch

dynamisch gedrag, waarvoor de benadering met gelijkwaardige statische belastingen niet van toepassing is. Voor horizontale seismische belastingen op gebouwen geven NEN-EN 1998-1 (2005) en NPR 9998 (2020) criteria voor constructieve regelmatigheid. Deze bepalingen zijn echter niet zomaar toepasbaar in het geval van springende mensen op tribunes, waarbij sprake is van een verticale dynamische belasting. Er is geen literatuur gevonden die handvatten geeft voor het beoordelen van de constructieve regelmatigheid in het geval van constructies belast door een verticale dynamische belasting. Wel is bekend dat bij tribunes de verticale en horizontale trillingen gekoppeld kunnen zijn, wat volgens Ellis et al. (1994, 2000) mogelijk verklaart waarom verticale dynamische belastingen door springende mensenmassa's voor horizontale trillingen zorgen. Uit metingen aan verschillende tribunes door Ellis et al. (1994, 2000), blijkt dat de grootste horizontale responsies optreden ten gevolge van springende groepen mensen. Op basis van de verhouding tussen de horizontale en verticale belasting bepaald aan een aantal constructies schatten Ellis et al. de horizontale belasting in op 7-10% van de verticale belasting, waarbij Ellis et al. wel opmerkt dat meer data benodigd is om deze inschatting te verifiëren. Deze horizontale belasting van 7-10% van de verticale belasting wordt ook gespecificeerd in BRE Digest 426 (BRE, 1997); in NEN-EN 1991-1-1/NB (2019) wordt de bovengrens van 10% voorgeschreven.

Uit onderzoek door Pavic et al. (2002) en Nhleko et al. (2013) blijkt dat horizontale trillingen door springende mensen niet alleen een gevolg zijn van koppeling tussen modes (eigentruillingen) in de constructie, maar dat er ook een dynamische horizontale belasting optreedt die horizontale modes van de constructie in trilling kan brengen. De studies van Pavic et al. (2002) en Nhleko et al. (2013) leggen echter geen relaties tussen de verticale en horizontale belasting en doen geen aanbevelingen voor een te hanteren gelijkwaardige statische belasting in horizontale richting.

Er is sprake van lineair materiaalgedrag als de relatie tussen spanningen en rekken in de constructie lineair is. Voor stalen constructie-elementen treedt in dat geval geen vloeien op en voor betonnen elementen wordt het vloeimoment van de wapening niet bereikt. Door enkel met de gescheurde doorsnede te rekenen hoeft er verder geen rekening gehouden te worden met het niet-lineaire gedrag ten gevolge van het scheuren van het beton. Lineair geometrisch gedrag is van toepassing indien vervormingen geen invloed hebben op het equilibrium van de constructie.

NEN-EN 1990 (2019) specificeert niet wanneer alleen de laagste eigenfrequentie van belang is voor de belasting. De Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 (2019) specificeert een eigenfrequentie van 8 Hz. De achtergrond van deze waarde kon niet worden achterhaald, maar komt goed overeen met de Britse Nationale Bijlage (BS-EN 1991-1-1/NA, 2002), die een ondergrens voor de verticale eigenfrequentie geeft van 8,4 Hz. Volgens BRE Digest 426 (1997) is deze begrenzing mogelijk omdat dynamische belastingen door mensenmassa's binnen een klein frequentiebereik optreden, en maar een beperkt aantal harmonischen (Fourier termen) van de belasting, zie ook bijlage E.2.1.2, beschouwd hoeven worden in de beoordeling van verplaatsingen en spanningen. Indien de eigenfrequentie van een constructie(deel) groter is dan 8,4 Hz, dan worden de eerste drie Fourier termen van de belasting afgedekt: $3 \times 2,8 \text{ Hz} = 8,4 \text{ Hz}$, met 2,8 Hz als bovengrens voor de springfrequentie van een groep volgens BRE Digest 426 (1997). Ginty et al. (2001) concluderen dat een groep niet meer gesynchroniseerd kan springen boven 2,3 Hz, dus de bovengrens van 2,8 Hz uit BRE Digest 426 (1997) is een conservatief uitgangspunt. De Britse Nationale Bijlage (BS-EN 1991-1-1/NA, 2002) geeft naast de ondergrens van 8,4 Hz voor de verticale eigenfrequentie een ondergrens van 4,0 Hz voor de horizontale eigenfrequentie.

Aanbevolen wordt deze ondergrenzen voor de verticale en horizontale eigenfrequentie te hanteren; dus als de laagste verticale eigenfrequentie groter is dan 8,4 Hz en de laagste

horizontale eigenfrequentie groter dan 4,0 Hz, dan wordt voldaan aan voorwaarde (c) voor gebruik van gelijkwaardige statische belastingen.

De keuze voor de eigenfrequentie van 8,4 Hz maakt dat dynamische (resonantie) effecten beperkt blijven en hogere trilmodi een verwaarloosbare bijdrage hebben. Spanenburg (2022) presenteert resultaten van de vergroting van de belasting ten gevolge van dynamische effecten van de constructie voor verschillende eigenfrequenties en dempingswaarden voor een springende groep mensen. De berekeningen zijn gebaseerd op het belastingmodel van Ellis en Ji (2004) in combinatie met de particuliere oplossing van een één-massa-veersysteem. Uit de resultaten blijkt dat voor eigenfrequenties groter dan 8,4 Hz en een demping groter dan 1% de dynamische vergroting kleiner is dan een factor 1,2. Hiermee worden verreweg de meeste gevallen afgedekt.

Uit de voorwaarden aan regelmatigheid van de constructie, het geometrische en materiaalgedrag en de laagste eigenfrequentie volgen geen eisen aan de grootte van de constructiedelen of aan de demping. De resultaten van Spanenburg (2022) laten ook zien dat bij een lage demping van 1% de invloed van de dynamische vergroting ten gevolge van de responsie van de constructie beperkt is. Ellis et al. (2000) geven dempingswaarden van metingen aan tribune elementen van 11 tribunes; de gemeten waarden variëren tussen 1,3% en 4,7% demping. Dempingswaarden bepaald door Ellis et al. (2000) voor 50 tijdelijke tribunes varieerden tussen 1,5% en 4,5% (zijwaarts modes) en tussen 2,2% en 6,0% (voor-achter modes). Er is dus geen reden om eisen aan de grootte van de constructie(delen) of aan de demping te stellen. Ook de Britse Nationale Bijlage (BS-EN 1991-1-1/NA, 2002) stelt geen voorwaarden aan de demping of de grootte van de constructie. Daarom bevelen wij aan geen voorwaarden te stellen aan de demping of de grootte van de constructie(delen) voor het gebruik van gelijkwaardige statische belastingen.

5.3 Dynamische barkentine

Dynamische berekeningen zijn benodigd als niet wordt voldaan aan één van de voorwaarden voor gebruik van gelijkwaardige statische belastingen (zie paragraaf 5.2). Een dynamische berekening bestaat uit een model voor de dynamische belasting ten gevolge van de groep springende mensen en een model voor bepaling van het belastingeffect dat beoordeeld moet worden. Berekeningen met deze modellen kunnen in het frequentie- of tijdsdomein worden uitgevoerd.

5.3.1 Dynamische belastingmodellen

Dynamische belastingsmodellen beschrijven de tijdsafhankelijke belasting van springende mensen. Uit metingen blijkt dat tijdens het springen zowel in verticale als horizontale richting dynamische belastingen optreden. Voor beide richtingen zijn modellen ontwikkeld, waarbij in de meeste literatuur de focus ligt op modellen voor de verticale belasting. Bijlage E geeft een overzicht van en bespreekt een aantal modellen uit de literatuur voor de verticale dynamische belasting door springende groepen mensen. Deze verticale belastingmodellen kunnen worden onderverdeeld in periodieke en smalbandige modellen. Voorbeelden van periodieke belastingmodellen zijn die van Bachmann en Ammann (1987) en Ji en Ellis (1994), waarin de belasting wordt beschreven met periodieke functies. Deze beschrijving vormt een vereenvoudiging van de werkelijke belasting tijdens het springen, omdat er geen rekening wordt gehouden met variaties in de sprongfrequentie. Doordat alle springenergie in een periodiek model geconcentreerd is op de sprongfrequentie $f = 1/T_p$ en de harmonischen $n \cdot f$, kan dit bij een dynamische analyse leiden tot een overschatting van de respons als een van deze frequenties dicht bij de eigenfrequentie van de constructie ligt. Smalbandige belastingsmodellen, zoals die van Sim et al. (2008), Racic en Pavic (2009, 2010)

en Weijs et al. (2025), houden rekening met variabiliteit tussen opeenvolgende sprongen en tussen personen. Hierdoor wordt de sprongenergie verdeeld over een bepaalde bandbreedte, wat leidt tot een realistischere inschatting van de dynamische respons. Richtlijnen waarin bepalingen worden gegeven voor dynamische belastingmodellen voor springende groepen mensen, zoals BRE Digest 426 (1997), ISO 10137 (2007), IStructE (2008) en de Deense Nationale Bijlage DS/EN 1991-1-1 DK NA (2013), schrijven periodieke belastingmodellen voor, zoals het model van Ji en Ellis (1994). Er zijn geen richtlijnen gevonden die het gebruik van smalbandige belastingmodellen voorschrijven.

Naast modellen voor de verticale dynamische belasting zijn er ook modellen ontwikkeld voor de horizontale dynamische belasting als gevolg van springende groepen mensen. Ellis et al. (2000) geven aan dat een vergelijkbaar model als het periodieke model dat zij voor verticale dynamische belasting hebben ontwikkeld, ook van toepassing is op de horizontale dynamische belasting. Hierbij moet de term met het statische gewicht echter buiten beschouwing worden gelaten. BRE Digest 426 (1997) en IStructE (2008) geven geen richtlijnen voor de modellering van de horizontale dynamische belasting.

ISO 10137 (2007) geeft wel een model voor de horizontale belasting, waarbij het statische gewicht echter wel wordt meegenomen in het model voor de horizontale belasting. De parameters voor dit model worden niet nader gespecificeerd, waardoor onduidelijk is hoe het model in de praktijk moet worden toegepast.

De Deense Nationale Bijlage DS-EN 1991-1-1 DK NA (2013) bevat ook een belastingmodel voor zowel verticale als horizontale dynamische belasting. In het model voor horizontale belasting wordt het statische gewicht niet in rekening gebracht. Voor de amplitdefactor bij elke harmonische (Fourier-term) wordt aangenomen dat deze 10% bedraagt van de amplitdefactor van de overeenkomstige harmonische in het verticale belastingmodel. Verder wordt gesteld dat de horizontale belasting in alle richtingen kan optreden en dat deze gelijktijdig moet worden aangenomen met de verticale belasting.

Op basis van de beschouwde literatuur wordt aanbevolen om, in geval van dynamische berekeningen, zowel een verticaal als horizontaal periodiek belastingmodel te gebruiken. Het toepassen van een periodiek belastingmodel resulteert in een conservatieve inschatting van de belasting. BRE Digest 426 (1997) en DS-EN 1991-1-1 DK NA (2013) geven handvatten voor het opzetten van deze belastingmodellen.

5.3.2 Berekening belastingeffect

Belastingeffecten door een springende groep mensen kunnen op verschillende manieren worden bepaald. BRE Digest 426 (1997) en DS-EN 1991-1-1 DK NA (2013) beschrijven hiervoor berekeningsmethodes in het frequentiedomein. DS-EN 1991-1-1 DK NA (2013) geeft een één-massaveersysteem methode, waarmee een equivalente statische kracht wordt uitgerekend op basis van een frequentie responsie functie van de laagste eigenfrequentie van de constructie. De methode kan alleen worden gebruikt voor eenvoudige symmetrische constructies, waarvoor alleen de eerste trillingsmode van belang is en deze niet is gekoppeld aan andere modes. Deze methode kan worden toegepast als alleen de laagste verticale eigenfrequentie van een tribune-element kleiner is dan 8,4 Hz. De afgeleide equivalente statische kracht kan vervolgens op eenzelfde manier worden toegepast als de gelijkwaardige statische belastingen beschreven in dit rapport. Indien meerdere modes een eigenfrequentie hebben die lager is dan de gedefinieerde grenzen van 8,4 Hz en 4,0 Hz, dan dienen deze modes ook beschouwd te worden in het bepalen van het belastingeffect. BRE Digest 426 (1997) beschrijft een methode waarmee meerdere modes beschouwd kunnen worden in het bepalen van het belastingeffect, deze methode is uitgebreider beschreven in Ji en Ellis (1994).

Andere aspecten die een rol spelen in het belastingeffect zijn de invloed van mens-constructie interactie en niet-lineair gedrag (geometrisch of materiaal) op het dynamisch gedrag van de constructie.

Ellis en Ji (1997) beschrijven dat de mensenmassa en de tribuneconstructie het gedrag vertonen van een twee-massa-veer-dempersysteem. Metingen aan een lege en bezette tribune lieten zien dat de bezette tribune twee eigenfrequenties had. De eigenfrequentie van de lege tribune lag tussen deze twee eigenfrequenties in. Ook werd geconstateerd dat de damping significant hoger werd door de invloed van de mensen op de tribune. Dougill et al. (2006) hebben het model van Ellis en Ji (1997) verder uitgewerkt en een zogenaamd “crowd body element” model ontwikkeld, waarin de massa van de mensen als een apart massa-veer-systeem wordt beschreven. Dit model wordt toegepast in de IStructE richtlijn (2008). Agu en Kasperski (2011) hebben mens-constructie interactie verder onderzocht, en daarbij specifiek gekeken naar de invloed van de verhouding tussen het aantal passieve en springende mensen op de dynamische responsie. Op basis van hun bevindingen constateren zij dat het model dat wordt aanbevolen in de IStructE richtlijn een overschatting geeft van de damping. Agu en Kasperski (2011) wijzen er bovendien op dat passieve personen door hun grote dempingscapaciteit trillingsproblemen van een constructie kunnen maskeren. Vooral bij een constructie met weinig constructieve damping kan zelfs een klein aantal passieve personen de effectieve damping aanzienlijk verhogen. Pas wanneer het aantal springende mensen op de constructie richting de 100% gaat, neemt de effectieve damping plots sterk af tot de lage constructieve waarde, waardoor de responsie fors toeneemt. Voor beoordeling van de veiligheid van een tribune constructie(deel) lijkt het dus onverstandig om de dempende invloed van passieve personen zondermeer mee te nemen in een dynamische berekening.

Niet-lineair gedrag in de constructie, bijvoorbeeld als gevolg van scheurvorming door springende mensen, kan resulteren in een verlaging van de eigenfrequenties. Hierdoor neemt de dynamische vergroting van het belastingeffect toe. Als er sprake is van een kans op niet-lineair gedrag, dan dient deze invloed meegenomen te worden in een dynamische berekening.

5.4 Voorstel dynamische effecten

We stellen voor om de voorwaarden beschreven in NEN-EN 1990 (2019) artikel 5.1.3 (5) als uitgangspunt te nemen voor het gebruik van gelijkwaardige statische belastingen of een dynamische berekening om dynamische effecten in rekening te brengen voor gecoördineerd springende mensenmassa's. Daarbij worden de voorwaarden in dit voorstel nader gespecificeerd op basis van de bevindingen beschreven in de voorgaande paragrafen.

Een dynamische berekening is niet vereist indien:

- (1) de verticale eigenfrequentie van het constructie-element groter is dan 8,4 Hz en de horizontale eigenfrequentie groter is dan 4,0 Hz;
 - (2) er sprake is van lineair geometrisch gedrag en lineair materiaalgedrag, voor betonnen constructies mag scheurvorming in rekening worden gebracht door met de gescheurde doorsnede te rekenen;
 - (3) de constructie een regelmatige geometrische, stijfheids- en massaverdeling heeft.
- De dampingseis komt te vervallen. Indien aan deze voorwaarden wordt voldaan, dan kan gebruik worden gemaakt van gelijkwaardige statische belastingen. Indien niet wordt voldaan aan deze voorwaarden dan behoren dynamische effecten in rekening te worden gebracht door middel van een dynamische berekening.

Daarnaast moet bij tribunes rekening zijn gehouden met een gelijkmatig verdeelde opwaartse gebruiksbelasting gelijk aan 50% van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting. Deze belasting brengt het dynamisch effect in rekening dat kan optreden als gevolg van de bewegende massa van mensen (opspringen). De neerwaartse en opwaartse gebruiksbelastingen moeten afzonderlijk als extreme veranderlijke belasting worden beschouwd. Tevens moet bij de neerwaartse gebruiksbelasting op tribunes gelijktijdig rekening zijn gehouden met een veranderlijke gelijkmatig verdeelde horizontale belasting die kan optreden als gevolg van de bewegende mensenmassa. Deze horizontale belasting bedraagt 10% van de verticale belasting en moet wat betreft de richting zijn beschouwd als een vrije belasting.

6 Voorstel NEN-EN 1991-1-1

In dit hoofdstuk wordt het voorstel voor de nieuwe bepalingen voor NEN-EN 1991-1-1 gedaan. Dit voorstel is gebaseerd op een studie naar de huidige normbepalingen, een analyse van groepsdichtheden en springende mensenmassa's op tribunes en een berekening van de karakteristieke waarde voor de gebruiksbelasting op tribunes.

Het voorstel omvat 4 gebruiksklassen C21, C22, C51 en C52, zoals omschreven in [Tabel 6.1](#). Deze gebruiksklassen zijn gedefinieerd op basis van de groepsdichtheid en het optreden van gecoördineerd springen door grote mensenmassa's. Voor gebruiksklasse C21 en C22 is een groepsdichtheid van 4,0 personen per vierkante meter van toepassing, en voor gebruiksklasse C51 en C52 een dichtheid van 5,0 personen per vierkante meter.

Voor deze gebruiksklassen zijn gebruiksbelastingen $q_{k,max}$ en $q_{k,h}$ bepaald, zoals gegeven in [Tabel 6.1](#). De belasting $q_{k,max}$ is de maximum belasting die over een deel van de tribune toegepast dient te worden. De belasting $q_{k,h}$ is de belasting die op alle overige delen van de tribune van toepassing is. Deze belastingen dienen gelijktijdig te worden aangebracht op de tribune, zoals weergegeven in [Figuur 6.1](#). De breedte waarover $q_{k,max}$ toegepast dient te worden, is de kleinste van de volgende twee waarden:

$$b_{d,max} = \min(n \cdot b; 20b_{rij})$$

$$n = \begin{cases} 0,625 & \text{voor gebruiksklasse C22} \\ 0,70 & \text{voor gebruiksklasse C52} \end{cases} \quad (6.1)$$

Waarbij n een constante is die afhangt van de gebruiksklasse, b de breedte van de tribune en b_{rij} de breedte van één rij is. Het blok met de hoge belasting $q_{k,max}$ kan op iedere locatie van de tribune staan. Afhankelijk van het te toetsen onderdeel moet de locatie gekozen worden, zodanig dat deze resulteert in het meest ongunstige belastinggeval.

De gebruiksbelastingen $q_{k,max}$ en $q_{k,h}$ mogen worden toegepast indien:

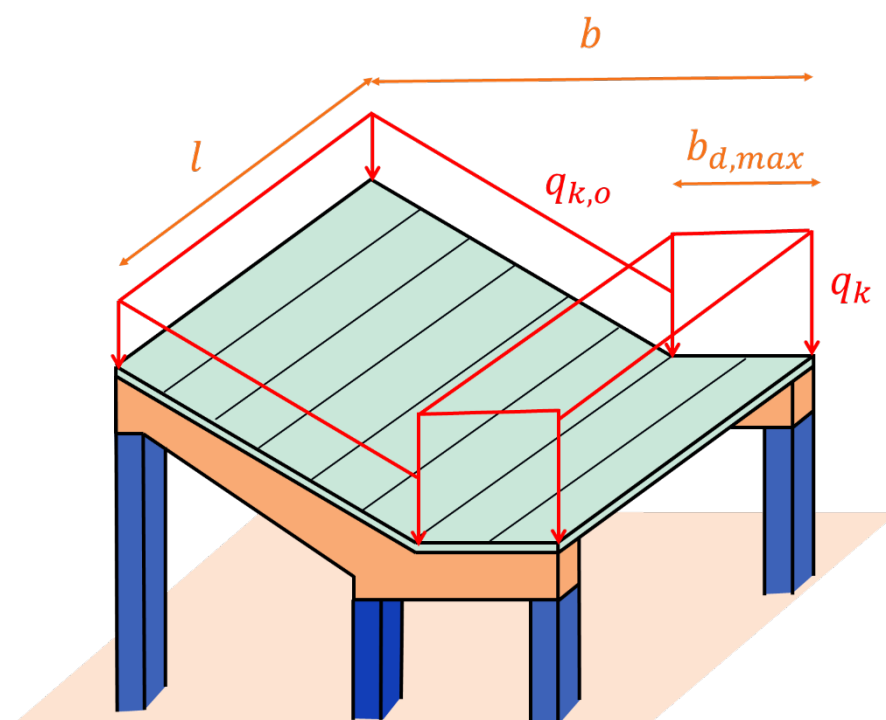
- (1) de verticale eigenfrequentie van het constructie-element groter is dan 8,4 Hz en de horizontale eigenfrequentie groter is dan 4,0 Hz;
 - (2) er sprake is van lineair geometrisch gedrag en lineair materiaalgedrag, voor betonnen constructies mag scheurvorming in rekening worden gebracht door met de gescheurde doorsnede te rekenen;
 - (3) de constructie een regelmatige geometrische, stijfheids- en massaverdeling heeft.
- Indien niet wordt voldaan aan deze voorwaarden dan behoren dynamische effecten in rekening te worden gebracht door middel van een dynamische berekening.

Daarnaast moet bij tribunes, in het geval dat gebruik wordt gemaakt van de gebruiksbelastingen, rekening zijn gehouden met een gelijkmatig verdeelde opwaartse gebruiksbelasting gelijk aan 50% van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting. Deze belasting brengt het dynamisch effect in rekening dat kan optreden als gevolg van de bewegende massa van mensen (opspringen). De neerwaartse en opwaartse gebruiksbelastingen moeten afzonderlijk als extreme veranderlijke belasting worden beschouwd. Tevens moet bij de neerwaartse gebruiksbelasting op tribunes gelijktijdig

rekening zijn gehouden met een veranderlijke gelijkmatig verdeelde horizontale belasting die kan optreden als gevolg van de bewegende mensenmassa. Deze horizontale belasting bedraagt 10% van de verticale belasting en moet wat betreft de richting zijn beschouwd als een vrije belasting.

Karakteristieke waarde van de gebruiksbelastingen enkel van toepassing voor het ontwerp van nieuwe constructies

Dit rapport is niet ingegaan op de waarde van de karakteristieke belasting in combinatie met de partiële factoren voor bestaande bouw, conform de NEN 8700 filosofie. Dit maakt deel uit van vervolgonderzoek.



Figuur 6.1: Verdeling toeschouwers en de bijbehorende maximale en overige belastingen q_k en $q_{k,t}$.

Tabel 6.1: Voorstel gebruiksklassen.

Klasse	Omschrijving	Voorbeelden	$q_{k,max}$ [kN/m ²]	$q_{k,h}$ [kN/m ²]
C21	Ruimten met vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's niet optreedt of met maatregelen wordt voorkomen ^[3]	Safe-standing tribunes, zittribunes ^[2] , VIP tribunes, ruimten in kerken, theaters of bioscopen, conferentiezalen, collegezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtkamers/lokalen in stations	4,0	4,0
C22	Ruimten met vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's kan optreden	Safe-standing tribunes, zittribunes ^[2]	7,0	5,0
C51	Ruimten zonder vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's niet optreedt of met maatregelen wordt voorkomen ^[3]	Traditionele staantribunes, bordessen en toegangsruimten, sporthallen, concertzalen, stationsperrons	5,0	5,0
C52	Ruimten zonder vaste barrières ^[1] , waar gecoördineerd springen door grote mensenmassa's kan optreden	Traditionele staantribunes	8,5	6,0

^[1] Als de vrije ruimte in een rij tussen twee barrières groter is dan 0,55 m (met uitzondering van VIP tribunes) dan dienen beheersmaatregelen getroffen te worden die voorkomen dat toeschouwers in een andere rij gaan staan. Indien geen beheersmaatregelen worden getroffen in deze situaties, dan is gebruiksklasse C51 of C52 van toepassing.

^[2] Als de kans bestaat dat toeschouwers op stoelen gaan staan, waarbij een verhoging in concentratie van mensen optreedt, dan dienen beheersmaatregelen getroffen te worden die het staan op stoelen tegengaan (bv. door middel van stewards die toeschouwers hierover instrueren). Indien geen maatregelen worden getroffen in deze situaties, dan is gebruiksklasse C51 of C52 van toepassing.

^[3] Maatregelen dienen getroffen te worden om gecoördineerd springen tegen te gaan. Indien er geen maatregelen worden getroffen in een tribunevak waar gecoördineerd springen kan optreden, dan is gebruiksklasse C22 of C52 van toepassing.

7 Conclusies en aanbevelingen

In opdracht van het Ministerie van Volkshuisvesting en Ruimte Ordening (VRO) heeft TNO een literatuuronderzoek uitgevoerd naar belastingen door springende mensenmassa's op tribunes. Het doel van dit onderzoek is om tot een voorstel te komen voor een herziening van de bepalingen in NEN-EN 1991-1-1 (2019) die betrekking hebben op de te hanteren ontwerpbelasting voor de nieuwbouw van tribunes. De in dit onderzoek voorgestelde gebruiksbelastingen zijn een conservatieve inschatting op basis van de ten tijde van dit rapport beschikbare literatuur en meetdata. Daarom wordt voorgesteld de afgeleide belastingen niet van toepassing te verklaren voor bestaande bouw, hiervoor zijn aanvullende studies benodigd waar in dit hoofdstuk aanbevelingen voor worden gedaan.

Het voorstel omvat vier gebruiksklassen, C21, C22, C51 en C52, die van elkaar te onderscheiden zijn op basis van de maximaal te hanteren groepsdichtheid en het optreden van gecoördineerd springen. Dit is een verandering ten opzichte van de huidige bepalingen in NEN-EN 1991-1-1, waarbij er voor tribunes gedifferentieerd wordt tussen twee gebruiksklassen, C2 en C5.

Op basis van een literatuurstudie en beschikbare metingen is een inschatting gemaakt van de nieuwe gebruiksbelastingen wanneer gecoördineerd springen kan optreden. Daarbij is een procedure gedefinieerd waarmee de belasting op de verschillende onderdelen van een tribuneconstructie kan worden bepaald door middel van gebruiksbelastingen $q_{k,max}$ en $q_{k,h}$.

De gebruiksbelastingen mogen alleen toegepast worden indien aan de minimale eisen met betrekking tot de eigenfrequentie van de constructie voldaan wordt. Bovendien moet er sprake zijn van lineair geometrisch en materiaalgedrag. Daarnaast moet met een gelijkmatig verdeelde opwaartse belasting en met een horizontale belasting gerekend worden.

Het onderzoek is uitgegaan van informatie uit de literatuur, de tijdens het schrijven van dit rapport beschikbare metingen aan Nederlandse stadiontribunes en enkele uitgevoerde eenvoudige probabilistische berekeningen. De voorgestelde gebruiksbelastingen zijn bedoeld als veilige waarden voor de beoordeling van nieuwbouw. Om tot een zo scherp mogelijke vaststelling van de belastingen te komen wordt hieronder een aantal aanbevelingen gedaan. Deze zijn vooral voor de beoordeling van bestaande bouw relevant.

- 1) **Beoordeling bestaande bouw:** Voor de beoordeling van bestaande bouw gelden in het Besluit bouwwerken leefomgeving lagere veiligheidseisen dan voor nieuwbouw. Aangesloten dient te worden bij de NEN 8700 serie en karakteristieke waarden van de belasting en partiële factoren dienen gekalibreerd te worden.
- 2) **Waar mogelijk aanscherpen van modellen en aannames:** In onderhavig rapport is de karakteristieke waarde voor de gebruiksbelasting bepaald op basis van literatuur, beschikbare metingen en enkele eenvoudige probabilistische berekeningen. Nader

onderzoek op de volgende punten zou mogelijk kunnen leiden tot aanscherping van de afgeleide belastingen:

- a. De kansverdeling van de 50-jaars *DAF* is bepaald op basis van de aanname van onafhankelijke spring *events* tijdens wedstrijden. De verwachting is dat er een zekere mate van correlatie aanwezig zal zijn tussen de spring-events. Het kwantificeren en meenemen hiervan op basis van een nadere analyse van de data, gecombineerd met bevindingen uit literatuur, leidt mogelijk tot een verlaging van de rekenwaarde van de belastingen. Een eerste inschatting is dat deze verlaging mogelijk zou kunnen resulteren in een reductie van de rekenwaarde van de belasting van 5-15%.
Indien uit de analyse toch blijkt dat deze reductie niet haalbaar is op basis van de beschikbare data, wordt aanbevolen monitoring uit te voeren aan tribune-elementen, zoals beschreven in paragraaf 4.4.2, om meer *DAF* waarden van Nederlandse tribunes te vergaren.
 - b. De groepsdichtheid is in dit onderzoek bepaald op 4,0 (C22) of 5,0 (C52) personen per vierkante meter. Dit zijn gekozen deterministische bovengrenzen voor de 50-jaars maximale belasting. Een stochastische beschrijving van de groepsdichtheid kan worden afgeleid op basis van monitoring op tribunes zoals beschreven in paragraaf 3.2. Mogelijk dat het rekenen op deze wijze tot een reductie van circa 10% in de rekenwaarde van de belasting leidt.
 - c. In dit onderzoek is gerekend met de aanname dat de groepsdichtheid en de sprongfactor onafhankelijk zijn. Echter, het zou kunnen zijn dat, bij hoge dichtheden, het (in fase) springen vanaf een bepaald moment steeds moeilijker en uiteindelijk onmogelijk wordt. Het kwantificeren van deze correlatie door middel van testen of metingen kan mogelijk leiden tot een reductie van de rekenwaarden van de belasting.
 - d. In dit rapport is de grootte van het afmetingseffect conservatief ingeschat op 20 rijen, zonder dat daar een goede onderbouwing voor is. Het ontbreekt vooralsnog aan informatie om tot een nauwkeurige inschatting te komen. Gekeken dient te worden hoe dit effect adequaat gekwantificeerd kan worden.
- 3) **Richtlijn voor dynamische analyses:** Indien niet wordt voldaan aan de voorwaarden voor het gebruik van de gelijkwaardige statische gebruiksbelastingen zoals gespecificeerd in dit rapport, dan dient een constructeur een volledig dynamische berekening uit te voeren. Het ontbreekt in Nederland aan concrete richtlijnen voor het uitvoeren van dit soort berekeningen. Aanbevolen wordt om, in nauwe samenspraak met de ingenieurspraktijk, een richtlijn te ontwikkelen voor dynamische berekeningen van tribunes onder springbelastingen. Bij het ontwikkelen van deze richtlijn moet in eerste instantie aandacht besteed worden aan de probabilistische modellering van springende mensen op tribunes, om i) tot een zó realistisch mogelijke inschatting te komen van de dynamische belastingen; en ii) om een aantoonbaar veilig ontwerp (of beoordeling) van een tribune te realiseren. Het uiteindelijke product moet voor een ingenieur eenvoudig te gebruiken zijn.

8 Referenties

abtWassenaar (2022a). Stadion FC Groningen te Groningen – Tribune-elementen Analyse metingen, 2100352, Wassenaar.

ABT (2022b). Trillingsonderzoek tribunes – Meting en analyse meting Wedstrijd AZ -SCH, 2200668, Velp.

ABT (2022c). Trillingsonderzoek tribunes – Meting en analyse meting Wedstrijd SCH - GAE, 2200668, Velp.

AGC Glass Europe (z.d.). AGC YourGlass – Architectural Glass Solutions. Geraadpleegd op 18 december 2024, van <https://www.agc-yourglass.com>

Bachmann, H, Ammann, W. (1987). Vibrations in structures: induced by man and machines. In: Vol. 3. IABSE.

Bachmann, H., Pretlove, A.J., Rainer, H. (1995). Dynamic forces from rhythmical human body motions, in: Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines, Birkhäuser, Basel.

Biggs, J.J. (1964). Introduction tot Structural Dynamics. McGraw-Hill Book Company, new York.

BRE (1997). The response of structures to dynamic crowd loads, BRE Digest 426, Building Research Establishment, Watford.

Brownjohn, J.M.W., Pavic, A., Omenzetter, P. (2004). “A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking”. In: Canadian Journal of Civil Engineering 31.1, p. 65–77.

BSI (2019). UK National Annex to Eurocode 1. Actions on structures - General actions. Densities, self-weight, imposed loads for buildings, BS EN 1991-1-1 NA, Londen.

CBS (2019). Lichaamsgroei 1981-2018: recent vooral gewichtstoename. Geraadpleegd op 14-02-2025, van <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2019/48/lichaamsgroei-1981-2018-recent-vooral-gewichtstoename>

CBS (z.d.). Personen met een hoog inkomen; huishoudenskenmerken. Geraadpleegd op 08-01-2025, van <https://www.cbs.nl/nl-nl/cijfers/detail/81565NED>.

CEN (2022). Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings (Background report), prEN 1991-1-1, Brussel.

CEN (2024). Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings, prEN 1991-1-1, Brussel.

Chen, J., Li, G., & Racic, V. (2016). Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants jumping. *Engineering Structures*, 112, 71-80.

COS Tribune (z.d.). COS – retractable and mobile grandstands. Geraadpleegd op 18 december 2024, van <https://cos.be/?lang=en>

De Noordzijde (2017). De Noordzijde. Geraadpleegd op 06-04-2025 , van <https://denoordzijde.nl/de-noordzijde/>.

DIN (2019). National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings – English translation of DIN EN 1991-1-1/NA:2010-12, DIN EN 1991-1-1/NA, Berlijn.

Dougill, J. W. J., & Parkhouse, J. H. R. (2006). Human structure interaction during rhythmic bobbing. *Structural Engineer*, 84(22), 32-39.

DS (2013). National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, DS/EN 1991-1-1 DK NA, Copenhagen.

Ebrahimpour, A., and Sack, R. L. (1989). "Modeling dynamic occupant loads." *J. Struct. Eng.*, 115(6), 1476-1496.

Ellis, B.R., Ji, T. (1994). "Floor vibration induced by dance-type loads: verification". In: *Structural Engineer* 72 p. 45-50.

Ellis, BR, Ji, T. and Littler, J.D. (1994). The response of grandstands to dynamic loads induced by crowds. *Australasian Structural Engineering Conference*, 457-462, Sydney.

Ellis, B.R., Ji, T., Littler, J.D. (2000). "The response of grandstands to dynamic crowd loads". *Proc. Instn. Civ. Engrs Structures & bldgs.*, 140, 355-365.

Ellis, B. R., Ji, T. (2004). "Loads generated by jumping crowds: Numerical modelling." *Struct. Eng.*, 82(17), 35-40.

Ginty, D., Derwent, J.M., Ji, T. (2001) "The frequency ranges of dance-type loads". In: *Structural Engineer* 79.6, pp. 27-31.

GL Events UK Stadia (z.d.). The many benefits of safe standing. Geraadpleegd op 12 februari 2025, van <https://gleventsstadia.co.uk/news/the-many-benefits-of-safe-standing/>

Van der Hulst, M., Pouwels, N. (2016). Tribunes – inside (out), Cement, 's-Hertogenbosch

ISO (2007). Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, ISO 10137, International Organization for Standardization, Genève.

IStructE (2008). Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action – Recommendations for management, design and assessment, Institution of Structural Engineers, London.

Ji, T., Ellis, B. R. (1993). "Evaluation of dynamic crowd effects for dance loads." *Int. Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE) Symp., Structural Serviceability of Buildings*, Goteburg.

Ji, T., Ellis, B.R. (1994). "Floor vibration induced by dance-type loads: theory". In: Structural Engineer 72 p. 37-44.

Legio Noviomagum (2005). Legio Noviomagum – Wie zijn we. Geraadpleegd op 06-04-2025, van <https://legio-noviomagum.nl/in-wie-zijn-we/>.

Li, G., Ji, T., & Chen, J. (2018). Determination of the dynamic load factors for crowd jumping using motion capture technique. Engineering structures, 174, 1-9.

Mandal, P., en Ji, T. (2004). Modelling dynamic behaviour of a cantilever grandstand. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 157(3), 173-184.

NBN (2007). Eurocode 1 - Belastingen op constructies - Deel 1-1 : Algemene belastingen - Volumieke gewichten, eigen gewicht en opgelegde belastingen voor gebouwen, NBN EN 1991-1-1 ANB, Brussel.

NEN (1991). NEN 6702: Belastingen en vervormingen – Grondslagen voor de berekening van bouwconstructies. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.

NEN (2005). NEN-EN 1998-1: Eurocode 8 – Ontwerp en berekening van aardbevingsbestendige constructies – Deel 1: Algemene regels, seismische belastingen en regels voor gebouwen. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.

NEN (2007). Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Belastingen en vervormingen, NEN 6702, Delft.

NEN (2019). Eurocode 0: Grondslagen van het constructief ontwerp, NEN-EN 1990, Delft.

NEN (2019). Nationale bijlage bij NEN-EN 1990+A1:2006+A1:2006/C2:2019 Eurocode: Grondslagen van het constructief ontwerp, NEN-EN 1990/NB, Delft.

NEN (2019). Eurocode 1: Belasting op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen – Volumieke gewichten, eigen gewicht en gebruiksbelastingen voor gebouwen, NEN-EN 1991-1-1+C1+C11, Delft.

NEN (2019). Nationale bijlage bij NEN-EN 1991-1-1+C1+C11: Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1-1: Algemene belastingen – Volumieke gewichten, eigen gewicht en gebruiksbelastingen voor gebouwen, NEN-EN 1991-1-1/NB, Delft.

NEN (2019). Toeschouwersaccommodaties - Deel 1: Algemene kenmerken voor de inrichting van tribunes, NEN-EN 13200-1, Delft.

NEN (2020). Toeschouwersaccommodaties - Deel 6: Demonteerbare tribunes, NEN-EN 13200-6, Delft.

NEN (2020). NPR 9998: Beoordeling van de constructieve veiligheid van een gebouw bij nieuwbouw, verbouw en afkeuren – Geïnduceerde aardbevingen – Grondslagen, belastingen en weerstanden. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.

NEN (2024). Event structures - Safety requirements, NEN-EN 17879, Delft.

Nhleko, S., Williams, M. S., Blakeborough, A., & Stebbins, J. (2013). Horizontal dynamic forces generated by swaying and jumping. *Journal of Sound and Vibration*, 332(11), 2856-2871.

NOS (2021). Tribune met Vitesse-supporters stort in bij NEC, rellen na afloop. Geraadpleegd op 06-04-2025, van <https://nos.nl/artikel/2402028-tribune-met-vitesse-supporters-stort-in-bij-nec-rellen-na-afloop/>.

Paloheimo, E., Ollila, M. (1973). Researches in the live load of persons, Ministry of Domestic Affairs, Finland.

Parkhouse, J. G., Ewins, D. J. (2004). "Vertical dynamic loading produced by people moving to a beat." In: Proc., Int. Seminar on Modal Analysis (ISMA) 2004, Leuven, 821-835.

Parkhouse, J. G., Ewins, D. J. (2006). "Crowd-induced rhythmic loading." In: Proc. Inst. Civ. Eng., Struct. Build., 159(SB5), 247-259.

Pavic, A., Yu, C. H., Brownjohn, J., & Reynolds, P. (2002). Verification of the existence of human-induced horizontal forces due to vertical jumping. *Proceedings of IMAC XX*, 1, 4-7.

Pernica, G. (1990). "Dynamic load factors for pedestrian movements and rhythmic exercises." *Can. Acoust.*, 18(2), 3-18.

Pitchd Groundhoppin (2018). GROUND // Riwal Hoogwerkers Stadion – FC Dordrecht (Netherlands). Pitchd.tv. Geraadpleegd op 6 januari 2025, van <https://www.pitchd.tv/post/ground-riwal-hoogwerkers-stadion-fc-dordrecht-netherlands>

Racic, V., Pavic, A. (2009). "Mathematical model to generate near-periodic human jumping force signals". In: *Mechanical Systems and Signal Processing* 24.1, pp. 138-152.

Racic, V., Pavic, A. (2010). "Stochastic approach to modelling of near-periodic jumping loads". In: *Mechanical systems and signal processing* 24.8, p. 3037-3059.

Rainer, J. H., Pernica, G., and Allen, D. E. (1988). "Dynamic loading and response of footbridges." *Can. J. Civ. Eng.*, 15(1), 66-71.

Reuvers, C. (2024). Unieke kans: scoor jouw stadionstoel. ForzaNEC.nl. Geraadpleegd op 13 februari 2025, van <https://www.forzanec.nl/nieuws/unieke-kans-scoor-jouw-stadionstoel/>

RHDHV (2022a). Onderzoek naar de technische oorzaken van het bezwijken van het tribune-element van het Goffertstadion te Nijmegen, BI3452-IB-RP-211214-0937, Rotterdam.

RHDHV (2022b). Advies belastingeffecten stadions, BI6873-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0003, Rotterdam.

RHDHV (2022c). Bepaling belastingeffect toeschouwers met trillingsmeting – Johan Cruijff Arena, BI6873-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001, Rotterdam.

RHDHV (2022d). Bepaling belastingeffect toeschouwers met trillingsmeting - De Galgenwaard, BI6873-RHD-ZZ-XX-RP-Z-0001, Rotterdam.

Schulpen, D. (2017). "De terugkeer van de staantribune." Geraadpleegd op 1 februari 2025, <https://www.indehekken.net/de-terugkeer-van-de-staantribune/>

Willemsen, R. (2023). "Staanvakken op Spinnepkop leeg bij De Graafschap - ADO: 'Vragen mensen écht thuis te blijven'" Geraadpleegd op 1 februari 2025, <https://www.gelderlander.nl/de-graafschap/staanvakken-op-spinnekop-leeg-bij-de-graafschap-ado-vragen-mensen-echt-thuis-te-blijven>

Racecourses.net (z.d.). Overzicht van alle Britse en internationale renbanen. Geraadpleegd op 8 januari 2025, van <https://www.racecourses.net/>

Scrafton, M. (2021). What is Blackpool's stance on the possibility of installing safe standing at Bloomfield Road? Blackpool Gazette. Geraadpleegd op 12 februari 2025, van <https://www.blackpoolgazette.co.uk/sport/football/blackpool-fc/what-is-blackpools-stance-on-safe-standing-at-bloomfield-road-3415853>

Sentler, L. (1976). Live load surveys – A review with discussions, Report 78, Division of Building Technology, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

SGSA (2018). Guide to Safety at Sports Grounds (Green Guide), 6th edition, Sports Grounds Safety Authority, Londen.

SGSA (2025). "Stewarding roles and duties" Geraadpleegd 20 januari 2025, <https://sgsa.org.uk/safety-management/stewarding/stewarding-roles-and-duties/>

Sim, J., Blakeborough, A., Williams, M.S., Parkhouse, G. (2008). "Statistical model of crowd jumping loads". In: Journal of structural engineering 134.12, p. 1852–1861.

Spanenburg, M. (2022). "Dynamische belasting op tribunes". In: Cement 2, pp. 36-46.

Still, G.K. (2019). "Crowd Safety and Crowd Risk Analysis." Geraadpleegd op 5 december 2024, van <https://www.gkstill.com/Support/crowd-density/CrowdDensity-1.html>

The Stadium Consultancy (2015). "Onderzoeksrapport – Voorstel aanpassing reglementsartikel staanplaatsen handboek competitiezaken". 15-120-KNV-TSC-RE-01, Bussum.

Thompson, B. & Lewis, G. (2022). Safe standing at football grounds: the construction implications. Construction Management. Geraadpleegd op 12 februari 2025, van <https://constructionmanagement.co.uk/safe-standing-football-grounds-design-construction/>

Tschechne, M. (2022). Nine per square meter. Max Planck Research, 2.

UNE (2019). Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-eight, imposed loads for buildings, UNE-EN 1991-1-1 AN, Madrid.

VAK410 (2001). VAK410: Het ontstaan. Geraadpleegd op 06-04-2025, van <http://www.vak410.nl/content/anno-2001>.

Van Staalduinen, P., & Courage, W. (1994). Dynamic loading of Feyenoord stadium during pop concerts. IABSE REPORTS, 283-283.

Veenbrink, B. (2025). Email aan A.J. Bronkhorst en in cc Marcel Balk en Leo van der Vliet, 5-2-2025.

Verner, M. (2017). "The occurrence of synchronized jumping crowd at sports stadiums." *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 13, 152-156.

W&H Sports (z.d.). Sports Equipment & Performance Products. Geraadpleegd op 6 januari 2025, van <https://whsports.nl/en/>

Weijs, H.J.J., Steenbergen, R.D.J.M., Hendriks, M.A.N. (2025). Probabilistic Forensic Assessment of a Collapsed Concrete Grandstand Element under a Jumping Crowd Load (werktitel), HERON, Delft (in beoordeling)

Willford, M. (2001). "An investigation into crowd-induced vertical dynamic loads using available measurements." *Struct. Eng.*, 79(12), 21-25.

De Winter, P.E. (1989). Achtergronden van de belastingen volgens concept NEN 6702, TNO B-89-227, Delft.

Xiong, J., Chen, J. (2021). "Open access and updated human-induced load data set". In: *Journal of Structural Engineering* 147.3, p. 04720003.

9 Ondertekening

Delft, december 2025

Ir. A.J. Bronkhorst
Auteur

N. Gireesh
Projectleider

Ir. M. van Roermund
Research Manager
Reliable Structures

Bijlage A

Normbepalingen tribunes en sprongbelastingen

A.1 Inleiding

De karakteristieke waarde van de sprongbelasting die in Nederland van toepassing is, via NEN-EN 1991-1-1 (2019), is afkomstig uit een inventarisatie door TNO beschreven in rapport B-89-227 (1989). Deze belasting is eerst in NEN 6702 (2007) en vervolgens in de Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 geïmplementeerd. Dit hoofdstuk geeft een overzicht van bepalingen met betrekking tot sprongbelastingen en tribunes in verschillende normen (zie [Tabel A.1](#)), benoemt onduidelijkheden en gaat in op de achtergrondinformatie waarop deze bepalingen zijn gebaseerd.

In paragraaf A.2 en A.3 wordt ingegaan op de bepalingen met betrekking tot de gevolgklassen en gebruiksklassen welke van toepassing zijn voor tribunes. Paragraaf A.4 gaat in op de bepalingen met betrekking tot de gebruiksbelastingen die worden voorgeschreven voor tribunes. In paragraaf A.5 worden de bepalingen over dynamische effecten ten gevolge van sprongbelastingen toegelicht. Paragraaf A.6 vat deze bijlage samen.

Tabel A.1: Overzicht van beschouwde normen over springbelastingen en tribunes.

Referentie	Omschrijving
NEN-EN 1990 (2019)	Eurocode: Grondslagen voor het constructief ontwerp
NEN-EN 1990/NB (2019)	Nederlandse nationale bijlage bij EN 1990
NEN-EN 13200-1 (2019)	Toeschouwersaccomodaties – Deel 1: Algemene kenmerken voor de inrichting van tribunes
NEN-EN 13200-6 (2020)	Toeschouwersaccomodaties – Deel 6: Demonteerbare tribunes
NEN-EN 17879 (2024)	Event structures – Safety requirements
NEN-EN 1991-1-1 (2019)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen
NEN-EN 1991-1-1/NB (2019)	Nederlandse nationale bijlage bij EN 1991-1-1
DIN-EN 1991-1-1/NA (2010)	Duitse nationale bijlage bij EN 1991-1-1
BS-EN 1991-1-1/NA (2002)	UK nationale bijlage bij EN 1991-1-1
NBN-EN 1991-1-1 ANB (2007)	Belgische nationale bijlage bij EN 1991-1-1
DS-EN 1991-1-1 DK NA (2013)	Deense nationale bijlage bij EN 1991-1-1
UNE-EN 1991-1-1 (2019)	Spaanse nationale bijlage bij EN 1991-1-1
FprEN 1991-1-1 (2024)	Final draft Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1 Specific weight of materials, self-weight of construction works and imposed loads for buildings
NEN 6702 (2007)	Technische grondslagen voor bouwconstructies – TGB 1990 – Belastingen en vervormingen

A.2 Gevolgklassen

De rekenwaarde voor de belasting op tribunes wordt mede bepaald door het van toepassing zijnde betrouwbaarheidsniveau. Deze is afhankelijk van de gevolgklasse waar de constructie wordt ingedeeld. NEN-EN 1990 (2019) definieert gevolgklassen CC1, CC2 en CC3, die de gevolgen omschrijven van het bezwijken of slecht functioneren van een bouwwerk. Tribunes vallen volgens NEN-EN 1990 (2019) Bijlage B.3.1 in gevolgklasse CC3. [Tabel A.2](#) geeft de omschrijving van deze gevolgklasse en voorbeelden in NEN-EN 1990 (2019) en de Nederlandse Nationale Bijlage NEN-EN 1990/NB (2019). In de beschrijving van voorbeelden gegeven in Tabel NB.24 in de Nederlandse Nationale Bijlage bij NEN-EN 1990 (2019) staat het volgende: *“Bouwwerken met de bestemming publieksfunctie (bijv. onderwijsgebouwen stadions, concerthallen, tribunes), waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen”*. Hierover worden de volgende opmerkingen gemaakt:

- De komma in het zinsdeel *“... tribunes, waarbij ...”* suggereert een verduidelijking en dat de zin ook op een bredere categorie bouwwerken kan slaan. De bedoeling van het zinsdeel na de komma betreft een specifieke beperking, en de regel geldt alleen voor deze bouwwerken. TNO brengt dit als commentaar in bij de NEN Commissie TGB Basiseisen en Belastingen.
- In het geval van het bezwijken van één tribune-element is er geen sprake van 500 personen die gelijktijdig gevaar lopen. NEN-EN 1990 (2019) doet geen expliciete uitspraken over de te hanteren gevolgklasse als er minder dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen op een tribune. Wel wordt de volgende opmerking gemaakt in bepaling B.3.1(3): *“Afhankelijk van het constructietype en de besluiten genomen tijdens het ontwerp en de berekening, mogen bepaalde constructieve elementen zijn ingedeeld in dezelfde, een hogere of een lagere gevolgklasse dan degene die geldt voor de gehele constructie.”*

De Nederlandse Nationale Bijlage bij NEN-EN 1990 (2019) geeft een procedure (zie Tabel NB.25-A) waarmee kan worden bepaald of constructieve elementen van een bouwwerk kunnen worden ingedeeld in een lagere gevolgklasse. De procedure specificeert dat als aan criterium A of B of C is voldaan en gelijktijdig aan criterium D en E dat een lagere gevolgklasse gehanteerd mag worden. In het geval van tribune-elementen wordt niet voldaan aan de toetsingscriteria A, B en C voor het verlagen van de gevolgklasse van CC3 naar CC2:

- o Criterium A: Er is potentieel levensgevaar bij bezwijken. Voor tribune-elementen is het gewicht bij falen van het vallende element meer dan 0,3 kN/m².
- o Criterium B: Voor tribune-elementen is de bezettingsgraad niet lager dan 1 persoon/m.
- o Criterium C: Een tribune-element is in ieder geval een middelgroot element (oppervlakte tussen 3 en 10 m²), en valt in drukbezochte publiek toegankelijke gebieden in de buitenlucht (meer dan 1 persoon per m²).
- o Criterium D: De gebruiksbelasting is niet maatgevend in de fundamentele belastingscombinatie.
- o Criterium E: De ontwerplevensduur is identiek aan die van het gehele bouwwerk.

Dit betekent dat voor tribunes waar in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen gevolgklasse CC3 ook van toepassing is voor de tribune-elementen waarop de bezoekers staan.

- Hoewel niet expliciet zo benoemd, kan worden aangenomen dat voor bouwwerken met bestemming publieksfunctie waarbij minder dan 500 personen gelijktijdig gevaarlopen gevolgklasse CC2 van toepassing is.

Tabel A.2: Omschrijvingen en voorbeelden gevolgklasse CC3 overgenomen uit Tabel B1 in NEN-EN 1990 (2019) en Tabel NB.24 in NEN-EN 1990/NB (2019) .

Norm	Omschrijving	Voorbeelden
NEN-EN 1990 (2019)	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, of zeer grote economische gevolgen, sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving.	Tribunes, openbare gebouwen waarbij de gevolgen van het bezwijken groot zijn (bijv. een concertzaal)
Nederlandse NB (2019)	Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens ⁶ , of zeer grote economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving	Bouwwerken met de bestemming publieksfunctie (bijv. onderwijsgebouwen stadions, concerthallen, tribunes), waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen.

Naast de Eurocodes zijn er andere normen die betrekking hebben op tribunes. Nagegaan is wat deze normen aangeven voor gevolgklassen. NEN-EN 13200-1 (2019) geeft bepalingen voor de inrichting van tribunes, hierin worden geen bepalingen gegeven over de gevolgklasse. NEN-EN 13200-6 (2020) geeft richtlijnen voor demonteerbare tribunes, ook hierin worden geen bepalingen over de te hanteren gevolgklasse gegeven. NEN-EN 17879 (2024) geeft bepalingen voor de beoordeling van event constructies⁷. Tijdelijke demonteerbare tribunes worden daarbij ook expliciet benoemd, waarbij wordt opgemerkt dat een tijdelijke tribune slechts één rij staande of zittende toeschouwers per niveau heeft. NEN-EN 17879 (2024) specificeert gevolgklasse CC2 voor event constructies. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt naar het aantal personen dat gelijktijdig in gevaar loopt op een event constructie. Aangezien NEN-EN 17879 (2024) voor wat betreft de constructieve veiligheid NEN-EN 1990 volgt, geldt dus ook voor tijdelijke demonteerbare tribunes (en andere event constructies) dat gevolgklasse CC3 van toepassing als in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen.

A.3 Gebruiksklassen

EN 1991-1-1 (2002) en NEN-EN 1991-1-1 (2019) definiëren de volgende gebruiksklassen⁸, die een omschrijving geven van het soort gebruik van een ruimte:

- A – Ruimten voor wonen en huishoudelijk gebruik
- B – Kantoorruimten
- C – Ruimten waar mensen kunnen samenkomen (m.u.v. de ruimten genoemd onder A, B en D)
 - o C1 – Ruimten met tafels enz. bijv. ruimten in scholen, cafés, restaurants, eetzaal, leeszaal, ontvangstruimten.
 - o C2 – Ruimten met vaste zitplaatsen, bijv. ruimten in kerken, theaters of bioscopen, conferentiezaal, collegezaal, vergaderzaal, wachtkamers, wachtkamers/ -lokale in stations.

⁶ Bedoeld zijn situaties van bouwwerken, waarin zich tegelijkertijd veel mensen kunnen ophouden en waarbij bij bezwijken van een essentieel onderdeel ineens een groot aantal mensen kan worden getroffen.

⁷ NEN-EN 17879 (2024) definieert event constructies als: “*structure to be set-up for no more than 90 days to be used for events*”.

⁸ NEN-EN 1991-1-1 (2019) maakt hierbij de opmerkingen dat:

1. In de Nationale Bijlagen andere onderverdelingen kunnen zijn gegeven voor deze gebruiksklassen.
2. Gebieden die als C2 worden gecategoriseerd, op verzoek van de opdrachtgever en/of volgens de nationale bijlage als C5 kunnen worden geclassificeerd, afhankelijk van het verwachte gebruik.

- C3 - Ruimten zonder obstakels voor rondlopende mensen, bijv. ruimten in musea, tentoonstellingsruimten enz. en toegangsruimten in openbare gebouwen en kantoren, hotels, ziekenhuizen, stationshallen.
- C4 - Ruimten ten behoeve van o.a. lichaamsbeweging, bijv. danszalen, gymnastiekzalen, toneel-/balletpodia enz.
- C5 - Ruimten waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden, bijv. in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen met inbegrip van tribunes, bordessen en toegangsruimten, stationsperrons.

- D – Winkelruimten

Tribunes vallen volgens deze definities in gebruiksklasse C2 of C5.

In de Nederlandse norm NEN 6702 (2007) vallen tribunes onder gebruiksfunctie categorie d: *“Overige gebruiksfuncties voor het personenvervoer, bijeenkomstfuncties, sportfuncties en de gebruiksfunctie “bouwwerk, geen gebouw zijnde” met een gedeelte mede bestemd voor bezoekers.”*

Binnen deze categorie d wordt expliciet een onderverdeling gemaakt tussen oppervlakken waar zitplaatsen vast aan de vloer verbonden zijn, en oppervlakken waar dit niet het geval is. Deze onderverdeling sluit aan bij de onderverdeling in NEN-EN 1991-1-1 (2019) tussen C2 en C5.

De onderverdeling in NEN 6702 (2007) volgt uit TNO rapport B-89-227 (1989), waarin wordt toegelicht dat: *“In bioskoopzalen met vaste zitplaatsen, kunnen minder mensen per vierkante meter dan op tribunes met staanplaatsen. Ook de activiteit (dansen, springen, enz.) beïnvloedt de hoogte van de belasting. Er wordt daarom onderscheid gemaakt tussen ruimten met en zonder vaste zitplaatsen.”*

De onderverdelingen gehanteerd in verschillende internationale normen zijn gespecificeerd in [Tabel A.3](#). De Nationale Bijlagen van België (NBN-EN 1991-1-1 ANB, 2007), Denemarken (DS-EN 1991-1-1 DK NA, 2013) en Spanje (UNE-EN 1991-1-1, 2019) en de nieuwe concept versie prEN 1991-1-1 (2024) hanteren dezelfde onderverdeling en omschrijvingen voor gebruiksklasse C als NEN-EN 1991-1-1 (2019). prEN 1991-1-1 (2024) specificeert wel een nieuwe gebruiksklasse S2 voor trappen en bordessen voor tribunes zonder vaste zitplaatsen die zijn aangewezen als vluchtroutes.

Uit het achtergrondrapport (CEN, 2022) bij prEN 1991-1-1 blijkt dat op basis van een analyse van 22 Nationale Bijlagen de keuze is gemaakt om geen veranderingen aan te brengen in de onderverdeling van gebruiksklasse C, zoals omschreven in NEN-EN 1991-1-1 (2019).

De Duitse Nationale Bijlage DIN-EN 1991-1-1/NA (2010) wijkt af van NEN-EN 1991-1-1 (2019). Voor subklasse C2 wordt wel dezelfde omschrijving gegeven als in NEN-EN 1991-1-1 (2019). Echter, voor subklasse C5 wordt in de Duitse NB expliciet benoemd dat het ruimten met vaste zitplaatsen betreft. NEN-EN 1991-1-1 (2019) doet geen uitspraak over het type zitplaatsen in subklasse C5. Voor ruimten waar grote mensenmassa's kunnen samenkomen zonder vaste zitplaatsen geldt in de Duitse NB subklasse C6.

De Britse Nationale Bijlage BS-EN 1991-1-1/NA (2002) hanteert drie subklassen C21, C51 en C52. De omschrijving van subklasse C21 specificeert in algemene zin dat het om ruimten gaat waar mensen samenkomen met vaste zitplaatsen. Het type ruimte wordt niet gespecificeerd. Subklasse C51 specificeert wel het type samenkomstruimten en benoemt daarbij ruimten die in NEN-EN 1991-1-1 (2019) onder subklasse C2 vallen. Daarbij wordt expliciet aangegeven dat het ruimtes zonder vaste zitplaatsen betreft, wat zowel afwijkt van de omschrijving voor klasse C5 in NEN-EN 1991-1-1 (2019) als die in de Duitse NB. Subklasse C52 heeft betrekking op podia in publieke samenkomstruimtes.

Tabel A.3: Subklassen voor tribunes in beschouwde normen.

Norm	Specifiek gebruik	Sub klasse	Voorbeeld
NEN-EN 1991-1-1 (2019) Nederlandse NB (2019) Belgische NB (2007) Deense NB (2013) Spaanse NB (2019) FprEN 1991-1-1 (2024)	Ruimten waar mensen kunnen samenkomen (met uitzondering van de onder klasse A, B en D) genoemde ruimten)	C2	Ruimten met vaste zitplaatsen, bijv. ruimten in kerken, theaters of bioscopen, conferentiezalen, collegezalen, vergaderzalen, wachtkamers, wachtkamers/ -lokalen in stations.
		C5	Ruimten waar zich grote mensenmassa's kunnen bevinden, bijv. in gebouwen voor openbare evenementen, zoals concertzalen, sporthallen met inbegrip van tribunes, bordessen en toegangsruimten, stationsperrons.
DIN EN 1991-1-1 (2010) (Duitse NB)	Rooms, assembly rooms, and public areas where people may congregate (with the exception of areas coming under category A,B,D or L).	C2	Areas with fixed seating; e.g. in churches, theatres or cinemas, convention halls, auditoriums, waiting rooms.
		C5	Areas for large gatherings of people; e.g. in buildings such as concert halls, terraces, and entrance areas as well as platforms and grandstands with fixed seats.
		C6	Areas that are regularly used by sizeable groups of people, platforms and grandstands without fixed seats.
BS EN 1991-1-1 (2002) (Britse NB)	Areas where people may congregate (with the exception of areas defined under category A,B and D)	C21	Assembly areas with fixed seating
		C51	Assembly areas without fixed seating, concert halls, bars and places of worship
		C52	Stages in public assembly areas
NEN-EN 13200-6 (2020)		C2	Areas with fixed seats
		C5	Areas subjected to overcrowding and includes stands
NEN-EN 17879 (2024)		LC2	Areas with limited and controlled public access, such as storage areas, backstage areas, side stage areas, hospitality platforms, exhibition booths and VIP-platforms, with the exception of the active viewing zones if present.
		LC3	Areas with public access such as viewing platforms where dense crowds or high loads are anticipated, hospitality platforms, exhibition booths, VIP-platforms, public walkways, stairs, escape routes, ramps and their landings and active viewing zones of areas with limited and controlled access. Stages with or without public access.

NEN-EN 13200-1 (2019) hanteert voor tribunes dezelfde gebruiksklassen als EN 1991-1-1.
NEN-EN 13200-6 (2020) specificeert voor demonteerbare tribunes gebruiksklasse C2 en C5 uit EN 1991-1-1 (2002). De omschrijvingen van deze gebruiksklassen wijken wel af van die in

EN 1991-1-1 (zie [Tabel A.3](#)). De term “overcrowding” wordt gebruikt in de omschrijving van C5, dat wordt omschreven als “greater spectator occupancy of a space than would arise during expected use”.

NEN-EN 17879 (2024) definieert voor event constructies load classes LC1, LC2, LC3 en LC4. Voor tijdelijke demonteerbare tribunes lijken LC2 en LC3 van toepassing (zie [Tabel A.3](#)), hoewel deze niet expliciet worden benoemd als voorbeelden.

Naar aanleiding van de beschouwing van de gebruiksklassen in de verschillende normen en achtergronden worden de volgende observaties gedaan:

- EN 1991-1-1 (2002) en de beschouwde Nationale Bijlagen geven geen definitie voor de term gebruiksklasse. NEN 6702 (2007) geeft wel een definitie voor de gerelateerde term gebruiksfunctie⁹. TNO beveelt aan om een definitie voor de term gebruiksklasse op te nemen in een update van NEN-EN 1991-1-1.
- De subklassen C2 en C5 die van toepassing zijn voor tribunes maken onderscheid naar het type zitplaatsen in een ruimte (vast en niet vast) en ruimten waar zich wel/niet grote mensenmassa's kunnen bevinden. Er wordt niet expliciet gemaakt wat wordt verstaan onder een grote mensenmassa. TNO beveelt aan om expliciet te maken wanneer er sprake is van een grote mensenmassa.
- Hoewel het type activiteit wel wordt benoemd als invloed op de belasting TNO rapport B-89-227 (1989) wordt deze niet (expliciet) gebruikt in de definitie van de subklassen in NEN 6702 (2007) en de huidige norm NEN-EN 1991-1-1 (2019). TNO beveelt aan om te overwegen het type activiteit dat kan voorkomen op een tribune mee te nemen in de definitie van de gebruiksklassen voor tribunes.
- De Duitse Nationale Bijlage DIN-EN 1991-1-1 (2010) maakt voor grote mensenmassa's expliciet onderscheid tussen gebieden met vaste zitplaatsen (C5) en zonder vaste zitplaatsen (C6), dit onderscheid wordt niet gemaakt in de andere beschouwde Nationale Bijlagen. Hiermee kan goed onderscheid worden gemaakt tussen tribunes met zittribunes en staantribunes, waar hogere concentraties van mensen kunnen optreden. TNO beveelt aan om een vergelijkbare differentiatie in gebruiksklassen te overwegen voor NEN-EN 1991-1-1.
- NEN-EN 13200-6 (2020) benoemt voor klasse C2 dat het hier om (demonteerbare) tribunes met vaste stoelen gaat. Gebruiksklasse C5 is in NEN-EN 13200-6 van toepassing voor gebieden waar grotere mensenmassa's kunnen optreden dan onder normaal gebruik. Het type activiteit op de tribune wordt niet gebruikt in de omschrijving van de gebruiksklassen.
- NEN-EN 17879 (2024) maakt onderscheid in subklassen op basis van de hoeveelheid mensen en de controle hierover of de mogelijkheid op grote belastingen. Ook hier speelt het type activiteit geen (expliciete) rol in de definitie.

A.4 Gebruiksbelastingen

Gebruiksbelastingen zijn variabele belastingen die het gevolg zijn van het gebruik en de bezetting van een bouwwerk. NEN-EN 1991-1-1 (2019) geeft geen expliciete definitie van het begrip gebruiksbelasting, wel wordt gespecificeerd dat gebruiksbelastingen worden ingedeeld als vrije veranderlijke belastingen. NEN-EN 1990 (2019) definieert een vrije belasting als een belasting die verscheidene ruimtelijke verdelingen over de constructie kan hebben, en een veranderlijke belasting als belasting waarvan de variatie in grootte in de tijd niet verwaarloosbaar, noch gelijkmatig is.

⁹ Definitie NEN 6702 (2007) voor gebruiksfunctie: Gedeelten van een of meer bouwwerken op een perceel of standplaats, die dezelfde gebruiksbestemming hebben en die tezamen een gebruikseenheid vormen.

NEN-EN 1991-1-1 (2019) 2.2(3) specificeert dat gebruiksbelastingen in aanmerking behoren te zijn genomen als quasi-statische belastingen¹⁰. Bij een quasi-statische belasting zijn dynamische effecten verdisconteerd in de grootte van de belasting, die als een statische belasting beschouwd kan worden. De belastingsmodellen mogen dynamische effecten bevatten indien er geen gevaar voor resonantie is of een andere aanzienlijke dynamische respons van de constructie. Indien resonantie-effecten kunnen worden verwacht, als gevolg van synchroon ritmische beweging van mensen of door dansen of springen, behoort het belastingsmodel te zijn vastgesteld door een volledig dynamische berekening (zie paragraaf A.5).

De karakteristieke waarden voor de gelijkmatig verdeelde belasting q_k van toepassing voor gebruiksklassen voor tribunes in verschillende normen zijn weergegeven in [Tabel A.4](#). NEN-EN 1991-1-1 (2019) specificeert een bereik aan gebruiksbelastingen voor subklasse C2 en C5. De andere normen geven geen bereik, maar een vaste waarde. Voor subklassen C2, C21 en d) wordt een gebruiksbelasting van 4,0 kN/m² voorgeschreven. Voor subklasse C5, C51 en d) specificeren de meeste beschouwde normen een belasting van 5,0 kN/m²; alleen FprEN 1991-1-1 (2024) hanteert 7,5 kN/m². De Duitse en Britse Nationale Bijlage specificeren $q_k = 7,5$ kN/m² respectievelijk voor subklasse C6 en C52.

De karakteristieke waarden voor q_k in NEN 6702 (2007) zijn gebaseerd op TNO rapport B-89-227 (1989). In dat rapport wordt gesteld dat de vloerbelasting in zalen en op tribunes voornamelijk wordt bepaald door het gewicht van de aanwezige personen. Op basis van de resultaten van Sentler (1976) wordt gesteld dat met toenemend aantal mensen een soort vereffeningseffect optreedt, waarbij de statische massa van de menigte groter wordt, maar het dynamische effect van de activiteit afneemt. Sentler (1976) stelt echter dat dit effect niet is waargenomen voor springen op de plaats. Daarnaast zijn de bevindingen van Sentler (1976) gebaseerd op een toename van 1 naar 4 personen, waarvan de vraag is of de bevindingen representatief zijn voor een menigte.

Tabel A.4: De karakteristieke waardes voor de verdeelde belasting q_k [kN/m²] in verschillende normen.

Norm	C2	C21	d)	LC2	C5	C51	d)	LC3	C52	C6
NEN-EN 1991-1-1 (2019)	3,0 – 4,0	-	-		5,0 – 7,5	-	-		-	-
Nederlandse NB (2019)	4,0	-	-		5,0	-	-		-	-
NEN 6702 (2007)	-	-	4,0		-	-	5,0		-	-
Deense NB (2013)	4,0	-	-		5,0	-	-		-	-
Belgische NB (2007)	4,0	-	-		5,0	-	-		-	-
Spaanse NB (2019)	4,0	-	-		5,0	-	-		-	-
Duitse NB (2010)	4,0	-	-		5,0	-	-		-	7,5
Britse NB (2002)	-	4,0	-		-	5,0	-		7,5	-
FprEN 1991-1-1 (2024)	4,0	-	-		7,5	-	-		-	-
NEN-EN 13200-6 (2020)	4,0				5,0					
NEN-EN 17879 (2024)	-	-	-	3,5	-	-	-	5,0	-	-

¹⁰ NEN-EN 1990 (2019): Quasi-statische belasting: Een dynamische belasting die door een gelijkwaardige statische belasting in een statisch model wordt gerepresenteerd.

Paloheimo [18] Activiteit	Maximaal waargenomen belasting
dansen	2,9 - 5,0
springen	2,3 kN/m ²
stilstaande menigte	5,5 kN/m ²
party	4,0 kN/m ²
party in ruimte die gedeeltelijk met stoelen is gevuld	2,4 kN/m ²
opstaan uit stoelen	3,4 kN/m ²

Figuur A.1: Tabel met resultaten over de vloerbelasting door bewegingen van personen van Paloheimo en Ollila (1973), overgenomen uit TNO rapport B-89-227 (1989).

Op basis van resultaten door Paloheimo en Ollila (1973), weergegeven in [Figuur A.1](#), wordt in TNO rapport B-89-227 (1989) geconcludeerd dat de grootste waargenomen belasting door een stilstaande menigte wordt veroorzaakt. Het onderzoek van Paloheimo en Ollila (1973) kon niet worden achterhaald, het is niet bekend op basis van welke uitgangspunten de waargenomen belastingen in dit onderzoek zijn bepaald.

Op basis van deze resultaten concludeert TNO rapport B-89-227 (1989) dat de maximale belasting die voor het ontwerp moet worden gehanteerd, slechts in beperkte mate wordt beïnvloed door het soort activiteit. De reden die hiervoor wordt gegeven is dat er een soort vereffening optreedt tussen de concentratie van personen en de mate van activiteit van deze personen. TNO rapport B-89-227 (1989) maakt het volgende onderscheid:

- ruimten waar sterke concentraties van personen mogen worden verwacht (5 kN/m²),
- ruimten met vaste of verwijderbare zitplaatsen waar dynamische belastingen kunnen optreden (5 kN/m²) en
- ruimten met vast aan de vloer verbonden stoelen (4 kN/m²).

De volgende observaties worden hierbij gedaan:

- De gespecificeerde belasting van 5 kN/m² voor ruimten waar sterke concentraties van personen voorkomen is kleiner dan de maximaal waargenomen belasting van 5,5 kN/m² door Paloheimo en Ollila (1973).
- De gespecificeerde belasting van 4 kN/m² voor ruimten met vast aan de vloer verbonden stoelen omhult de maximaal waargenomen belastingen voor de verschillende activiteiten uit het onderzoek van Paloheimo en Ollila (1973), met uitzondering van de 5,5 kN/m² waargenomen voor een stilstaande menigte.
- TNO rapport B-89-227 (1989) specificeert ook een belasting van 5 kN/m² voor ruimten waar dynamische belastingen kunnen optreden, deze classificatie is niet overgenomen in NEN 6702 (2007) en daaropvolgende normen.

Uit het achtergrondrapport (CEN, 2022) bij prEN 1991-1-1 blijkt dat de keuze voor de gebruiksbelastingen gebaseerd is op een vragenlijst aan de landen met betrekking tot de voorkeur voor de te hanteren waarde. Zowel voor gebruiksklasse C2 als C5 hebben 17 van de

22 landen gekozen voor de hoogste waarde van het bereik gespecificeerd in NEN-EN 1991-1-1 (2019). De meest gekozen waarde van $7,5 \text{ kN/m}^2$ voor gebruiksklasse C5 komen overeen met de gebruiksbelasting die worden gespecificeerd in de Duitse NB, voor gebruiksklasse C6, en de Britse Nationale Bijlage, voor gebruiksklasse C52. De achtergrond van de gebruiksbelastingen in de Duitse en Britse Nationale Bijlage zijn niet bekend bij ons.

NEN-EN 13200-1 (2019) verwijst naar EN 1991-1-1 (2002) voor gebruiksbelastingen. NEN-EN 13200-6 (2020) specificeert dezelfde gebruiksbelastingen voor C2 en C5 als in NEN-EN 1991-1-1 (2019). NEN-EN 17879 (2024) geeft voor event constructies met gebruiksklasse LC2 een gebruiksbelasting van $3,5 \text{ kN/m}^2$, en bij gebruiksklasse LC3 een gebruiksbelasting van $5,0 \text{ kN/m}^2$.

Op basis van het overzicht van de gebruiksbelastingen in de verschillende normen en achtergronden worden de volgende observaties gedaan:

- In TNO rapport B-89-227 (1989) is bij de bepaling van de gebruiksbelastingen ervan uitgegaan dat bij grote concentraties van mensen de effecten van dynamische belastingen klein zijn. Toch doet TNO rapport B-89-227 (1989) wel een voorstel voor de aan te houden belasting voor ruimten waar dynamische belastingen kunnen optreden. Deze gebruiksdefinitie is echter niet overgenomen in NEN 6702 (2007) en daaropvolgende normen. TNO beveelt aan om de mogelijkheid van dynamische belastingen op tribunes nogmaals te overwegen in de definitie van de gebruiksklassen.
- EN 1991-1-1 (2002) hanteert een bereik aan gebruiksbelastingen voor klasse C2 ($3,0 - 4,0 \text{ kN/m}^2$) en klasse C5 ($5,0 - 7,5 \text{ kN/m}^2$). De meeste Nationale Bijlagen hanteren een belasting van $4,0 \text{ kN/m}^2$ voor gebruiksklasse C2 en een belasting van $5,0 \text{ kN/m}^2$ voor klasse C5. De Duitse en Britse Nationale Bijlage specificeren $q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2$ respectievelijk voor subklasse C6 en C52. De achtergrond van deze hogere gebruiksbelastingen is niet bekend bij ons. In FprEN 1991-1-1 (2024) is op basis van een vragenlijst aan de deelnemende landen ervoor gekozen om een vaste waarde te hanteren. Voor klasse C2 en C5 zijn deze waarden de bovengrens van het bereik gespecificeerd in EN 1991-1-1 (2002).

A.5 Dynamische effecten

Naast de definitie van gebruiksbelastingen wordt in de normen aandacht besteed aan dynamische effecten. Volgens NEN-EN 1991-1-1 (2019) 6.3.1.1 (2)P moeten, onafhankelijk van de classificatie van de ruimten en de daarvoor gedefinieerde gebruiksbelastingen, dynamische effecten in aanmerking worden genomen waar te verwachten is dat het gebruik aanzienlijke dynamische effecten zal teweegbrengen. NEN-EN 1991-1-1 (2019) geeft criteria wanneer er geen dynamische analyse benodigd is, maar specificeert niet wanneer dit wel nodig is.

In het achtergrondrapport (CEN, 2022) bij FprEN 1991-1-1 (2024) is op basis van een review van 22 Nationale Bijlagen een overzicht gemaakt van de punten die in deze Nationale Bijlagen worden behandeld met betrekking tot dynamische effecten. Dit zijn de volgende punten:

1. Achtergrondinformatie over ritmische belasting door menigten, inclusief gesynchroniseerde bewegingen
2. Informatie over trillingen en resonantie-effecten:
 - Wanneer resonantie-effecten kunnen worden verwaarloosd
 - Wanneer resonantie-effecten in overweging moeten worden genomen

- Hoe resonantie van de constructie kan worden vermeden
- 3. Informatie over dynamische analyses:
 - Wanneer een dynamische analyse niet nodig is
 - Wanneer een dynamische analyse moet worden uitgevoerd
- 4. Specifieke informatie over het modelleren en analyseren van ritmische belasting door menigten:
 - Belastingmodellen
 - Parameters voor het afleiden van de karakteristieke ritmische belasting door menigten
 - Berekening van belastingseffecten en het bieden van een methode (equivalente statische belastingsmethode) voor constructies die aan specifieke voorwaarden voldoen
 - Maximale effect van de verticale ritmische belasting door menigten
 - Berekening van de versnelling van de constructie
- 5. Specifieke informatie over:
 - Dynamische belastingen door machines
 - Lichte constructies
 - Constructies met grote overspanningen

In het achtergrondrapport (CEN, 2022) bij FprEN 1991-1-1 (2024) is een overzicht met gerelateerde bepalingen uit de verschillende Nationale Bijlagen gemaakt. Op basis van dit overzicht zijn een aantal aanpassingen gemaakt aan de bepalingen over dynamische effecten in FprEN 1991-1-1 (2024), deze aangepaste bepalingen zijn gegeven in Tabel A.5.

De punten 1-5 worden in deze paragraaf gebruikt om de tegen de bepalingen in NEN-EN 1990 (2019) en NEN-EN 1991-1-1 (2019) aan te leggen, dit is weergegeven in Tabel A.6.

Tabel A.5: Aanpassingen in FprEN 1991-1-1 (2024) met betrekking tot dynamische effecten.

Artikel	Omschrijving
6.2.1(2)	If there is no risk of resonance or other significant dynamic response of the structure, imposed loads may be taken into account as quasi-static actions (see EN 1990:2023, 3.1.3.17). NOTE 1 For the treatment of the dynamic part of a quasi-static action, see EN 1990:2023, 7.1.3(5). NOTE 2 For synchronized rhythmic crowd loads, see 6.2.2.
6.2.1(3)	In case of risk of resonance or other significant dynamic response of the structure, imposed loads shall be classified as dynamic actions.
6.2.1(4)	Resonance effects may be neglected if the accelerations are lower than the acceleration limits relevant for user comfort and functionality. NOTE According to EN 1990, for specific types of structures or structural members having typical mass and damping properties, the acceleration limits can be assumed met when the natural frequency of vibrations is kept above appropriate values. For relevant limits and values, see EN 1990:2023, A.1.8.3.
6.2.2(1)	(1) If resonance effects from synchronised rhythmic crowd loads cannot be neglected (see 6.2.1(4)), a more refined analysis of the dynamic response of the structure should be performed according to EN 1990, the relevant parts of EN 1991 and the other Eurocodes. NOTE 1 See also EN 1990:2023, A.1.8.3 NOTE 2 Further information on the procedure to be used for structures that are susceptible to dynamic excitation can be given in the National Annex.

Tabel A.6: Bepalingen in NEN-EN 1990 (2019) en NEN-EN 1991-1-1 (2019) over dynamische effecten¹¹.

Bepalingen onderverdeeld naar overzichtspunten
1. Achtergrondinformatie over ritmische belasting door menigten, incl. gesynchroniseerde bewegingen
Geen bepalingen
2. Informatie over trillingen en resonantie-effecten
NEN-EN 1991-1-1 (2019) 2.2(3): De belastingsmodellen mogen dynamische effecten bevatten indien er geen gevaar voor resonantie is of een andere aanzienlijke dynamische respons van de constructie, zie EN 1992 t.m. EN 1999. Indien resonantie-effecten kunnen worden verwacht, als gevolg van synchroon ritmische beweging van mensen of door dansen of springen, behoort het belastingsmodel te zijn vastgesteld voor een gespecialiseerde dynamische berekening (volledig dynamische berekening).
3. Informatie over dynamische analyses
NEN-EN 1991-1-1/NB (2019) 2.2(3): Een volledig dynamische berekening is niet vereist voor: a) met betrekking tot de uiterste grenstoestand: — relatief kleine constructiedelen met weinig damping en belast door ten hoogste 10 personen waarvoor de eigen frequentie niet kleiner is dan 8 Hz en bovendien is gerekend met een naar boven gerichte belasting van 50 % van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting; b) met betrekking tot de bruikbaarheidsgrenstoestand: — vloeren in woningen, kantoren e.d. waarvan de laagste eigen frequentie niet kleiner is dan 3 Hz of de representatieve waarden van het eigen gewicht en de quasi-blijvende belasting groter zijn dan 5 kN/m ² of 150 kN totaal per ligger; — vloeren belast door dansen of springen, waarvoor de laagste eigen frequentie niet kleiner is dan 5 Hz.
NEN-EN 1991-1-1 (2019) 2.2(5): Belastingen die een aanzienlijke versnelling van de constructie of de constructieve elementen teweegbrengen, moeten zijn aangemerkt als dynamische belastingen en moeten in aanmerking zijn genomen gebruikmakend van een dynamische berekening.
NEN-EN 1991-1-1 (2019) 3.3.1(4): Bij constructies die gevoelig zijn voor trillingen, behoren, waar van toepassing, dynamische modellen van de gebruiksbelastingen te zijn beschouwd. De ontwerpwerkwijze wordt gegeven in EN 1990, 5.1.3.
4. Specifieke informatie over het modelleren en analyseren van ritmische belasting door menigten
NEN-EN 1991-1-1/NB (2019) Tabel NB.1: Bij tribunes moet bovendien rekening zijn gehouden met een gelijkmatig verdeelde opwaartse gebruiksbelasting gelijk aan 50% van de neerwaarts gerichte gebruiksbelasting. Deze belasting brengt het dynamisch effect in rekening dat kan optreden als gevolg van de bewegende massa van mensen (opspringen). De neerwaartse en opwaartse gebruiksbelastingen moeten afzonderlijk als extreme veranderlijke belasting worden beschouwd. Tevens moet bij de neerwaartse gebruiksbelasting op tribunes gelijktijdig rekening zijn gehouden met een veranderlijke gelijkmatig verdeelde horizontale belasting die kan optreden als gevolg van de bewegende mensenmassa. Deze horizontale belasting bedraagt 10% van de verticale belasting en moet wat betreft de richting zijn beschouwd als een vrije belasting. Door het in rekening brengen van de opwaartse en gelijkmatige verdeelde horizontale belasting als statische belasting wordt voorkomen dat voor tribunes dynamische berekeningen moeten worden gemaakt om het effect van een bewegende mensenmassa te bepalen op de sterkte van de tribune.
NEN-EN 1990 (2019) 5.1.3(3): Wanneer het passend is om dynamische belastingen als quasi-statisch te beschouwen, mogen de dynamische delen in aanmerking zijn genomen, ofwel door opname daarvan in de statische waarden, ofwel door toepassing van gelijkwaardige dynamische vergrotingsfactoren op de statische belastingen.
NEN-EN 1990 (2019) 5.1.3(5): Wanneer van toepassing (bijvoorbeeld bij trillingen veroorzaakt door wind- of aardbevingsbelastingen) mogen de belastingen door middel van een frequentieberekening gebaseerd op geometrisch-lineair gedrag en lineair-materiaalgedrag zijn bepaald. Voor constructies die een regelmatige geometrische, stijfheids- en massaverdeling hebben, op voorwaarde dat enkel de laagste frequentie van toepassing is, mag een expliciete frequentieberekening zijn vervangen door een berekening met gelijkwaardige statische belastingen.
NEN-EN 1990 (2019) 5.1.3(6): De dynamische belastingen mogen ook, wanneer passend, zijn geformuleerd in termen van tijdsfuncties of in het frequentiedomein, en de respons van de constructie mag door daartoe geëigende methoden zijn bepaald.
5. Specifieke informatie
Geen bepalingen

¹¹ De tabel geeft bepalingen die betrekking hebben op UGT. Bepalingen die betrekking hebben op BGT (bijvoorbeeld NEN-EN 1990 bijlage A.1.4.4 Trillingen) zijn niet gespecificeerd.

NEN-EN 13200-1 (2019) verwijst naar EN 1991-1-1 voor dynamische effecten. NEN-EN 13200-6 (2020) en NEN-EN 17879 (2024) specificeren het gebruik van een horizontale belasting die 10% van de verticale gebruiksbelasting bedraagt om de effecten van bewegende mensenmassa's in rekening te brengen. Dit komt overeen met de horizontale belasting voorgeschreven in NEN-EN 1991-1-1/NB (2019). NEN-EN 13200-6 (2020) en NEN-EN 17879 (2024) specificeren echter geen opwaartse belasting van 50%.

Op basis van de informatie over bepalingen met betrekking tot dynamische effecten gegeven in deze paragraaf worden de volgende observaties gedaan:

- De Nederlandse Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 (2019) specificeert concrete voorwaarden waaronder een dynamische analyse niet nodig is, en geeft aanvullende bepalingen bij de gebruiksbelastingen, specifiek voor tribunes, om dynamische effecten quasi-statisch te bepalen. NEN-EN 1991-1-1 (2019) geeft geen concrete voorwaarden wanneer een dynamische analyse moet worden uitgevoerd. Met deze combinatie van bepalingen worden tribune-elementen in de praktijk waarschijnlijk zelden met een dynamische analyse berekend. Bepalingen die concrete voorwaarden geven wanneer een dynamische analyse moet worden uitgevoerd, kunnen tegenaan dat tribune-elementen quasi-statisch worden doorgerekend, waar het wenselijk is dat een dynamische analyse wordt uitgevoerd. TNO beveelt aan om expliciete voorwaarden op te nemen waarbij een dynamische analyse dient te worden uitgevoerd. Ook moet dan gespecificeerd worden wat bedoeld wordt met een dynamische analyse.
- De voorwaarden die de Nederlandse Nationale Bijlage NEN-EN 1991-1-1/NB (2019) geeft waaronder een dynamische berekening niet vereist is voor UGT, maken niet expliciet wat wordt verstaan onder relatief kleine constructiedelen en weinig demping. Daarnaast is de bepaling dat moet worden gerekend met een naar boven gerichte belasting niet een voorwaarde, maar een berekening die moet worden uitgevoerd als een volledig dynamische berekening niet vereist is. Het zinsdeel "*en bovendien ... neerwaarts gerichte gebruiksbelasting*" in NEN-EN 1991-1-1/NB 2.2(3) kan beter verwijderd worden, ook omdat deze opmerking al wordt gemaakt in de voetnoten van Tabel NB.1 in NEN-EN 1991-1-1/NB.
- De achtergrond van NEN-EN 1991-1-1/NB (2019) 2.2(3) over wanneer een dynamische berekening niet nodig is, en de voetnoot in Tabel NB.1 over gebruiksbelastingen, zijn niet bekend bij ons. Door middel van berekeningen met een dynamisch model van een tribune-element kunnen deze richtlijnen onderzocht worden, en kan worden bepaald of deze afdoende zijn of aanpassing behoeven.
- FprEN 1991-1-1 (2024) hanteert een piekversnellingcriterium voor comfort als criterium voor het beschouwen van resonantie-effecten, en specificeert dat als de eigenfrequentie boven toepasselijke waarden wordt gehouden hieraan wordt voldaan. NEN-EN 1990 A.1.4.4 en NEN-EN 1991-1-1 2.(3) specificeren een eigenfrequentie van 5 Hz als bruikbaarheidsgrens voor springen (zie Tabel A.6). Deze eigenfrequentie ligt lager dan de eigenfrequentie van 8 Hz die wordt gespecificeerd in NEN-EN 1991-1-1 als grens waarboven een dynamische analyse niet nodig is voor toetsing van de uiterste grenstoestand.
- NEN-EN 13200-6 (2020) en NEN-EN 17879 (2024) schrijven een horizontale belasting voor die 10% van de verticale gebruiksbelasting bedraagt. Dit komt overeen met NEN-EN 1991-1-1 (2019). Beide normen geven echter geen bepaling voor de opwaartse kracht die wel wordt gespecificeerd in NEN-EN 1991-1-1 (2019). Beide normen geven geen verklaring waarom wordt afgeweken van NEN-EN 1991-1-1 (2019) op dit punt.

A.6 Samenvatting

Op basis van het overzicht van normbepalingen met betrekking tot de belasting door springende mensen op tribunes worden de volgende conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan:

- De subklassen C2 en C5 in NEN-EN 1991-1-1 (2019) die van toepassing zijn voor tribunes maken onderscheid naar het type zitplaatsen in een ruimte (vast en niet vast) en ruimten waar zich wel/niet grote mensenmassa's kunnen bevinden. De redenen voor dit onderscheid zijn (1) de potentiële dichtheid van personen op een tribune en (2) de beperking van bewegingsvrijheid van personen. Beide aspecten zijn niet exclusief verbonden aan de aanwezigheid van vaste zitplaatsen. TNO beveelt aan om de redenen (personendichtheid en bewegingsvrijheid) te gebruiken in de definitie van de gebruiksklassen, en deze daarin expliciet te maken.
- Hoewel het type activiteit wel wordt benoemd als invloed op de belasting in TNO rapport B-89-227 (1989) wordt deze niet (expliciet) gebruikt in de definitie van de subklassen in NEN 6702 (2007), de huidige norm NEN-EN 1991-1-1 (2019) of andere Nationale Bijlagen bij EN 1991-1-1 (2002). TNO beveelt aan om het type activiteit dat kan voorkomen op een tribune mee te nemen in de definitie van de gebruiksklassen voor tribunes.
- De Duitse Nationale Bijlage DIN-EN 1991-1-1 (2010) maakt voor grote mensenmassa's expliciet onderscheid tussen gebieden met vaste zitplaatsen (C5) en zonder vaste zitplaatsen (C6). Hiermee kan goed onderscheid worden gemaakt tussen zittribunes en staantribunes, waar hogere concentraties van mensen kunnen optreden. TNO beveelt aan om een vergelijkbare differentiatie in gebruiksklassen te overwegen voor NEN-EN 1991-1.
- EN 1991-1-1 (2002) hanteert een bereik aan gebruiksbelastingen voor klasse C2 (3,0 – 4,0 kN/m²) en klasse C5 (5,0 – 7,5 kN/m²). De meeste Nationale Bijlagen hanteren een belasting van 4,0 kN/m² voor gebruiksklasse C2 en een belasting van 5,0 kN/m² voor klasse C5. De Duitse en Britse Nationale Bijlage specificeren $q_k = 7,5 \text{ kN/m}^2$ respectievelijk voor subklasse C6 en C52. De achtergrond van deze hogere gebruiksbelastingen is niet bekend bij ons. In FprEN 1991-1-1 (2024) is op basis van een vragenlijst aan de deelnemende landen ervoor gekozen om een vaste waarde te hanteren. Voor klasse C2 en C5 zijn deze waarden de bovengrens van het bereik gespecificeerd in EN 1991-1-1 (2002).
- De Nederlandse Nationale Bijlage bij NEN-EN 1991-1-1 (2019) bevat bepalingen om dynamische effecten quasi-statisch te benaderen, maar geeft geen concrete voorwaarden wanneer een dynamische analyse nodig is. TNO beveelt aan om concrete voorwaarden te definiëren voor het uitvoeren van een dynamische berekening.

Daarnaast zijn een aantal bevindingen gedaan met betrekking tot de normbepalingen voor tribunes waar de volgende aanbevelingen voor worden gemaakt:

- Tribunes en tribune-elementen vallen in gevolgklasse CC3 als meer dan 500 personen gelijktijdig in gevaar zijn. Hoewel niet expliciet vermeld in NEN-EN 1990 (2019), wordt aangenomen dat gevolgklasse CC2 van toepassing is als minder dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen. TNO beveelt aan om het aantal personen dat gelijktijdig gevaar loopt, waaronder sprake is van gevolgklasse CC2, expliciet te maken in een update van NEN-EN 1990 (2019).
- Voor tijdelijke tribunes (en andere tijdelijke event constructies) geldt volgens NEN-EN 17879 (2024) gevolgklasse CC2. Hierbij wordt geen onderscheid gemaakt naar het aantal personen dat gelijktijdig in gevaar loopt. TNO beveelt aan om voor de bepaling van de gevolgklasse voor tijdelijke event constructies in NEN-EN 17879

(2024) expliciet aan te sluiten bij NEN-EN 1990, en geen gevolgklasse voor te schrijven.

- EN 1991-1-1 (2002) en de beschouwde Nationale Bijlagen geven geen definitie voor de term gebruiksklasse. TNO beveelt aan om een definitie voor de term gebruiksklasse op te nemen in een update van NEN-EN 1991-1-1.
- NEN-EN 13200-6 (2020) en NEN-EN 17879 (2024) hebben enigszins afwijkende omschrijvingen van de gebruiksklassen C2 en C5 zoals gedefinieerd in NEN-EN 1991-1-1. Uit de omschrijvingen blijkt niet dat er (zwaarwegende) redenen zijn om een enigszins afwijkende omschrijving te hanteren. Vanuit het oogpunt van uniformiteit beveelt TNO aan dat beide normen qua definitie van gebruiksklassen voor tribunes dezelfde definitie hanteren als NEN-EN 1991-1-1, behalve als er duidelijke redenen zijn om hiervan af te wijken.
- De bepaling in NEN-EN 1991-1-1/NB 2.2(3) dat moet worden gerekend met een naar boven gerichte belasting is niet een voorwaarde, maar een berekening die moet worden uitgevoerd als een volledig dynamische berekening niet vereist is. TNO beveelt aan het zinsdeel “*en bovendien ... neerwaarts gerichte gebruiksbelasting*” in NEN-EN 1991-1-1/NB 2.2(3) te verwijderen.
- NEN-EN 13200-6 (2020) en NEN-EN 17879 (2024) schrijven een horizontale belasting voor die 10% van de verticale gebruiksbelasting bedraagt. Dit komt overeen met NEN-EN 1991-1-1 (2019). Beide normen geven echter geen bepaling voor de opwaartse kracht die wel wordt gespecificeerd in NEN-EN 1991-1-1 (2019). TNO beveelt aan dat beide normen verwijzen naar of aansluiten bij NEN-EN 1991-1-1 voor wat betreft berekeningen met een horizontale belasting en een opwaartse kracht.

Bijlage B

Typen en gebruiksvormen Nederlandse tribunes

B.1 Inleiding

Deze bijlage geeft een overzicht van de typen en de gebruiksvormen van tribunes gevonden in literatuur. Hiervoor zijn de documenten aangegeven in Tabel B.1 gebruikt. Eerst worden in paragraaf B.2 de verschillende gevonden typen tribunes toegelicht en aangegeven hoe deze tribunes behandeld worden in de normen. Daarna worden in paragraaf B.3 de gevonden gebruiksvormen van de tribunes aangegeven en toegelicht hoe hiermee wordt omgegaan in de normen.

Tabel B.1: Overzicht van beschouwde documenten voor typen en gebruiksvormen van tribunes.

Referentie	Beschrijving
NEN-EN 1990 (2019)	Eurocode: Grondslagen voor het constructief ontwerp
NEN-EN 1990/NB (2019)	Nederlandse nationale bijlage bij EN 1990
NEN-EN 13200-1 (2020)	Toeschouwersaccommodaties – Deel 1: Algemene kenmerken voor de inrichting van tribunes
NEN-EN 13200-3 (2020)	Toeschouwersaccommodaties – Deel 3: Scheidingselementen - Eisen
NEN-EN 17879 (2024)	Event structures – Safety requirements
NEN-EN 1991-1-1 (2019)	Eurocode 1: Belastingen op constructies – Deel 1-1: Algemene belastingen
NEN-EN 1991-1-1/NB (2019)	Nederlandse nationale bijlage bij EN 1991-1-1
Green Book	Guide to Safety at Sports Grounds
UEFA safety regulations	UEFA Stadium infrastructure Regulations

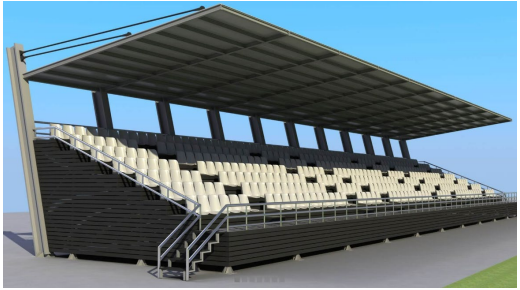
B.2 Types tribunes

Volgens NEN-EN 13200-1 bevatten toeschouwersaccommodaties voor permanente en tijdelijke evenementen een ruimte waar toeschouwers het evenement kunnen bekijken. De constructie die deze ruimte biedt, wordt een tribune genoemd. Er zijn verschillende soorten tribunes, die verschillen door:

- het al dan niet bevatten van zit- en/of staanplaatsen
- de mogelijkheid om de tribune te verplaatsen en
- de optie om de tribune in te klappen.

Zit- en staanplaatsen kunnen zich bevinden op een horizontaal oppervlak, een kijkhelling, of op rijen. Zitplaatsen kunnen voorzien worden door individuele stoelen, banken of trappen, zoals weergegeven in Tabel B.2.

Tabel B.2: Tribunes met zitplaatsen.

Type tribune (bron)	Afbeelding tribune van bron
Tribune met zitplaatsen door individuele stoelen (Integral Grandstand, 2021)	
Tribune met zitplaatsen door banken (W&H, 2024)	
Tribune met zitplaatsen door trappen (The Why Factory Tribune, 2024)	

Hierbij moet worden opgemerkt dat hoewel plaatsen met banken bedoeld zijn om op te zitten, banken toeschouwers de optie geeft om erop te staan. Een voorbeeld is te zien het Riwal Hoogwerkers stadion van FC Dordrecht in Figuur B.1.



Figuur B.1: Tribune met zitplaatsen door banken wordt gebruikt om te staan (PITCH, 2018).

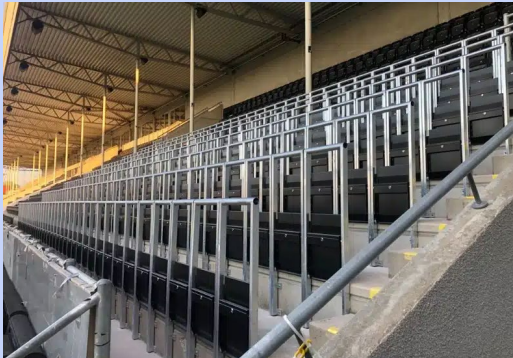
Staanplaatsen kunnen worden voorzien door trappen en hellingen, zoals weergegeven in Tabel B.3. Met de staanplaatsen op trappen kan onderscheid worden gemaakt tussen staanplaatsen zonder 'barriers' en staanplaatsen met 'crush barriers'. De term 'barriers' is volgens NEN-EN 13200-3 gedefinieerd als een element van de constructie, permanent of tijdelijk, bedoeld om te voorkomen dat personen vallen of om personen tegen te houden, te stoppen, te geleiden of te scheiden. Een 'crush barrier' is een 'barrier' die, samen met een gepaste afstand, toeschouwers beschermt tegen verplettering in toeschouwersaccommodaties met staanruimtes. Dit wordt ook 'safe-standing' genoemd.

Volgens Green Book kunnen staanplaatsen zonder crush-barriers niet als veilig worden beschouwd, tenzij de capaciteit op een zodanig niveau is ingesteld dat het risico tot een minimum wordt beperkt. Informatie over de capaciteit is te vinden in paragraaf D.3.

Opgemerkt wordt dat bij culturele evenementen, staanplaatsen aangewezen gebieden zijn voor het podium, en dus geen onderdeel uitmaken van de tribunes.

Verder wordt opgemerkt dat volgens de UEFA safety regulations staanplaatsen alleen mogen worden toegepast bij competities van stadions in categorie 1, wat volgens dit document stadions zijn met een minimumcapaciteit van 200 toeschouwers, en een maximumcapaciteit van 1500 toeschouwers. Anders worden enkel zitplaatsen toegestaan.

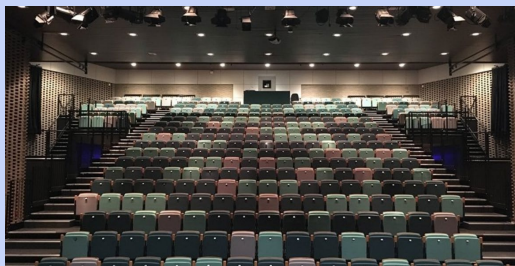
Tabel B.3: Tribunes met staanplaatsen (Pitchd Groundhoppin, 2018, W&H Sports, z.d., Racecourses.net, z.d.).

Type tribune (bron)	Afbeelding tribune van bron
Tribune met staanplaatsen door trappen, zonder 'safe-standing' (PITCHD, 2018)	
Tribune met staanplaatsen door trappen, inclusief 'safe-standing' (W&H sports, 2024)	
Tribune met staanplaatsen door (Racecourses, 2020)	

Naast zit- en staanplaatsen, kunnen tribunes verplaatsbaar en inklapbaar zijn, zoals weergegeven in Tabel B.4. Mobiele tribunes kunnen met behulp van wielen gekanteld en verplaats worden. Opgemerkt moet worden dat deze tribunes niet als onderdeel van de constructie kan worden beschouwd. Inklapbare tribunes worden telescooptribunes genoemd. De termen 'uitschuiftribune', 'inschuiftribune' en 'inklapttribune' worden hiervoor ook gebruikt.

Verder zijn er ook Skybox / VIP-tribunes, wat privéruimten zijn op verhoogde verdiepingen in een stadion met uitzicht op het veld of de baan. Deze is ook weergegeven in Tabel B.4.

Tabel B.4: Overige tribunes (W&H Sports, z.d., COS Tribune, z.d., AGC Glass Europe, z.d.)

Type tribune (bron)	Afbeelding tribune van bron
Mobiele tribune (W&H sports, 2024)	
Telescoop tribunes (COS, 2024)	
Skyboxes /VIP-tribunes	

In EN 1991-1-1:2002 en NEN-EN 1991-1-1+C1+C11:2019 wordt geen onderscheid gemaakt tussen de verschillende types tribunes. Hierbij wordt alleen gedifferentieerd in gebruiksvormen. De gevonden gebruiksvormen worden in de volgende paragraaf (paragraaf B.3) besproken.

B.3 Gebruiksvormen tribunes

De gevonden gebruiksvormen voor tribunes in NEN-EN 1991-1-1 (2019) en NEN-EN 17879 (2024) zijn:

- Theaters
- Bioscopen
- Concertzalen
- Conferentiezalen
- Stadions
- Sporthallen
- Tijdelijke evenementen

Tribunes kunnen worden gebruikt voor ruimtes waar mensen samenkomen voor sociale, culturele, of recreatieve activiteiten, zoals in theaters, bioscopen, concertzalen en conferentiezalen. Verder kunnen tribunes worden gebruikt voor ruimtes waar

sportactiviteiten (professioneel of amateursport) plaatsvinden, zoals in stadions en sporthallen. Ook worden tribunes gebruikt op locaties voor tijdelijk gebruik, zoals festivals, openluchtconcerten of sporttoernooien.

De norm maakt onderscheid tussen de gebruiksvormen van tribunes en koppelt deze aan gebruiksklassen. De onderverdeling van de gebruiksvormen in relatie tot de gebruiksklassen is aangegeven in Tabel B.5, waarbij:

- Gebruiksklasse C2 de ruimten omvat met vaste zitplaatsen
- Gebruiksklasse C5 de ruimtes omvat waar grote mensenmassa's zich kunnen bevinden, zoals stadions
- Gebruiksklasse LC3, gedefinieerd in NEN-EN 17879 (2024), die tijdelijke voorzieningen omvat voor evenementen met publieke toegang, waar grote mensenmassa's kunnen worden verwacht.

Operagebouwen zijn voor de compleetheid ook aangegeven in [Tabel B.5](#) omdat deze worden benoemd in NEN-EN 13200-1 (2019). De norm geeft aan deze hierop niet van toepassing is – operagebouwen vallen dus buiten de scope van NEN-EN 13200-1. Er wordt dus niet expliciet aangegeven onder welke categorie deze vallen. De verwachting is dat deze onder C2 gecategoriseerd worden.

Tabel B.5: Gebruiksvormen versus gebruiksklassen

Gebruiksvormen	NEN-EN 1991-1-1 (2019)	NEN-EN 17879 (2024)
Theaters, bioscopen, conferentiezalen, collegezalen	C2	n.v.t
Stadions, sporthallen	C5	n.v.t
Tijdelijke evenementen	n.v.t	LC3
Operagebouwen	n.v.t	n.v.t

Bijlage C

Metingen aan Nederlandse stadiontribunes

C.1 Inleiding

Deze bijlage geeft een overzicht van de metingen uitgevoerd door AbtWassenaar, ABT en RHDHV aan verschillende tribunes in voetbalstadions in Nederland. [Tabel C.1](#) benoemt de beschouwde rapportages.

Tabel C.1: Overzicht van beschouwde rapportages.

Referentie	Titel document
abtWassenaar (2022a)	Tribune-elementen analyse metingen – Stadion FC Groningen
ABT (2022b)	Trillingsonderzoek tribunes – Meting en analyse meting Wedstrijd AZ-SCH
ABT (2022c)	Trillingsonderzoek tribunes – Meting en analyse meting Wedstrijd SCH-GAE
RHDHV (2022b)	Bepaling belastingeffect toeschouwers met trillingsmeting – Johan Cruijff Arena
RHDHV (2022c)	Bepaling belastingeffect toeschouwers met trillingsmeting – De Galgenwaard

C.2 Meetopzet

De metingen zijn uitgevoerd in verschillende Nederlandse stadions. [Tabel C.2](#) benoemt de stadions, de wedstrijden en de datums waarop de metingen zijn gedaan. [Tabel C.3](#) geeft informatie over het vak en het type tribune waar de metingen op zijn uitgevoerd. Informatie over de dimensies, massa en laagste eigenfrequentie is gegeven in [Tabel C.4](#). Deze worden hier verder toegelicht.

Tabel C.2: Informatie over de evenementen waar de metingen zijn uitgevoerd.

Referentie	Stadion	Wedstrijd	Datum
abtWassenaar (2022a)	Euroborg	FC Groningen – NEC	12 maart 2022
		FC Groningen – Ajax	4 april 2022
ABT (2022b)	AFAS Stadion	AZ – SC Heerenveen	22 mei 2022
ABT (2022c)	Abe Lenstra Stadion	SC Heerenveen – Go Ahead Eagles	15 mei 2022
RHDHV (2022a)	Johan Cruijff Arena	Ajax – SC Heerenveen	11 mei 2022
RHDHV (2022b)	Galgenwaard	FC Utrecht – Vitesse	19 mei 2022

Tabel C.3: Informatie over tribunes waar metingen zijn uitgevoerd.

Referentie	Vak	Type tribune
abtWassenaar (2022a)	E/D	Zittribune met klapstoelen
ABT (2022b)	K	Zittribune
ABT (2022c)	12 (STA)	Staantribune
RHDHV (2022a)	127	Safe standing tribune met klapstoelen
	127	Safe standing tribune met klapstoelen
	128	Safe standing tribune met klapstoelen
RHDHV (2022b)	127	Zittribune

Tabel C.4: Gegevens van tribune-elementen waar metingen aan zijn uitgevoerd.

Referentie	Vak	Lengte [m]	Breedte [m]	Breedte rij [m]	Massa [kg]	Eigenfrequentie [Hz]
ABTWassenaar (2022a)	E/D	8,75	-	0,80	-	-
ABT (2022b)	K	4,15	-	0,80	-	-
ABT (2022c)	12 (STA)	8,75	-	0,80	-	-
RHDHV (2022a)	127	12,3	1,6	0,80	12800	8
	127	12,3	1,6	0,80	12800	9
	128	12,3	1,6	0,80	12800	11
RHDHV (2022b)	127	6	1,7	0,85	5000	15

In AbtWassenaar (2022a) zijn drie meetpunten aan de onderkant van het tribune-element geplaatst: een korte drukmeter aan de zijkanten en een versnellingsmeter met lange drukmeter in het midden van het element. Deze meetapparaten meten de verticale verplaatsingen links, midden en rechts én de verticale versnelling in het midden. Deze opstelling is bij beide wedstrijden toegepast. De korte drukmeters meten de relatieve verplaatsing ten opzichte van de grond. De versnellingsmeter is vastgelijmd aan het element.

ABT (2022b) plaatst ook drie meetpunten aan de onderkant van het tribune-element. Links bevindt zich een korte drukmeter. In het midden zijn een korte drukmeter, een lange drukmeter en een versnellingsmeter geplaatst. Rechts zijn een korte drukmeter, een lange drukmeter en een versnellingsmeter geplaatst. Ook is er een versnellingsmeter geplaatst op een stalen frame dat het gewicht van het tribune-element afdraagt. De korte drukmeters meten het verschil in verplaatsing ten opzichte van de grond. De versnellingsmeter is vastgelijmd aan het element.

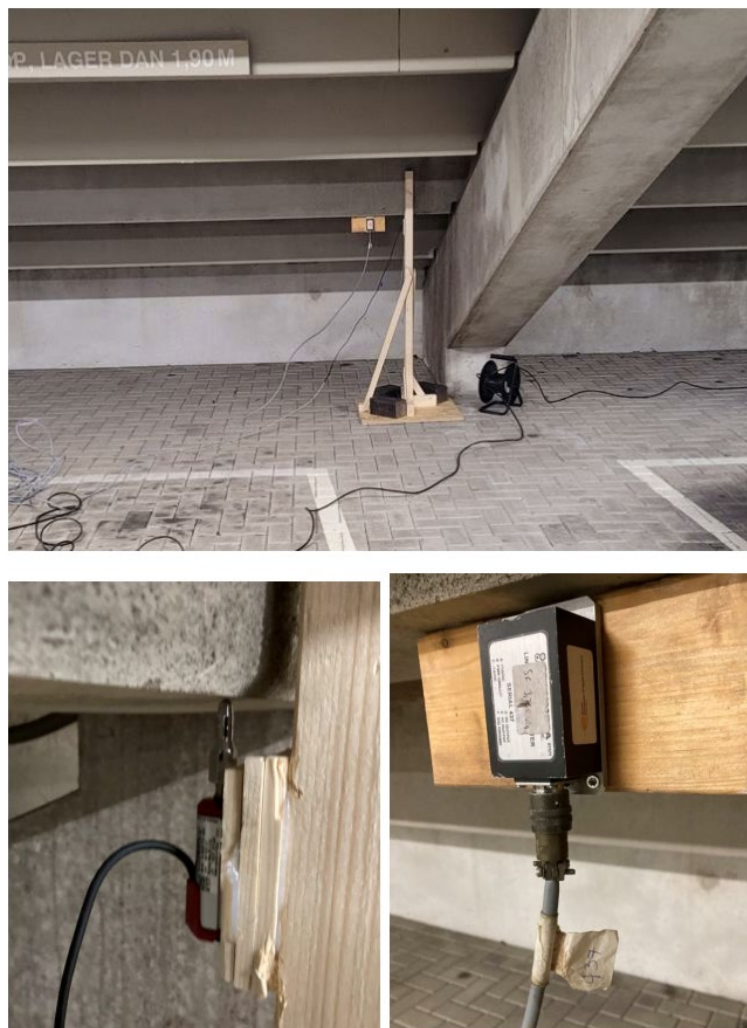
Aan de onderkant van het tribune-element uit ABT (2022c) is aan de linkerkant een korte drukmeter geplaatst. In het midden is een korte drukmeter en een versnellingsmeter geplaatst. Ook is in het midden een tweede versnellingsmeter op een stalen ligger verlijmd die zich onder het tribune-element bevindt. Aan de rechterkant zijn een korte drukmeter en een versnellingsmeter geplaatst. De stalen ligger is onderdeel van een kruisverband van staalprofielen, wat onder de tribune-elementen gesitueerd zit. De afstand vanaf de grond tot de onderkant van het tribune-element is te hoog om de relatieve verplaatsing van het

tribune-element te meten. Daarom worden de relatieve verplaatsingen vanaf de stalen ligger gemeten.

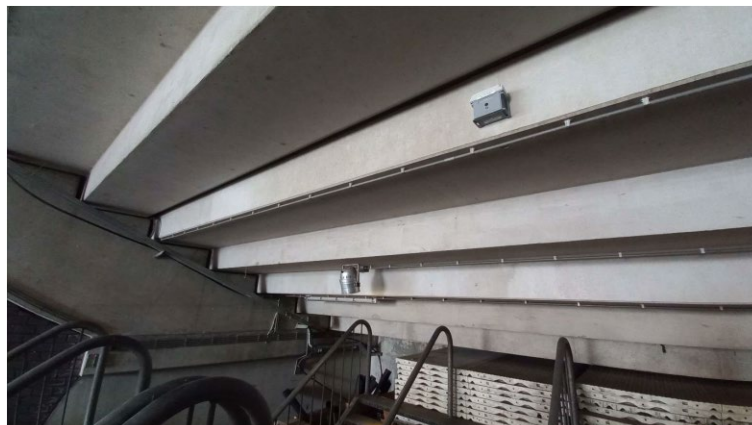
In RHDHDV (2022a) zijn drie trillingsmeters gebruikt, verdeeld over 2 vakken (2 in vak 127; 1 in vak 128). De meters zijn, in tangentiële richting, in het midden van het vak geplaatst. In de radiale richting is in vak 127 gekozen voor een tussenafstand van drie elementen. Ze zijn gemonteerd aan de onderkant van het tribune-element. De meetapparatuur meet de snelheid in triaxiale richting.

In RHDHDV (2022b) is één trillingsmeter gebruikt. De meter is halverwege de overspanning geplaatst, op de derde rij vanaf de veldzijde geteld. Het is aan de onderzijde gemonteerd. Het apparaat meet de snelheid in triaxiale richting.

Figuur C.1 en **Figuur C.2** laten een typische meetopstelling zien zoals deze gebruikt zijn door AbtWassenaar, ABT en Royal HaskoningDHV.



Figuur C.1: Een typische meetopstelling gebruikt door AbtWassenaar en ABT. Boven in de figuur is de meetopstelling in zijn geheel te zien. Linksonder is een korte drukmeter te zien en rechtsomder een versnellingsmeting. Figuur uit ABT (2022a).



Figuur C.2: Een typische meetopstelling gebruikt door Royal HaskoningDHV. Figuur uit RHDHV (2022a).

AbtWassenaar (2022a) heeft de stijfheid van het tribune-element bepaald met behulp van een Eindig Elementen Model (EEM). Bij deze bepaling is uitgegaan van gemiddelde betoneigenschappen en de aanwezige wapening. Uit dit model volgde een stijfheid van 15.000 N/mm². In RHDHV (2022a, 2022b) zijn de massa, stijfheid en eigenfrequentie van het tribune-element bepaald. De massa is bepaald op 12.800 kg (2022a) of 5.000 kg (2022b). De stijfheid in (2022a) varieert tussen van 16 MN/m bij een eigenfrequentie van 8 Hz tot 31 MN/m bij een eigenfrequentie van 11 Hz. In (2022b) is de stijfheid bepaald op 22 MN/m bij een eigenfrequentie van 15 Hz. De stijfheid is bepaald als

$$k = (2\pi f_e)^2 M_t \frac{K_M}{K_L} \quad (\text{C.1})$$

waarbij k de stijfheid is, f_e de eigenfrequentie van het tribune-element is, M_t de massa van het tribune-element is, K_M de massafactor voor een equivalent één-massa-veer system is en K_L de belastingfactor voor een equivalent één-massa-veer systeem is. De massa- en belastingfactor zijn verkregen uit Biggs (1964). De eigenfrequentie is bepaald met behulp van een hielval test.

In alle referenties is een inschatting gemaakt van het aantal personen dat op een vierkante meter staat. Dit is gedaan op meerdere tijdstippen tijdens de wedstrijd. Het overzicht van de inschatting is in [Tabel C.5](#) weergegeven.

Tabel C.5: Inschatting van het aantal personen per vierkante meter op basis van tellingen.

Referentie	Tijdstip [uu:mm]	Geteld aantal personen	Oppervlak waarover geteld is [m ²]	Aantal personen per m ²
AbtWassenaar (2022a)	18:50	51	22,2	2,3
	18:55	59	22,7	2,6
	19:05	56	22,4	2,5
	19:05	56	23,3	2,4
	19:10	58	22,3	2,6

	20:50	62	23,0	2,7
AbtWassenaar (2022a)	16:30	55	22,9	2,4
	16:33	54	22,5	2,4
	16:35	59	22,7	2,6
	16:50	66	22,8	2,9
	17:00	66	22,8	2,9
	17:05	67	23,1	2,9
	18:35	81	22,5	3,6
ABT (2022b)	16:05	8	3,3	2,4
	16:10	9	3,3	2,7
ABT (2022c)	14:40	78	21,1	3,7
	15:00	78	21,1	3,7
	15:05	78	21,1	3,7
	15:15	78	21,1	3,7
	15:55	84	21,0	4,0
	16:05	84	21,0	4,0
	16:25	84	21,0	4,0
RHDHDV (2022a)	21:18	42	20,0	2,1
	21:46	42	20,0	2,1
	20:06	42	20,0	2,1
RHDHV (2022a)	21:18	42	20,0	2,1
	21:46	42	20,0	2,1
	20:06	42	20,0	2,1
RHDHDV (2022a)	21:18	38	20,0	1,9
	21:46	38	20,0	1,9
	20:06	38	20,0	1,9
RHDHDV (2022b)	21:00	20	10,0	2,0
	22:38	20	10,0	2,0

C.3 Analyse

Het doel van de analyses was het bepalen van de dynamische vergrotingsfactor op de belasting door een springende menigte. Alle onderzoeken hanteren een massa van 85 kg per persoon.

In AbtWassenaar (2022a) is op basis van de gemeten verplaatsingen en het moment-krommingsdiagram, dat volgt uit een EEM-berekening, een inschatting gemaakt van de grootte van de veranderlijke belasting. Dit is vervolgens vertaald naar een statisch equivalent belasting, wat vergeleken is met de statische belasting om tot de dynamische vergroting te komen.

In ABT (2022b, 2022c) is de dynamische vergroting afgeleid door de maximale gemeten verplaatsing gedurende het springen te vergelijken met de statische verplaatsing (dat is, wanneer iedereen stil staat). Op basis van het gemeten aantal personen per vierkante meter, een inschatting van de statische belasting en de dynamische vergrotingsfactor is de totale belasting ingeschat.

In RHDHDV (2022a, 2022b) is de statisch equivalente verdeelde belasting ten gevolge van het springen bepaald met behulp van

$$q_{s,eq} = \frac{k \cdot u}{A \cdot K_L} \quad (C.2)$$

waarbij $q_{s,eq}$ de statisch equivalente verdeelde belasting is, k de stijfheid bepaald volgens vergelijking C.1, u de verplaatsing bepaald door middel van integratie uit de gemeten trillingen, A het oppervlak van het tribunevak is en K_L de belastingfactor voor een equivalent één-massa-veer systeem is. Door deze waarde te vergelijken met de statische belasting van de toeschouwers is de dynamische vergroting bepaald.

De DAF waarden van springevents tijdens wedstrijden, gegeven in [Tabel 4.3](#), zijn voor de onderzoeken door AbtWassenaar (2022a) en ABT (2022b, 2022c) bepaald op basis van de grafieken in deze rapportages, zoals weergegeven in [Figuur C.3](#). De verhouding tussen de maximum verplaatsing tijdens een spring event en de verplaatsing vlak voor het spring event geeft de DAF waarde. Per wedstrijd zijn de op deze manier verkregen DAF waarden vergeleken met de maximum DAF waarde van de wedstrijd gespecificeerd in de rapportages van AbtWassenaar. De verschillen in deze maximum DAF waarden waren kleiner dan 5%.

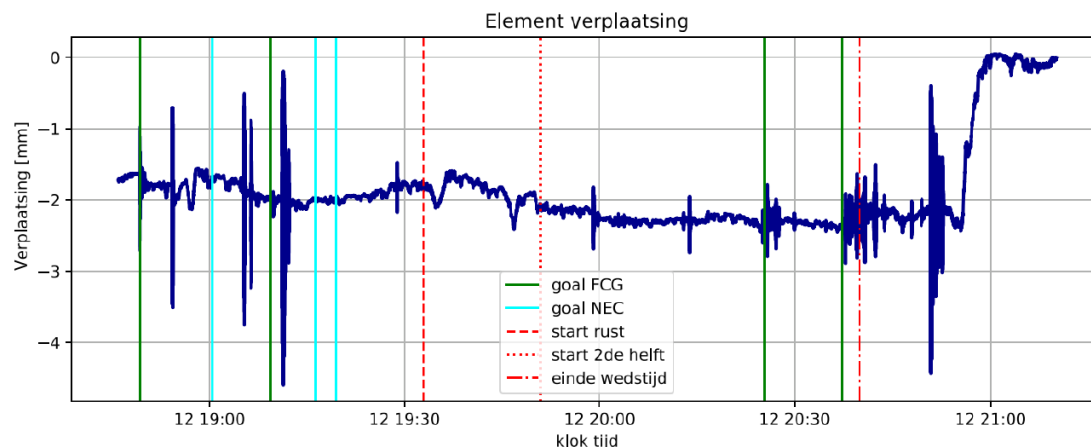
De statische belasting door de toeschouwers op het tribune-element op het moment van springen is vervolgens bepaald door de totaalbelasting te delen door de bepaalde DAF waarde. De totaalbelastingen zijn hierbij in het geval van AbtWassenaar (2022a) verkregen uit de gerapporteerde MN-Kappa diagrammen, zoals weergegeven in [Figuur C.4](#), tijdens het maximum van het spring event.

De op deze manier verkregen waarden voor de statische belasting zijn vervolgens vergeleken met de gerapporteerde waarden verkregen op basis van observaties door middel van videobeelden. Verschillen in de statische belasting tussen deze twee methoden waren kleiner dan 5%. Deze verschillen zijn klein gezien de onzekerheid in beide bepalingsmethodes, d.w.z. op basis van gemeten waarden uit de rapportages en op basis van het tellen van personen op videobeelden op een beperkt aantal momenten tijdens een wedstrijd met een aanname over de gemiddelde massa van de personen.

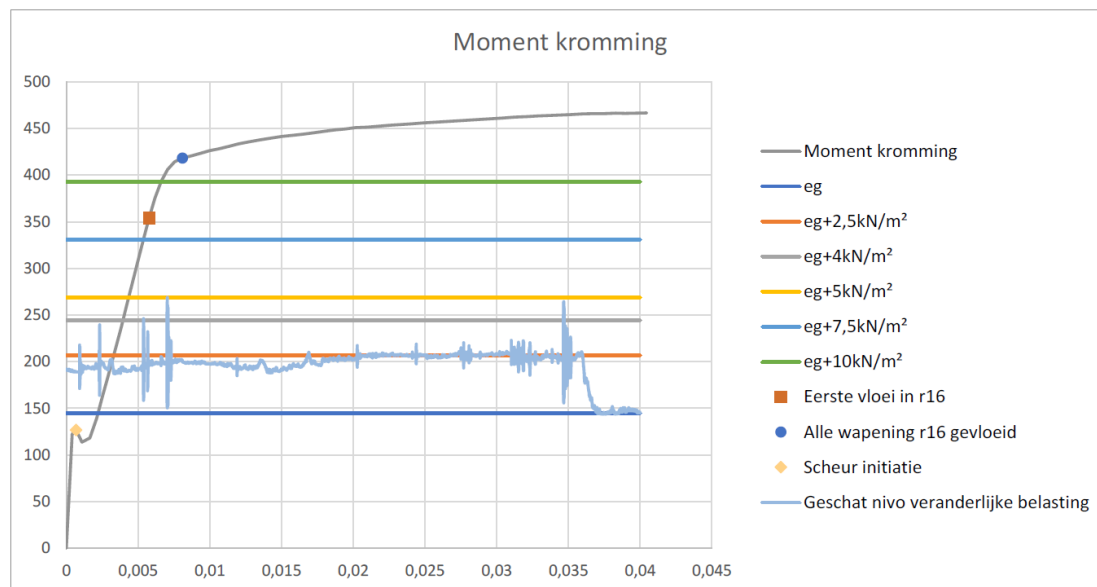
In de onderzoeken door ABT (2022b, 2022c) zijn geen MN-Kappa diagrammen gerapporteerd en zijn de statische belastingen bepaald op basis van het aantal personen

gerapporteerd in de rapportage bepaald op basis van videobeelden tijdens de wedstrijd en een aanname van 85 kg per persoon.

Voor de onderzoeken door RHDHV (2022c, 2022d) zijn de waarden bepaald op basis van de gerapporteerde waarden voor de massa van de toeschouwers en de dynamische sprongfactor.



Figuur C.3: Een gemeten verplaatsingssignaal van een tribune-element tijdens een wedstrijd. Figuur uit AbtWassenaar (2022a).



Figuur C.4: Gemeten signaal uitgezet in het MN-Kappa diagram van het tribune-element. Het signaal is gekalibreerd op basis van het eigen gewicht van de tribune (aan het einde van de wedstrijd is enkel het eigen gewicht aanwezig). Figuur uit AbtWassenaar (2022a).

Bijlage D

Tribunebezoek

D.1 Inleiding

Het gedrag van het publiek speelt een cruciale rol in de optredende belasting op tribunes. Daarom wordt eerst globaal bekeken hoe vaak er evenementen plaatsvinden in grote voetbalstadions, omdat informatie over het tribunebezoek op deze locaties over het algemeen beter is vastgelegd ten opzichte van andere locaties waar tribunes voorkomen. Dit wordt gedaan voor drie grote voetbalstadions in Nederland. Een hogere frequentie van evenementen zorgt er voor dat de constructie gedurende de levensduur vaker belast wordt. Hoe hoog deze belasting is hangt mede van de groepsdichtheid af. Daarom wordt daarna onderzocht wat de maximale publieksdichtheid is. Vervolgens wordt een inschatting gemaakt hoe vaak en hoe lang er gesprongen wordt tijdens een activiteit.

D.2 Aantal evenementen per jaar in een stadion

In Tabel D.1: is voor vier stadions onderzocht hoe veel voetbalwedstrijden er in het voetbalseizoen 2023-2024 en hoe veel concerten er in 2023 hebben plaatsgevonden. Er is alleen gekeken naar de volgende voetbalcompetities: de Eredivisie, Europese competities en de KNVB beker. De tabel laat zien dat in een typisch seizoen circa 25 wedstrijden per voetbalseizoen gespeeld worden bij de 'traditioneel grote voetbalclubs.

Daarnaast blijkt dat er een significant aantal concerten gehouden kan worden in een stadion. Zowel in de Johan Cruijff Arena als het Gelredome worden vaak concerten gehouden. Het is moeilijk te kwantificeren hoe veel concerten er in een typisch jaar gehouden worden.

Tabel D.1: Overzicht van gespeelde wedstrijden en gehouden concerten in drie grote voetbalstadions in Nederland.

Stadion	Wedstrijden 2023-2024				Concerten 2023 ¹
	Eredivisie	Europa	KNVB	Totaal	
Johan Cruijff Arena	17	4	2	23	15
Stadion Feyenoord	17	4	5	26	~ ²
Philips Stadion	17	4	2	23	~ ³
Gelredome	17	0	0	17	11 ¹

¹ Het exacte aantal concerten valt niet eenvoudig te achterhalen. Dit zijn daarom inschattingen.

² Vanaf 2026 worden er geen grote concerten meer georganiseerd in Stadion Feyenoord.

³ Vanaf 2025 worden er voorlopig geen grote concerten meer georganiseerd in het Philips stadion.

D.3 Publieksdichtheid

Publieksdichtheid (niet extreem)

TNO-rapport B-89-227 is het achtergronddocument op NEN 6720 (TGB 1990). Dit document concludeert dat een menigte tot stilstand komt bij een dichtheid van 2 à 2,5 kN/m² en dat deze waarde zelden groter zal zijn dan 4 kN/m². Uitgaande van een massa van 85 kg komt dit neer op circa 2,5 tot 3 personen per vierkante meter.

Met 3,5 personen per vierkante meter schrijft NEN-EN 13200 (2019) iets hogere waarden voor de publieksdichtheid voor. Volgens de Guide to Safety at Sport Grounds (2018, 6^e editie) is een maximum van 4 personen per vierkante meter een geschikte dichtheid.

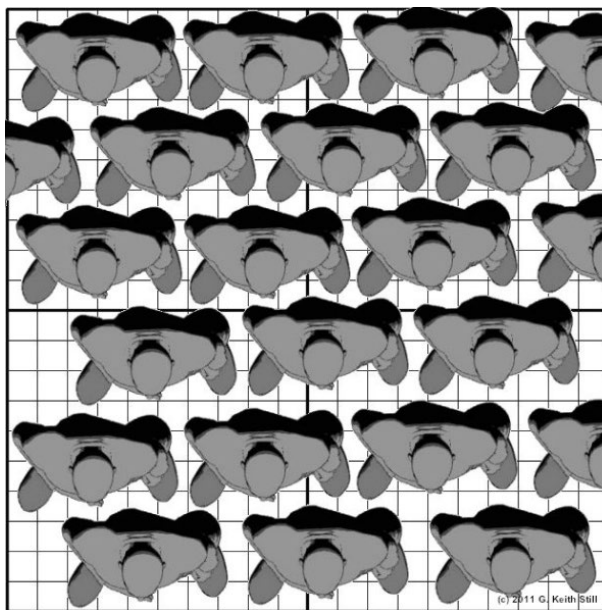
Bij een springende menigte neemt de belasting per persoon toe (tot een factor 4 van het statische gewicht), maar de dichtheid neemt af. Er wordt een maximaal waargenomen belasting van 2,3 gerapporteerd in TNO rapport B-89-227. Uitgaande van een dynamisch effect van 4 komt dit neer op 0,7 persoon per vierkante meter.

Volgens dit onderzoek wordt de maximale belasting gevonden bij een stilstaande menigte. Dit komt doordat de toenemende publieksdichtheid zwaarder weegt dan het afnemende dynamische effect. ISO 10137 (2007) levert suggesties voor de publieksdichtheid als functie van de activiteit. Voor ruimten zonder stoelen wordt bij gecoördineerd springen 0,8 persoon per vierkante meter aangehouden. Dit is vergelijkbaar met de gemiddelde waarde uit het TNO-rapport.

Bij kleine groepen is de ruimtelijke verdeling van mensen willekeurig (Still, 2019).

Publieksdichtheid (extreem)

Still (2000) heeft de afmetingen van personen in bestudeerd. Hierbij concludeert hij dat een Britse man gemiddeld de grootste afmetingen heeft (0,51m breed, 0,33 m diep). Hij heeft Nederland niet onderzocht, maar het is niet onredelijk om aan te nemen dat Nederlanders qua afmeting vergelijkbaar zijn met Britten. Met deze afmetingen passen er 6 personen op één vierkante meter. Zowel NEN-EN 13200 (2007) als de Guide to Safety at Sport Grounds (2018, 6^e editie) houden een maximale dichtheid van 4,7 personen per vierkante meter aan. Gebaseerd op de vloerbelasting die volgens TNO zelden overschreden wordt is de maximale dichtheid 4,8 personen per vierkante meter. Still (2019) raadt een maximale waarde van 5 personen per vierkante meter aan. In [Figuur D.1](#) is aangegeven hoe een dichtheid van 5 personen per vierkante meter er uit ziet. De maximaal geobserveerde waarde is volgens ISO 10137 6 personen per vierkante meter.



Figuur D.1: 5 personen per vierkante meter (Still, 2019).

Royal HaskoningDHV (2022) heeft onderzoek gedaan naar de instorting van een tribune element in voetbalstadion de Goffert te Nijmegen. In dit onderzoek wordt geconcludeerd dat er 93 personen op het element aanwezig waren ten tijde van het instorten, verdeeld over 3 rijen. Het oppervlak van één rij is bepaald op 7,5 m². Uitgaande van een uniform verdeelde massa komt dit neer op circa 4,1 personen per vierkante meter.

Conclusies

Uit onderzoek van een ingestort tribune-element is gebleken dat een publieksdichtheid van ruim 4 personen per vierkante meter in staat is om gecoördineerd te springen. Waarden uit de literatuur hanteren een maximum van zo'n 4,7 tot 5 personen per vierkante meter. Daarom wordt aangeraden om met een publieksdichtheid van 5 personen per vierkante meter te rekenen bij het bepalen van de capaciteit van een tribune-element indien er geen objecten geplaatst worden die het onmogelijk maken om zulke dichtheden te halen.

D.4 Springduur tijdens een evenement

Sportwedstrijd

In (vertrouwelijk) onderzoek door ABT is in overleg met de opdrachtgever de aanname gedaan dat de sprongtijd tijdens een wedstrijd ingeschat kan worden op 3 blokken van 3 á 4 minuten per blok, wat neerkomt op een sprongtijd per wedstrijd van 630 seconden. In ABT (2022) zijn trillingsmetingen uitgevoerd aan een tribune element gedurende twee wedstrijden. In dit rapport is bij één van de twee wedstrijden het aantal spring momenten genoteerd. Dit zijn er 7. De duur van het springen is niet gekwantificeerd. Verner (2017) heeft over 5 wedstrijden van één voetbalclub geconstateerd dat er bij iedere wedstrijd sprake is geweest van minstens één keer gesynchroniseerd springen. Bij een tweede voetbalclub was hier geen sprake van. Er wordt geen uitspraak gedaan over de duur van het springen.

In het volgende hoofdstuk wordt ingegaan op sprongbelastingmodellen. Wat opvalt is dat alle beschouwde experimenten een maximale sprongduur hebben van circa 30-35 seconden

(bijvoorbeeld Sim et al. (2008), Racic & Pavic (2010), Chen et al. (2016), Li et al. (2018)). De reden is om te voorkomen dat deelnemers vermoeid raken en daardoor minder krachtig gaan springen. In Li et al., bijvoorbeeld, krijgen participanten 60 seconden rust na iedere test en 20 minuten rust na vier testen. Zo wordt er voor gezorgd dat participanten de test energiek kunnen uitoefenen.

Concerten

Het ontbreekt aan onderzoek waarin het spronggedrag van mensen gekwantificeerd is. Dit komt mogelijk doordat het van veel factoren af hangt, zoals het type muziek, het geluidniveau en de duur van een optreden. Dat maakt dat het erg moeilijk is om sprongbelastingen ten gevolge van concerten te verdisconteren in een belastingmodel.

Conclusies

Omdat het op basis van de huidige kennis niet mogelijk is om de invloed van concerten op redelijke wijze onderbouwd in rekening te brengen, wordt aangeraden om deze niet mee te nemen in de berekening. Hierop wordt gecompenseerd door een conservatieve aanname te doen voor de sprongbelasting die volgt uit wedstrijden. Dit kan worden bereikt door uit te gaan van 3 blokken waarin gesprongen wordt met een sprongtijd van 4 minuten per blok. Hoewel de sprongbelasting in werkelijkheid mogelijk afneemt ten gevolge van vermoeiingsverschijnselen, hoeft dit in een model geen probleem te zijn. Dit zorgt voor een extra conservatieve inschatting van de sprongbelasting.

Bijlage E

Springdynamica

E.1 Inleiding

Een springende persoon oefent een kracht uit op de ondergrond. Deze kracht kenmerkt zich door twee onderscheidende fases (weergegeven in Figuur E.1):

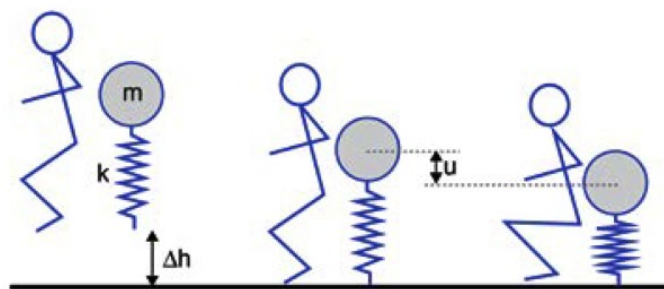
- een fase waarbij de persoon in contact staat met de ondergrond. Gedurende deze fase neemt de dynamische kracht toe van 0 tot een bepaald maximum, om vervolgens weer af te nemen naar 0;
- een fase waarbij de persoon in de lucht is en dus niet in contact staat met de ondergrond. In deze fase is de kracht die de persoon op de ondergrond uitoefent 0.

Spanenburg (2022) heeft op een vereenvoudigde wijze gevisualiseerd hoe het lichaam deze kracht uitoefent. Hij heeft het lichaam van een persoon geschematiseerd als een één massa-veer systeem, waarbij de benen van het lichaam een veer voorstellen en waarbij alle massa geconcentreerd wordt in het zwaartepunt van dit lichaam. De dynamische kracht komt voort uit de constitutieve relatie

$$\Delta F = k \cdot \Delta u \quad (\text{E.1})$$

waarbij F de kracht is, k de veerconstante (een mate van weerstand tegen verplaatsen) is en u de verplaatsing is. Wanneer de persoon zich in de lucht bevindt is de veer niet samengedrukt: de bijbehorende kracht is 0. Gedurende het landen bevindt het massamiddelpunt zich lager ten opzichte van een rechtopstaand persoon: er is sprake van een indrukking van de veer en dus wordt er een kracht uitgeoefend op de ondergrond. Dit duurt voort totdat de persoon weer het contact met de ondergrond verliest (en dus een nieuwe sprong inzet).

Hoewel de daadwerkelijke sprongbelasting ingewikkelder in elkaar zit dan gepresenteerd in Figuur E.1, maakt de figuur duidelijk hoe de sprongbelasting kwalitatief tot stand komt. De volgende paragraaf behandelt verschillende sprongbelastingmodellen uit de literatuur.



Figuur E.1: Een schematische weergave van een persoon springend op een ondergrond (Spanenburg, 2022).

E.2 Sprongbelastingmodellen voor een individu

Deze paragraaf beschrijft verschillende sprongbelastingmodellen uit de literatuur. Eerst wordt gekeken naar belastingmodellen die het springen van één individu ondervangen. Vervolgens wordt het belastingmodel uitgebreid naar groepen. Tabel E.1 geeft het overzicht van de behandelde sprongbelastingmodellen uit de literatuur.

Tabel E.1: Overzicht van sprongbelastingmodellen uit de literatuur.

Sprongbelastingmodel (jaar van uitgave)
Bachmann & Ammann (1987)
Ji & Ellis (1994)
Sim et al. (2008)
Racic & Pavic (2009)
Racic & Pavic (2010)
Weijs et al. (2025) ¹

¹: wordt naar verwachting in 2025 gepubliceerd.

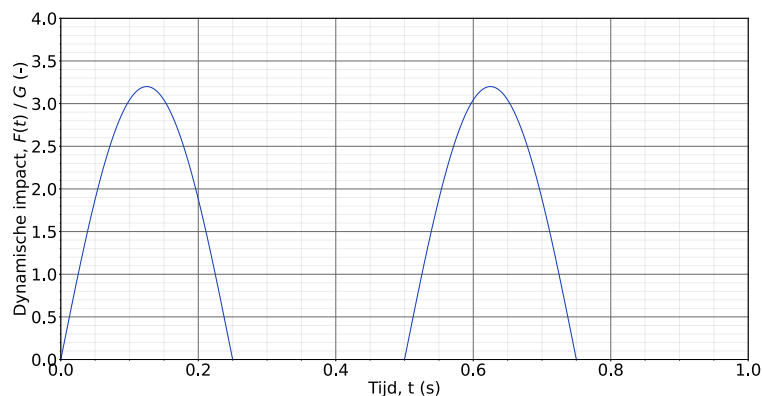
E.2.1 Periodieke belastingmodellen

E.2.1.1 Model Bachmann & Ammann (1987)

Een belastingmodel dat de springkracht voor één periode beschrijft is (Bachmann & Ammann, 1987)

$$F(t) = \begin{cases} k_p G \sin\left(\frac{\pi}{t_p} \cdot t\right) & \text{voor } 0 \leq t \leq t_p \\ 0 & \text{voor } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (\text{E.2})$$

waarbij $k_p = F_{\max}/G$ de dynamische impactfactor is, $F_{\max}$ de piekbelasting van de dynamische sprong is, G het gewicht van de persoon is, t_p de contactduur met de ondergrond is en T_p de periode van de sprong is. Figuur E.2 presenteert een voorbeeld, waarbij de dynamische impact $F(t)/G$ is weergegeven die hoort bij het belastingmodel van vergelijking E.2.



Figuur E.2: Een voorbeeld van de dynamische impact bij het belastingmodel van Bachmann & Ammann (de gebruikte instellingen zijn $k_p = 3,2$, $t_p = 0,25$ s, $T_p = 0,5$ s).

De studie gaat er van uit dat k_p berekend kan met behulp van de wet van het behoud van momentum, wat betekent dat de impuls van een sprong gelijk is aan het statische gewicht van de persoon vermenigvuldigd met de periode. Dat houdt in dat de integraal van het belastingsignaal over de contactperiode gelijk is aan de energie die hoort bij het statische gewicht

$$\int_0^{t_p} k_p G \sin\left(\frac{\pi}{t_p} \cdot t\right) dt = G T_p \quad (\text{E.3})$$

Hieruit volgt dat er een relatie bestaat tussen k_p en de verhouding t_p/T_p . Deze verhouding wordt de contactratio genoemd:

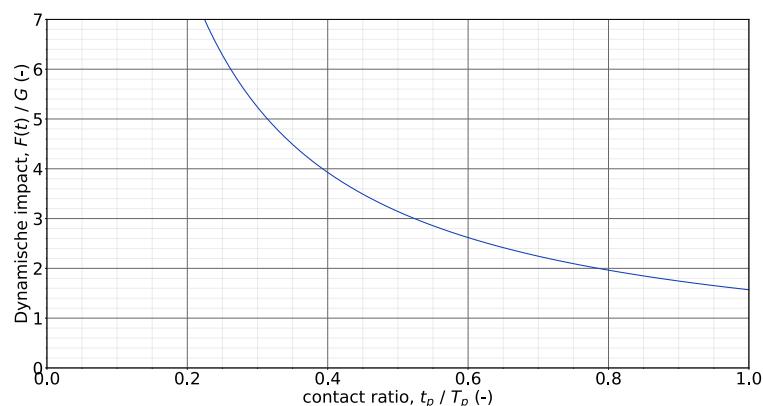
$$\alpha = \frac{t_p}{T_p} \leq 1 \quad (\text{E.4})$$

waarbij α de contactratio is. Een lage contact ratio impliceert dat een persoon relatief lang in de lucht is ten opzichte van de sprongperiode. Vergelijking E.3 kan herschreven worden tot

$$k_p = \frac{\pi}{2\alpha} \quad (\text{E.5})$$

Er bestaat dus een omgekeerd evenredig verband tussen de maximale sprongbelasting en de contactratio. De relatie tussen k_p en α is gepresenteerd in Figuur E.3. In de studie is het model vergeleken met data van rennende mensen. Daaruit is gebleken dat de modelmatig bepaalde dynamische impact tot een overschatting van 30% kan leiden (bij 2 Hz en 4 Hz). Er is geen vergelijking gemaakt tussen het model en data voor springende mensen. Volgens Bachmann & Amman (1987) is het verder haast onmogelijk om een contactperiode van $t_p < 0,15$ s te behalen.

Hoewel dit model duidelijk imperfect is – bij een contact ratio van $\alpha = 1,0$ zou een dynamische impact van $k_p = 1,0$ verwacht worden omdat er geen sprake meer kan zijn van springen – wordt het wel als een geschikt model geacht. Dit concluderen Bachmann & Ammann door, voor enkele verschillende situaties, de belasting bepaald met het model te vergelijken met data. Deze resultaten zijn niet terug te vinden in het rapport.



Figuur E.3: De relatie tussen de dynamische impact $k_p = F(t)/G$ en de contact ratio $\alpha = t_p/T_p$.

E.2.1.2 Model Ji & Ellis (1994)

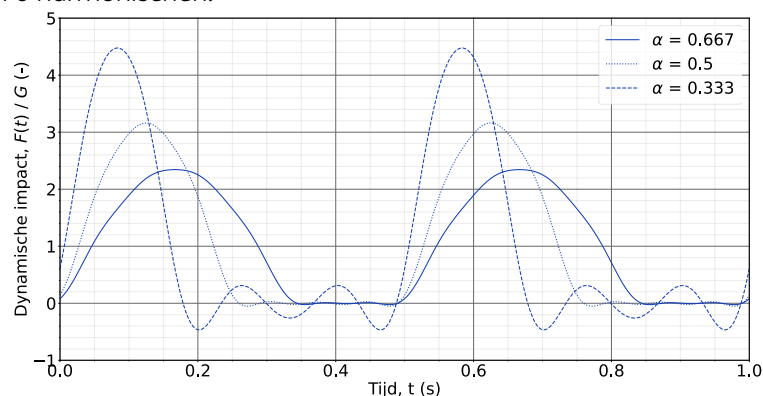
Een periodieke functie, zoals een sprongbelastingsfunctie, kan worden beschreven met een Fourier reeks met oneindig veel termen. Ji en Ellis (1994) definiëren een model dat de sprongbelasting beschrijft als een sommatie van sinus functies

$$F(t) = G \left(1 + \sum_{n=1}^m a_n \sin \left(\frac{2\pi n}{T_p} \cdot t + \phi_n \right) \right) \quad (\text{E.6})$$

waarbij m het aantal mee te nemen termen is, n het nummer van de harmonische is, a_n de Fourier coëfficiënt van de n -de harmonische is (dit wordt ook wel de dynamische belastingfactor genoemd) en ϕ_n het faseverschil van de n -de harmonische is.

Door het belastingsignaal als een Fourier reeks op te schrijven wordt inzicht verschaft in de frequentie en de harmonischen van het belastingsignaal, wat nuttige informatie verschaft bij een dynamische analyse waarbij de belastingfrequentie(s) in de buurt van een eigenfrequentie van een constructie tot resonantie kunnen leiden.

Ji & Ellis (1994) hebben de eerste 6 termen van de Fourier reeks gekwantificeerd omdat zij vinden dat de sprongbelasting met 3 of 6 termen accuraat beschreven kan worden. Deze zijn gespecificeerd in Tabel E.2. Bij het bepalen van de termen van de Fourier reeks zijn ze uitgegaan van de relatie uit vergelijking E.4. Ellis & Ji (1994) hebben geconcludeerd dat deze relatie inderdaad geldig is. Bachmann et al. (1995) rapporteren soortgelijke waarden. In Figuur E.4 is de dynamische impact gepresenteerd voor drie verschillende contactratio's uitgaande van 6 harmonischen.



Figuur E.4: De dynamische impact als functie van de contact ratio α (Ji & Ellis, 1994).

Tabel E.2: Fourier coëfficiënten en faseverschillen voor verschillende contact ratio's (Ji & Ellis, 1994).

		$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$
$\alpha = \frac{2}{3}$	a_n	1.28571	0.16364	0.13333	0.03643	0.02302	0.03175
	ϕ_n	$-\pi/6$	$\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$	$\pi/6$	$-\pi/2$
$\alpha = \frac{1}{2}$	a_n	1.57080	0.66667	0	0.13333	0	0.05714
	ϕ_n	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
$\alpha = \frac{1}{3}$	a_n	1.80000	1.28571	0.66667	0.16364	0.09890	0.01333
	ϕ_n	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$
$\alpha = \frac{1}{4}$	a_n	1.88562	1.57080	1.13137	0.66667	0.26937	0
	ϕ_n	$\pi/4$	0	$-\pi/4$	$-\pi/2$	$\pi/4$	0

E.2.2 Smalbandige belastingsmodellen

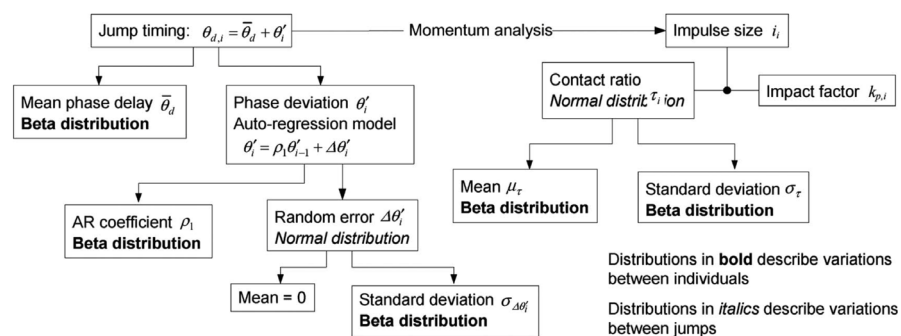
E.2.2.1 Model Sim et al. (2008)

Sim et al. (2008) presenteren een statistisch model om de dynamische sprongbelasting te beschrijven. Het smalbandige proces ontstaat doordat enkele parameters als een stochast gekwantificeerd zijn. Deze kwantificatie is gebaseerd op experimentele data van Parkhouse & Ewins (2004, 2006), die belastingsignalen van 100 individuen omvat. In Tabel E.3 zijn de gekwantificeerde stochasten gepresenteerd voor een sprongfrequentie van 2 Hz. Alle variabelen zijn bèta-verdeeld. De bijbehorende parameters zijn α en β . Figuur E.5 beschrijft het algoritme van het belastingsignaal. Voor meer informatie wordt verwezen naar Sim et al. (2008). Het model is gebaseerd op vijf onafhankelijke stochasten:

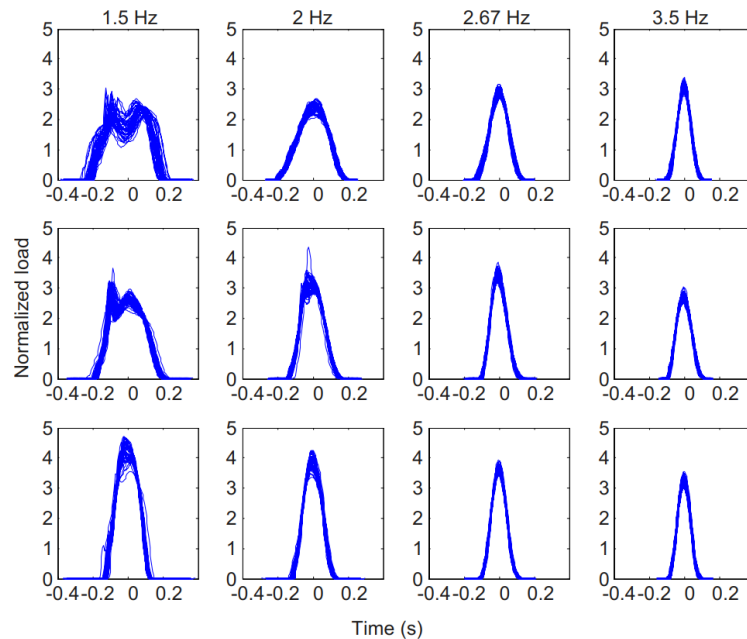
- het gemiddelde getransformeerde faseverschil tussen twee opeenvolgende sprongen $\bar{\theta}_d^*$,
- een eerste orde autoregressie coëfficiënt ρ_1 ,
- de getransformeerde standaard deviatie van de ruis $\sigma_{\Delta\theta}^*$,
- de gemiddelde waarde van de contact ratio μ_α ,
- de standaardafwijking van de contact ratio σ_α .

Tabel E.3: Stochastische beschrijving van de modelparameters (2 Hz) (Sim et al., 2008).

Symbol	Verdeling	α	β
$\bar{\theta}_d^*$	Bèta	24,34	12,30
ρ_1	Bèta	18,98	2,40
$\sigma_{\Delta\theta}^*$	Bèta	256,88	528,07
μ_α	Bèta	17,40	12,19
σ_α	Bèta	9,98	256,01



Figuur E.5: Algoritme van het sprongbelastingmodel van Sim et al. (2008).



Figuur E.6: De impuls van drie deelnemers op vier verschillende frequenties (Sim et al., 2008).

Sim et al. (2008) hebben aangetoond dat een $\cos^2$ -functie een betere benadering is van de impuls behorend bij een sprong dan een $\cos$ -functie. Dit hangt echter wel af van de frequentie: hoe hoger de frequentie, hoe beter de benadering. Dit komt doordat bij lagere sprongfrequenties (1,5 Hz) de impuls twee pieken kan vertonen. De eerste piek representeert het landen en de tweede piek het afzetten. Bij hogere sprongfrequenties verdwijnt de dubbele piek en blijft er één piek over. Figuur E.6 laat dit fenomeen zien.

E.2.2.2 Model Racic & Pavic (2009)

Racic & Pavic (2009) hebben, net als Sim et al. (2008), een stochastisch model voor sprongbelastingen ontwikkeld. Om de asymmetrische vorm van een springbelasting te beschrijven gebruiken Racic & Pavic (2009) de som van twee Gauss-krommes

$$z(\theta) = \sum_{i=1}^2 (\alpha_i m g) e^{-\left(\frac{(\theta - \theta_i)^2}{2\beta_i^2}\right)} \quad (\text{E.7})$$

waarbij $\theta_i = 2\pi t_i/T$ en $\beta_i = 2\pi b_i/T$ (rad) is, α_i de dynamische impact factor is en b_i een parameter is die de breedte van de impuls bepaalt. Door de hoeksnelheid ω per sprong te laten variëren, ontstaat een smalbandig proces.

Voor het bepalen van de grootte van de impuls maken Pavic en Racic (2009) gebruik van een gemeten belastingsignaal. De Fourier getransformeerde van dit signaal wordt bepaald. Wanneer een Fourier transformatie van een signaal $x(t)$ uitgevoerd wordt, wordt een complexe functie $X(f)$ gevonden, die zowel een magnitude $|X(f)|$ als een fase $\phi(f)$ heeft

$$X(f) = |X(f)|e^{i\phi(f)} \quad (\text{E.8})$$

De auto-spectrale dichtheid (ASD) $S_x(f)$ is het kwadraat van de magnitude

$$S_x(f) = |X(f)|^2 \quad (\text{E.9})$$

Een eigenschap van een ASD is dat het oppervlak onder de functie gelijk is aan de variantie van het signaal. Vergelijking E.8 laat zien dat de Fourier getransformeerde van een signaal een magnitude en een fase kent. Door een willekeurig faseverschil te kiezen kan een synthetische set aan magnitudes verkregen worden door te eisen dat de variantie van de ASD gelijk moet zijn aan het originele signaal. In het onderzoek van Racic en Pavic (2009) hebben ze dit gedaan voor $\bar{P}$, een grootheid die de variatie tussen de piekbelastingen van een individu beschrijft

$$\bar{P}_i = \frac{P_i - \mu_P}{\mu_P} \quad (\text{E.10})$$

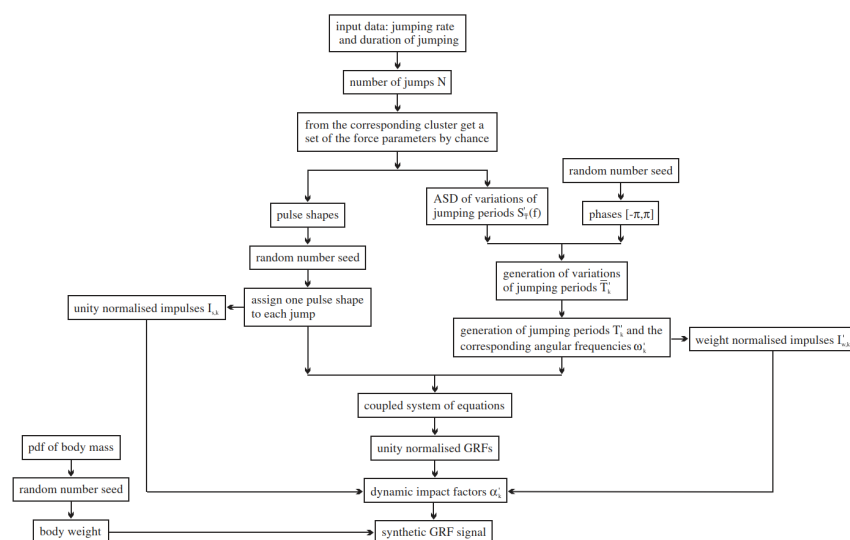
waarbij μ_P het gemiddelde van alle piekbelastingen is.

E.2.2.3 Model Racic & Pavic (2010)

In Racic & Pavic (2010) wordt alternatieve methode toegepast als in het belastingmodel uit 2009. Ze hebben een sterke correlatie gevonden tussen de periode T_i en de genormaliseerde impuls $I_{w,i}$, die gevonden wordt volgens de vergelijking

$$I_{w,i} = \frac{1}{mg} \sum_{i=1}^n F_i \Delta t \quad (\text{E.11})$$

waarbij m de massa van de persoon is, g de gravitatieconstante ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) is, F_i de kracht is, $\Delta t = 1/f_s$ de tijdsstap is en f_s de bemonsteringsfrequentie is. Figuur E.7 presenteert het algoritme van Racic & Pavic (2010).



Figuur E.7: Het algoritme dat de procedure voor het genereren van synthetische belastingsignalen beschrijft van Racic & Pavic (2010).

E.2.2.4 Model Weijs et al. (2025)

In het onderzoek van Weijs et al. (2025)¹² zijn enkele parameters die de sprongbelasting beschrijven stochastisch gekwantificeerd. In dit onderzoek is de database uit Xiong & Chen (2021) gebruikt. Deze database bevat 334 belastingsignalen van springende individuen en 108 belastingsignalen van springende groepen van 48 mensen.

Het onderzoek heeft aangetoond dat de gemiddelde van het voor het gewicht genormaliseerde sprongkracht sterk varieert tussen personen. De variatie rondom het gemiddelde blijkt niet afhankelijk te zijn van de gemiddelde waarde. Weijs et al. stelt op basis van deze uitkomst voor om de sprongfactor op te splitsen in twee componenten: 1) een component die de gemiddelde waarde beschrijft; en 2) een component die de variatie rondom de gemiddelde waarde beschrijft. De impuls heeft de vorm van een $\cos^2$ -functie. Dit is gebaseerd op de uitkomsten van onderzoek van Sim et al. (2008).

Tabel E.4 presenteert stochasten die onderdeel uitmaken van het sprongbelastingmodel van Weijs et al. (2025). Het model is gebaseerd op vijf stochasten:

- De gemiddelde waarde van de voor de sprongfactor van één persoon $\tilde{F}_{sts}$,
- De variatie rondom de gemiddelde sprongfactor van één persoon $\tilde{F}_{ws}$,
- De contactratio α ,
- De sprongperiode T_p ,
- Het faseverschil tussen individuen ϕ

Het onderzoek van Weijs et al. toont aan dat er sterke correlatie bestaat tussen $\tilde{F}_{sts}$ en α ($\rho = -0,82$). Dit wordt in rekening gebracht bij het genereren van het synthetische belastingmodel. Ook worden autocorrelaties meegenomen voor de sprongfactor $\tilde{F} = \tilde{F}_{sts} + \tilde{F}_{ws}$ ($\rho = 0,28$) en voor de contactratio α ($\rho = 0,20$). Deze waarden gelden voor twee opeenvolgende realisaties van $\tilde{F}$ of α . Voor de standaardafwijkingen van T_p en ϕ zijn aannames gedaan. Figuur E.8 laat het algoritme zien voor het bepalen van de belasting voor één individu.

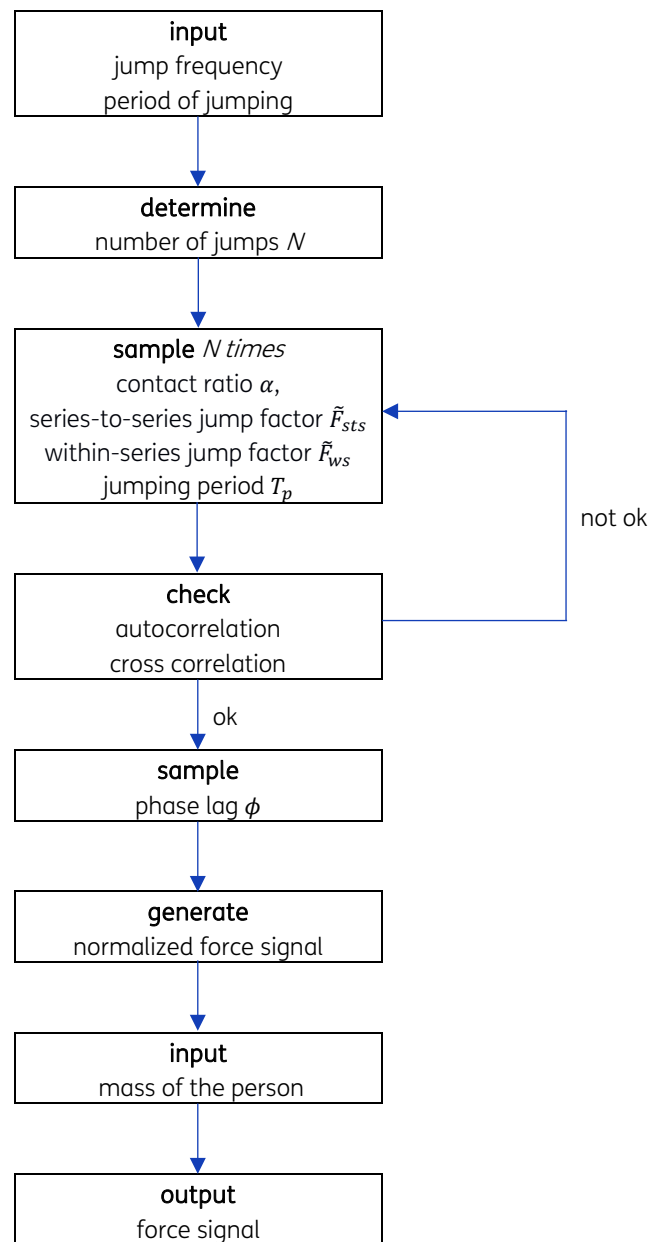
Tabel E.4: Stochastische beschrijving van de modelparameters (Weijs et al., 2025).

Symbol	Verdeling	Gemiddelde waarde	Variatiecoëfficiënt
$\tilde{F}_{sts}$	Normaal	3,09	0,165
$\tilde{F}_{ws}$	Weibull	0,24	0,417
α	Normaal	0,33	0,242
T_p	Normaal	¹	2 ²
ϕ	Normaal	0	5 ²

¹ de gemiddelde waarde voor de sprongperiode hangt af van de sprongfrequentie en de voorgaande realisaties.

² de gepresenteerde waarden hier zijn geen variatiecoëfficiënten maar standaardafwijkingen (in seconden).

¹² Dit onderzoek wordt naar verwachting in 2025 gepubliceerd.



Figuur E.8: Het algoritme dat de procedure voor het genereren van een synthetische belastingsignaal van een individu beschrijft van Weijs et al. (2025).

E.3 Sprongbelastingmodellen voor een groep

Er is een significant verschil tussen de grootte van de belasting die een individu genereert ten opzichte van de belasting van een groep. Doordat mensen allemaal uniek springen liggen de pieken van individuele belastingimpulsen niet perfect op elkaar. Deze reductie wordt het groepseffect genoemd. Er zijn verschillende manieren waardoor de pieken niet op elkaar hoeven te liggen. Dit kan bijvoorbeeld ontstaan door verschillen in de sprongperiode, de contactratio of het verschil in timing tussen individuen.

Het restant van deze paragraaf bediscussieert drie manieren om het groepseffect in rekening te brengen: 1) door een reductie op de harmonischen toe te passen; 2) door een faseverschil tussen individuele belastingsignalen toe te passen; en 3) door belastingsignalen van individuen bij elkaar op te tellen. Het laatste kan alleen effectief toegepast worden bij smalbandige belastingsignalen.

E.3.1 Gereduceerde harmonischen

Een mogelijke manier om belastingen te modelleren voor een groep is door het reduceren van de waarden van de harmonischen. Harmonischen worden o.a. gebruikt bij het belastingmodel van Ji & Ellis (1994). Door de waarde van de harmonischen te reduceren wordt het totale genormaliseerde belastingeffect ook gereduceerd.

Rainier et al. (1988) onderzochten springende mensen en vonden bij groepen van 8 personen een afname van 15% voor de 1e, 50% voor de 2e en een sterkere reductie voor hogere harmonischen. Voor kleinere groepen is het verschil kleiner. Ze benoemen niet welke invloed de reductie van de harmonischen heeft op de totale belasting. Pernica (1990) bevestigde deze trends en rapporteerde bij 8 personen reducties van 14% (1e), 53% (2e), 77% (3e), en 78% (4e). De eerste twee waarden komen overeen met de bevindingen van Rainier et al. (1988).

Ellis & Ji (2004) ontwikkelden een numeriek model voor groepsbelastingen (1-64 personen). Voor dynamische belastingfactoren formuleerden zij

$$\begin{aligned} a_1(p) &= 1,61p^{-0,082} \\ a_2(p) &= 0,94p^{-0,24} \\ a_3(p) &= 0,44p^{-0,31} \end{aligned} \tag{E.12}$$

waarbij a_i de i -de dynamische belastingfactor (harmonische) is en p het aantal personen is. De resultaten komen redelijk overeenkomen.

Parkhouse & Ewins (2004) splitsen de dynamische belastingfactor op in twee componenten: 1) een component die de synchronisatie tussen mensen beschrijft (de synchronisatie component, r_∞) en een component die de natuurlijke variatie beschrijft (de stochastische component, r_{ST}) met de bijbehorende relatie

$$r_p^2 = r_\infty^2 + \frac{r_{ST}^2}{p} \tag{E.13}$$

waarbij p het aantal personen is en r_p de dynamische belastingcoëfficiënt is (afhankelijk van het aantal personen). Ze vonden dat piekbelastingen bij groepen circa 1/3 lager liggen dan

bij individuen, en dat slechte synchronisatie leidt tot continue contactmomenten met de ondergrond.

E.3.2 Faseverschillen

Een methode om het belastingmodel van een individu uit te breiden naar een groepsbelasting is door het toekennen van een faseverschil tussen individuen. Het belastingmodel van een individu blijft daarmee onveranderd. Het faseverschil heeft tot gevolg dat de belastingpieken op verschillende tijdstippen gevonden worden, waardoor de totale belasting gereduceerd wordt.

Ebrahimpour & Sack (1989) hebben dit faseverschil gekarakteriseerd met een exponentiele verdeling. Ji & Ellis (1993) en Willford (2001) gaan er van uit dat het faseverschil beschreven kan worden als een normaal verdeelde stochast. In Ji & Ellis (1993) hangt de standaardafwijking af van de mate van synchronisatie. In Willford (2001) is de standaardafwijking een functie van de sprongperiode.

E.3.3 Sommatie van individuele belastingsmodellen

De belastingmodellen van Sim et al. (2008) en Weijs et al. (2025) zijn in de vorige paragraaf beschreven. Beide modellen generen belastingsignalen voor één individu. Dit proces kan herhaald en gesommeerd worden om een groepsbelasting te generen.

E.4 Discussie

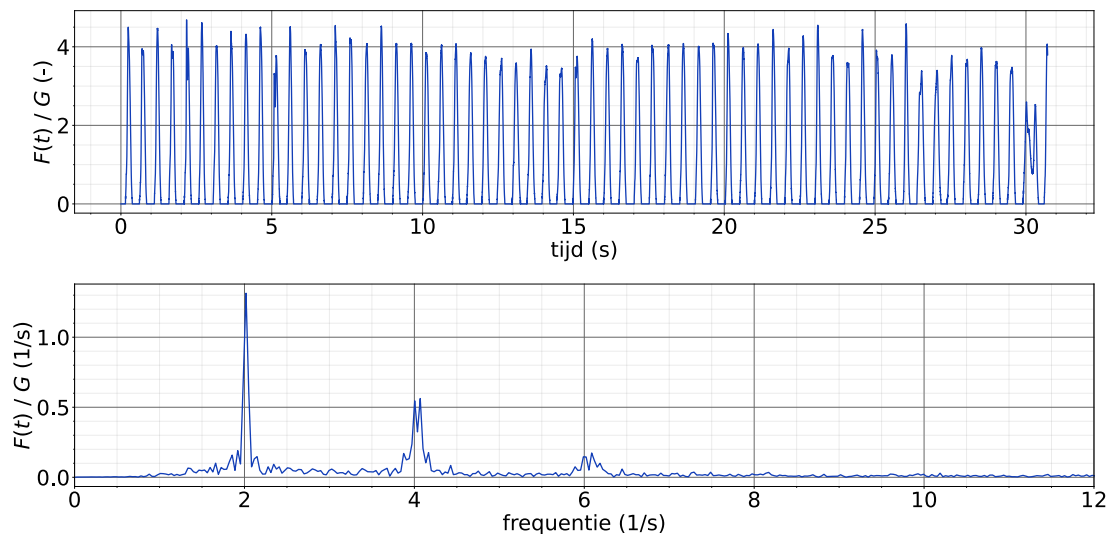
In paragrafen E.2 en E.3 is de huidige kennis van sprongbelastingen samengevat voor individuen en groepen. Deze paragraaf bediscussieert deze belastingmodellen. Eerst worden de sprongbelastingmodellen voor individuen behandeld, gevolgd door een discussie over groepseffecten.

E.4.1 Belastingmodellen voor een individu

Periodieke belastingmodellen

Bij een dynamische constructieve analyse speelt de frequentie van de belasting een grote rol. De belastingmodellen van Bachmann & Ammann (1987) en Ji & Ellis (1994) worden beschreven met perfect periodieke functies. Dit is een versimpeling van de realiteit omdat er geen rekening gehouden wordt met variaties die inherent zijn aan het springen.

Het gevolg is dat alle springenergie geconcentreerd is op de sprongfrequentie $f = 1/T_p$ en de harmonischen $n \cdot f$. Bij een dynamische analyse kan dit leiden tot een conservatieve inschatting van de responsie indien een van de frequenties dichtbij de eigenfrequentie van de constructie ligt. Een voorbeeld hiervan is gevisualiseerd in Figuur E.9. Het signaal in het frequentiedomein maakt duidelijk dat er sprake is van een spreiding in sprongenergie rondom de sprongfrequentie en de harmonischen.



Figuur E.9: Een voorbeeld van een tijdsignaal en een frequentiesignaal behorend bij een persoon die springt op een frequentie van 2 Hz (data van Xiong & Chen, 2021).

Een nauwkeuriger benadering is het beschouwen van de belasting als een smalbandig proces, waarbij energie ‘lekt’ naar frequenties naast de sprongfrequentie. Deze lekkage naar de naastgelegen frequentie neemt toe voor hogere harmonischen (Brownjohn et al., 2004). Hierdoor kan er rekening worden gehouden met de variabiliteit tussen opeenvolgende sprongen én met de variabiliteit tussen personen. Deze spreiding is met name terug te zien in het frequentiespectrum van het belastingsignaal.

Smalbandige belastingmodellen

De belastingsmodellen van Sim et al. (2008), Racic & Pavic (2009, 2010), en Weijs et al. (2025) houden rekening met deze spreiding. Voor de belastingmodellen van Racic & Pavic is een dataset van een springend individu nodig, wat hun model nauwkeuriger maakt maar minder praktisch is in gebruik. Voor het belastingmodel van Sim et al. en Weijs et al. is geen dataset nodig, omdat in deze belastingmodellen aangenomen wordt dat de impuls de vorm van een $\cos^2$ heeft.

Het belastingmodel van Sim et al. (2008) baseert zich op de theoretisch bepaalde lineaire relatie tussen de grootte van de impuls en de sprongperiode. Racic & Pavic (2010) vonden echter geen significante correlatie ($\rho = 0,235$ en wijten dit aan twee aannames van Sim et al.: 1) een instantane impulsduur, terwijl deze in werkelijkheid gelijk is aan de contactratio; en 2) gelijke lancerings- en landingsimpulsen, wat fysiek niet realistisch is bij menselijke interacties met de ondergrond.

E.4.2 Groepseffecten

Bij smalbandige belastingsignalen zijn belastingmodellen die groepseffecten beschrijven via reducties van dynamische belastingfactoren niet toepasbaar, omdat deze alleen harmonischen beschouwen. In een smalbandig proces is de springenergie in de harmonische lager, want deze is ‘gelekt’ naar naastgelegen frequenties.

Variabiliteit tussen individuen kan gemodelleerd worden met faseverschillen, maar bestaande methoden negeren de variabiliteit binnen opeenvolgende sprongen van één

individu, wat volgens Sim et al. (2008), Racic & Pavic (2009, 2010), en Weijs et al. (2025) een grote invloed heeft op het belastingsignaal.

Racic & Pavic (2009, 2010) leveren geen suggestie om het individuele belastingsignaal te vertalen naar een groepsbelastingmodel en twijfelen of willekeurige faseverschillen de geschikte oplossing zijn.

De modellen van Sim et al. (2008) en Weijs et al. (2025) houden zowel rekening met variabiliteit tussen sprongen als tussen individuen. Het model van Sim et al. is echter gebaseerd op een theoretische lineaire relatie tussen sprongimpuls en -periode, die Racic & Pavic (2010) niet hebben waargenomen. Het model van Weijs et al. (2025) baseert zich volledig op empirische data van Xiong & Chen (2021), maar deze dataset is gebaseerd op Chinese studenten. Het is niet bekend of deze dataset representatief is voor de Nederlandse tribunebezoeker. Een vervolgonderzoek zou hierop gericht moeten zijn. Indien dit representatief is wordt aanbevolen het belastingmodel van Weijs et al. (2025) te gebruiken voor het bepalen van de karakteristieke waarde van de sprongbelasting.

Hoewel de geschiktheid van een $\cos^2$ -functie discutabel is, zijn dit de meest complete belastingmodellen om springende groepen te modelleren. Discussies over de impulsvorm zijn vooral relevant bij lagere sprongfrequenties ($\leq 1,5$ Hz), welke buiten het comfortabele springbereik van groepen liggen (1,8-2,3 Hz, Ginty et al., 2001).

Mobility & Built Environment

Molengraaffsingel 8
2629 JD Delft
www.tno.nl