

TNO-rapport
B-92-1218

Achtergronden bij de meetmethode voor stootbelastingen op constructie-onderdelen

TNO Bouw

Contactpersoon
P.C. van Staalduinen

Lange Kleiweg 5, Rijswijk
Postbus 49
2600 AA Delft

Telefoon 015 284 20 00
Fax 015 284 39 90

Datum
oktober 1993, herzien april 1994

Auteur(s)
Ir. P.C. van Staalduinen, Ir. P.E. de Winter, Prof.ir. A. Vrouwenvelder

Opdrachtgever : Ministerie van VROM

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

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

Projectnaam : -
Projectnummer : 21.3.8684.005

Aantal pagina's : 60
Aantal tabellen : -
Aantal figuren : 1
Aantal bijlagen : 3

2000

INHOUDSOPGAVE

	Pagina
SAMENVATTING	1
1. INLEIDING	2
1.1 Beleidsprobleemstelling	2
1.2 Onderzoeksprobleemstelling	2
2. ONDERZOEK	2
2.1 Doelstelling	2
3. STOOTBELASTINGEN	4
3.1 Uitgangspunten voor een meetmethode	4
3.2 Modelvorming voor stootbelastingen	4
3.3 Onderzoek naar stootbelastingen op scheidings-constructies	10
3.4 Onderzoek naar stootbelastingen op vloeren en daken	15
4. INVENTARISATIE VAN MEET- EN BEPROEVINGSMETHODEN	19
4.1 Inleiding	19
4.2 UEAtc richtlijnen voor verticale elementen	19
4.3 Nederlandse beoordelingsrichtlijnen voor verticale elementen	21
4.4 Nederlandse beoordelingsrichtlijnen voor horizontale elementen	24
4.5 Nederlandse normen voor verticale elementen	25
4.6 Internationale normen voor verticale elementen	25
4.7 Conclusies naar aanleiding van de inventarisatie van meet- en beproevingsmethoden	25
5. MEETMETHODE OF BEPROEVINGSMETHODE	27
6. BETROUWBAARHEIDSASPECTEN	28
6.1 Algemeen	28
6.2 Belasting bij toepassing van de meetmethode	29
6.3 Belasting bij toepassing van de beproevingsmethode	33
7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	37
LITERATUUR	39
BIJLAGE I - IMPACT OP VERTICALE ELEMENTEN	41
BIJLAGE II - IMPACT OP HORIZONTALE ELEMENTEN	47
BIJLAGE III - IMPACT OP HORIZONTALE ELEMENTEN	53

SAMENVATTING

In het kader van PRONORM 1992 is door TNO-Bouw in opdracht van het Ministerie van VROM prenormaliserend onderzoek uitgevoerd, ter voorbereiding op het opstellen van een meetmethode voor stootbelastingen. Het onderzoek heeft geresulteerd in een voorstel voor een meetmethode, dat in een separaat rapport is opgenomen (TNO-Bouw rapport B-92-1143). De achtergronden van de meetmethode zijn in het onderhavige rapport opgenomen.

1. INLEIDING

1.1 Beleidsprobleemstelling

In het kader van de deregulering van de bouwregelgeving is een Bouwbesluit ter vervanging van de gemeentelijke bouwverordeningen, voorzover het de bouw- en woontechnische eisen betreft, genomen.

1.2 Onderzoeksprobleemstelling

In het Bouwbesluit is verwezen naar NEN 6702, die door het NNI is uitgegeven. Deze norm dient in lijn te zijn met de basisfilosofie Bouwbesluit. Ten aanzien van de bij de bepaling van de sterkte aan te houden stootbelasting moet rekening zijn gehouden met de onderdelen 9.5 en 9.6 van die norm. De normtekst geeft op dit punt een berekeningsmethode voor de bepaling van de grootte van de stootbelasting. De norm is op dit punt conservatief geformuleerd. Een meetmethode voor de bepaling van de sterkte van een bouwconstructie t.g.v. de stootbelasting ontbreekt.

2. ONDERZOEK

2.1. Doelstelling

Het doel van het uitgevoerde onderzoek is het opstellen van een voorstel voor een meetmethode voor de stootbelasting.

2.1.1 Werkwijze

Het onderzoek is uitgevoerd in de vorm van een bureaustudie ondersteund door enige experimenten. Allereerst is een onderzoek verricht naar een modelmatige benadering van het verschijnsel stootbelasting. Deze resultaten hiervan zijn opgenomen in hoofdstuk 4. Voorts is een inventarisatie uitgevoerd van bestaande meet- en beproevingsvoorschriften, waarvan verslag is gedaan in hoofdstuk 5.

Tenslotte is in hoofdstuk 6 een afweging gemaakt tussen het opstellen van een meetmethode of een beproevingsmethode voor de stootbelastingen. Conclusies en aanbevelingen zijn opgenomen in hoofdstuk 7; op basis hiervan is een voorstel voor een meetmethode opgesteld, waarvoor wordt verwezen naar TNO-Bouw rapport B-92-1134.

3. STOOTBELASTINGEN

3.1 Uitgangspunten voor een meetmethode

Het doel van een meetmethode voor de weerstand tegen stootbelastingen is om de bedoelde weerstand van een constructie-onderdeel door middel van een meting *in situ* vast te stellen. Een beproevingsmethode is bedoeld om deze weerstand aan de hand van prototypen in het laboratorium vast te stellen.

Stootbelastingen kunnen zowel op horizontale constructie-onderdelen zoals vloeren en daken werkzaam zijn, bijvoorbeeld als gevolg van de val van een persoon, als op verticale constructie-onderdelen, zoals scheidingsconstructies. Stootbelastingen kunnen ook optreden ten gevolge van de val of impact van harde, kleine objecten.

Als gevolg van de stootbelasting mag het constructie-onderdeel vervormen of scheurvorming vertonen. Het constructie-onderdeel moet daarna echter nog steeds in staat zijn weerstand te bieden tegen de statische punt- en lijnlasten, zoals omschreven in 8.2.5 en 8.2.6 van NEN 6702, zoals bij of krachtens het Bouwbesluit voor de bestaande bouw.

In dit hoofdstuk is nagegaan op welke wijze de stootbelasting optreedt en op welke wijze de stootbelasting kan worden gemodelleerd.

3.2 Modelvorming voor stootbelastingen

3.2.1 Inleiding

Als gevolg van een val op de vloer of dak of een botsing met een uitwendige scheidingsconstructie wordt een kortdurende belasting op de betrokken scheidingsconstructie uitgeoefend. Deze belasting kan worden gekenmerkt door de maximale waarde van de kracht, de tijdsduur van de

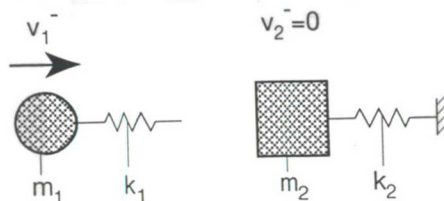
kracht en door de stoot, dat is het oppervlak, gelegen onder de kracht-tijd-curve. De stootbelasting kan voorts worden gekenmerkt door de energie van het lichaam of object, dat de stoot veroorzaakt. De energie van de stoot is in NEN 6702:1991 voor zowel stootbelasting op daken als op relingen en balustraden opgegeven.

Uit eerder in Duitsland verricht onderzoek (Struck, 1976) blijkt dat de stootbelasting als gevolg van het vallen of springen van personen, alsmede ten gevolg van een stoot met de schouder tegen een verticale scheidingsconstructie, bij goede benadering kan worden beschouwd als een quasi-statische belasting op de scheidingsconstructie.

3.2.2. De elastische of volledig inelastische stoot

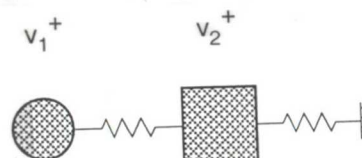
Verondersteld wordt dat een lichaam met een zekere trefsnelheid op een scheidingsconstructie terecht komt. Blijkens onderzoek (Struck, 1976) kan de interactiekracht als gevolg van het treffen worden beschreven door beide objecten te schematiseren tot een dynamisch systeem met massa en stijfheid.

Voor de botsing:



$t = 0^-$

Na de botsing:



$t = 0^+$

Twee geïdealiseerde gevallen kunnen worden beschouwd:

- de volledig elastische botsing, waarbij de energie die voor de botsing aanwezig is, na de botsing, verdeeld over beide objecten, behouden blijft
- de volledig inelastische botsing, waarbij de snelheid van beide objecten na de botsing gelijk is.

volledig inelastische botsing

Te allen tijde geldt de wet van behoud van impuls:

$$m_1 v_1^- = m_1 v_1^+ + m_2 v_2^+$$

In het geval van een volledig inelastische botsing is de snelheid van beide objecten gelijk, $v_1^+ = v_2^+$, zodat:

$$m_1 v_1^- = (m_1 + m_2) v_1^+$$

De kinetische energie direct na de botsing wordt door de vervorming van het getroffen constructie-onderdeel omgezet in potentiële energie:

$$\frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_1^{+2} = \frac{1}{2} k x^2$$

Hieruit volgt:

$$\begin{aligned} x &= v_1^+ \sqrt{\left(\frac{m_1 + m_2}{k} \right)} \\ &= v_1^+ \sqrt{\frac{m_2}{k}} \sqrt{\left(\frac{m_1 + m_2}{m_2} \right)} \\ &= v_1^+ / \omega_2 \sqrt{\left(\frac{m_1 + m_2}{m_2} \right)} \end{aligned}$$

met $M = m_1/m_2$ volgt:

$$x = v_1^+ / \omega_2 \sqrt{(M+1)}$$

De energie die als gevolg van de botsing verloren is gegaan bedraagt:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_1 v_1^{-2} - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v_1^{+2} = \frac{1}{2} m_1 v_1^{-2} \left(\frac{1}{M+1} \right)$$

De verhouding van de energie voor en na de botsing is bij de volledig inelastische botsing dus $M/(M+1)$.

Volledig elastische botsing

In dit geval wordt de kinetische energie van het botsende lichaam eerst volledig omgezet in potentiële energie in de interactie-veer:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} k_1 x_1^2$$

De maximale kracht op de getroffen constructie is dus:

$$F_{\max} = \sqrt{(m_1 v_1^2 / k_1)}$$

Uit onderzoek (Struck, 1976) blijkt dat de zogenaamde veerkrachtige neersprong van een persoon op een ondersteunende constructie bij benadering op deze wijze kan worden gemodelleerd. Daarbij is k_1 de veerstijfheid van de persoon, welke kleiner blijkt te zijn naarmate de 'valhoogte' groter is. Voor kleine hoogten volgt voor k_1 circa 50 kN/m. Bij valhoogten van 1 m is de veerstijfheid nog slechts circa 20 kN/m. Zo zal de maximale kracht bij de sprong van een persoon met een massa van 90 kg van 1 m hoogte circa 6 kN bedragen.

In de praktijk zal het karakter van de botsing afwijken van de hiervoor gegeven idealisering. Volgens onderzoek van Struck 1981 en Mann 1979 is bij een val van personen of een stoot door personen de betrekking voor de maximale doorbuiging van het getroffen object te schrijven als:

$$x = v_1^+ / \omega_2 K M$$

waarin:

K is een factor, afhankelijk van ω_2 , ω_1 en M .

Voor de verhouding van de energie voor en na de botsing geldt nu:

$$E_{\text{na}}/E_{\text{voor}} = K^2 M$$

De factor K kan volgens de leer der mechanica worden berekend door beide systemen te schematiseren als twee afzonderlijke één-massa-veersystemen, met v_1^- voor object 1 juist voor de botsing, en als twee, via de veer k_1 gekoppelde massa-veersystemen na de botsing.

Voor de snelheid van object 1 geldt dan:

$$v_1^+(t) = v_1^- - \int k [x_1^+(t) - x_2^+(t)]/m_1 dt$$

$$v_2^+(t) = \int k [x_1^+(t) - x_2^+(t)]/m_2 - k_2 x_2^+(t)/m_2 dt$$

en:

$$x_1^+(t) = \int v_1^+(t) dt$$

$$x_2^+(t) = \int v_2^+(t) dt$$

Voor de kracht in de tweede veer geldt:

$$F(t) = k_2 x_2^+(t)$$

Via numerieke integratie is hiermee de maximale kracht F_{max} en via de stijfheid k_2 de factor K te bepalen. Deze blijkt af te hangen van de massa en stijfheidsverhoudingen van het vallende en het getroffen object, zie Limberger en Struck (1971). De modellering leent zich verder goed voor het in rekening brengen van elasto-plastisch gedrag van de getroffen constructie, zie Limberger (1975). Struck (1976) rapporteert dat deze berekeningswijze een goede overeenstemming met proeven, waarbij personen zich met gestrekte knie op een ondersteuningsconstructie lieten vallen.

3.2.3 Volledige overdracht van energie

In NEN 6702 is een berekeningsmethode opgenomen, die uitgaat van de aanname van een volledige overdracht van de energie.

In NEN 6702:1991 wordt van verticale elementen, zoals scheidingswanden, geeist dat zij weerstand bieden tegen een stootbelasting met een energie van 500 Nm. In het geval van de stootbelasting op daken is in 9.5 van NEN 6702:1991 de kinetische energie van de stoot gegeven, namelijk 350 Nm. Deze waarde volgt uit de overweging dat een persoon van 70 kg vanaf ca. 0.5 m hoogte valt.

De aanname van een volledige overdracht van de energie van de stootbelasting is conservatief ten opzichte van de aanname van een volledig inelastische botsing, omdat daar mechanische energie verloren gaat, en is ook conservatief ten opzichte van de aanname van een volledig elastische botsing, omdat daarbij de energie over het stootlichaam en het getroffen object wordt verdeeld.

Indien een constructie-onderdeel zich lineair elastisch gedraagt geldt voor de verrichte arbeid bij een verplaatsing ten gevolge van de stootbelasting:

$$W = \int F \, dx = \frac{1}{2} F_{\max} \delta_{\max} = \frac{1}{2} F_{\max}^2 / k$$

Nu geldt:

$$W = E_{\text{stoot}}$$

zodat:

$$F_{\max} = \sqrt{(2 m g h k)} = \sqrt{(2 E_{\text{stoot}} k)}$$

Hiermee is een statisch equivalente kracht gevonden voor de stootbelasting op een constructie-onderdeel met lineair elastisch gedrag onder de aanname van een volledige energie-overdracht. Aangezien bij de stootbelasting het product ($m g h$) constant is, volgt uit bovenstaande formule dat de statisch equivalente kracht toeneemt met de stijfheid van het getroffen object.

3.3 Onderzoek naar stootbelastingen op scheidingsconstructies

3.3.1 Onderzoek van Struck (1976)

In een onderzoek van Struck (1976) is een meetmethode onderzocht bedoeld om de horizontale impact als gevolg van een stoot met de schouder te simuleren. Hierbij is getracht aan te sluiten bij de schematisering van het stotend en getroffen object door middel van een massa-veersysteem, zoals besproken in hoofdstuk 3. Uit het onderzoek van Struck blijkt dat de in rekening te brengen stijfheid van de veer 1 sterk afhangt van de trefsnelheid. De duur van de stoot neemt ook af met de trefsnelheid, van circa 0,2 s bij 1 m/s, 0.135 s bij 2 m/s en 0.118 s bij 2.6 m/s.

Uit een groot aantal proeven op verschillende scheidingsconstructies is door Struck onderstaande relatie afgeleid:

$$k_1/m_1 = -141 + 1144 \bar{v}_1$$

waarin $\bar{v}_1$ in m/s, k_1 in N/m en m_1 in kg. Deze benadering is tot trefsnelheden van 1,5 m/s vrij nauwkeurig. Als massa m_1 geldt de effectieve massa van de betrokken persoon.

Uit het onderzoek van Struck blijkt dat bij een schouderstoot maximaal een snelheid van 2,6 m/s haalbaar is, zonder dat lichamelijk letsel optreedt. Bij een effectieve massa van de persoon van 30 kg levert dit een veerconstante in de orde van 80.000 N/m.

In bijlage I zijn enkele berekeningsresultaten gegeven op basis van de voorgaande theorie met $v_1 = 2,6$ m/s, $m_1 = 30$ kg, k_1 volgens de hiervoor gegeven relatie, voor verschillende combinaties van massa en stijfheid van de scheidingsconstructie.

3.3.2 Vergelijking methode Struck en andere meetmethoden

Struck (1976) maakt melding van twee vergelijkende proeven met de zandzak-slingerproef, waarbij de verhouding van de overgedragen energie en de kinetische energie is bepaald. Het betreft een beproeving van twee scheidingswanden, die zich bij de proef lineair elastisch gedroegen.

Energieoverdracht naar het getroffen object

Het eerste wandsysteem is te schematiseren met een stijfheid $k_2 = 13250$ N/m en een massa $m_2 = 16,5$ kg. Bij de proef, waarbij is gewerkt met een zandzak met een massa van 50 kg en een valhoogte van 1 m is de verhouding van de overgedragen energie ten opzichte van de totale energie 0,50. Voor het tweede wandsysteem geldt $k_2 = 90700$ N/m en $m_2 = 33,6$ kg. Hierbij bedraagt de verhouding van de overgedragen en de totale energie 0,45.

Uit berekeningen volgens de theorie in hoofdstuk 3 volgt dat bij aanstoting door een persoon een energie-overdracht met een verhouding van bijna 1.0 zal optreden. Dit betekent dat de stoot uitgeoefend door de mens een effectievere energie-overdracht heeft, of anders gezegd, dat bij de zandzakproef een belangrijk deel van de energie door de zandzak wordt opgenomen.

Bij de beproeving met de zandzak moet dus rekening worden gehouden met het feit dat afhankelijk van stijfheid en massa van de te beproeven constructie slechts een deel van de kinetische energie van de stoot wordt overgedragen. In vergelijking met de werkelijke stoot met de schouder wordt te weinig energie overgedragen. Als ervan wordt uitgegaan

dan 2,6 m/s een hoogst haalbare aanstootsnelheid voor de mens is, en dat de energieoverdracht praktisch volledig is, dan is bij een massa van 30 kg de maximaal overgedragen energie in de orde van 100 Nm. De stootbelasting volgens NEN 6702:1991 heeft een energie van 500 Nm. Bij lineair elastisch reagerende scheidingswanden zal hiervan in de orde van 50 % worden overgedragen, dus circa 250 Nm. Dit lijkt op het eerste gezicht ruimschoots voldoende. In hoofdstuk 6 wordt hierop teruggekomen.

Hoewel hierover in de literatuur geen proefgegevens zijn aangetroffen, moet worden aangenomen dat bij een plastisch gedrag van een te beproeven object de hoeveelheid overgedragen energie bij de beproeving met een zandzak zal toenemen. Bij een ideaal plastisch reagerende scheidingswand zal bij beproeving met een slingerproef derhalve de hoeveelheid overgedragen energie nog groter zijn dan 250 Nm.

Dit betekent dat de eigenschappen van het stootobject en van de scheidingswand in belangrijke mate bepalend zijn voor de hoeveelheid energie die de stootbelasting zal overdragen.

Tijdsduur van de stoot en topwaarde van de kracht

Uit de door Struck vermelde vergelijkende proeven blijkt dat bij de zandzakslingerproef de tijdsduur van de stoot *niet* afhankelijk is van de trefsnelheid, maar voornamelijk wordt bepaald door de stijfheid van het getroffen object. Bij de scheidingswand met $k_2 = 13250 \text{ N/m}$ volgt $\Delta t \approx 0,17 \text{ s}$ en bij $k_2 = 90700 \text{ N/m}$ volgt $\Delta t \approx 0,07 \text{ s}$. Hieruit volgt direct dat bij een gelijke valhoogte de topwaarde van de uitgeoefende belasting bij de zandzakslingerproef afhankelijk is van de stijfheid van de scheidingswand.

Bij proefnemingen bij TNO-Bouw met een zandzak volgens ISO 8270:1985 op een als oneindig stijf te beschouwen object was de tijdsduur van de stoot ongeveer 0,030 s, ongeacht de valhoogte. Bij beproevingen met de

hagelzak volgens NEN 3568:1980 op een als oneindig stijf te beschouwen object volgt een tijdsduur van de stoot van 0,020 s. Ook hier bleek geen afhankelijkheid van de valhoogte voor wat betreft de tijdsduur van de stoot. De beproevingen bij TNO-Bouw geven ook enig inzicht in de maximaal te verwachten belastingen bij gebruik van een slingerproef bij een impact op een star object. Voor de proef uit ISO 8270:1985 zal dit circa 8,8 kN bedragen, voor de proef zoals genoemd in de toelichting van NEN 6702:1991 circa 17 kN en voor de slingerproef volgens NEN 3568 circa 27 kN.

De topwaarde van de kracht ten gevolge van een schouderstoot ligt volgens het onderzoek van Struck bij verschillende soorten scheidingswanden bij de maximale trefsnelheid tussen 3 en 4 kN.

Er zijn ook proeven uitgevoerd met een glasbollen zak (50 kg) volgens ISO 7892:1988. Bij een beproeving van een als oneindig stijf te beschouwen object bij een valhoogte van 1 m bedroeg de duur van de stoot 0,050 s en de topwaarde van de kracht circa 7,5 kN.

3.3.3 Conclusies naar aanleiding van de vergelijking

Uit de voorgaande beschouwing volgt dat met name voor starre scheidingswanden de topwaarde van de kracht bij een slingerproef zoals genoemd in de toelichting van NEN 6702:1991 tot een factor 4 à 5 hoger zal liggen dan bij moedwillige impact door de mens mogelijk is.

Bij gebruik van een zak volgens ISO 7892:1988 bedraagt de maximale kracht in de orde van 2 maal van de waarde bij moedwillige impact.

Bij zeer flexibele en plastisch reagerende scheidingswanden mag worden aangenomen dat de energie-overdracht bij de proef in de orde van een factor 3 groter is dan ten gevolge van een moedwillige impact door de mens.

In de minder extreme gevallen speelt de dissipatie van energie in het stootobject een grote rol. De vergelijkende proeven geven aan dat ondanks de hoge dissipatie in het stootobject een effectieve energie-overdracht in de orde van 100 Nm, zoals bij een schouderstoot kan worden uitgeoefend, ruimschoots wordt gerealiseerd.

3.4 Onderzoek naar stootbelastingen op daken

3.4.1 Onderzoek van Struck en Limberger

Voor een rekenmodel is de in hoofdstuk 3 opgestelde theorie in beginsel bruikbaar. Ook hier zal een aanname moeten worden gedaan voor de stijfheid en de massa van het vallend object. Struck en Limberger hebben onderzoek gedaan naar de in rekening te brengen waarden van stijfheid en massa bij een flexibele en een zgn. starre sprong op een vloer.

De stijfheid bij de flexibele sprong is in de orde van 20 à 30 kN/m. De waarde van de stijfheid bij een starre sprong met 1 resp. 2 voeten bedraagt 65 en 130 kN/m. Gegevens over de modellering van de mens als mechanisch systeem bij een echte val zijn gegeven in literatuur [8]. Het hier omschreven model is echter te omvangrijk om in het kader van deze studie te worden onderzocht. Bovendien hebben de in [8] beschreven gevallen alle betrekking op een val van grote hoogte.

Te verwachten valt dat een echte 'val' minder goed gebroken zal worden dan de flexibele sprong, maar dat de stijfheid bij een starre sprong in de buurt van een bovengrens zal liggen. Een starre sprong is echter tot een zeer beperkte hoogte mogelijk. In de literatuur worden hoogten tot 0.24 m gerapporteerd.

Struck en Limberger (1981) hebben met de theorie die in hoofdstuk 3 is behandeld aangetoond dat de optredende maximale belasting altijd onder de oplossing van de on-elastische stoot ligt.

Op basis van de hiervoor gegeven veerstijfheid en massa van de proefpersoon zijn berekeningen gemaakt met behulp van de hiervoor omschreven modellering naar de maximale krachten en energie-overdracht bij een sprong op een vloer of dak. De resultaten hiervan zijn opgenomen in bijlage II (starre sprong van 0,25 m hoogte) en in bijlage III (flexibele sprong van 1,0 m hoogte).

3.4.2 Vergelijking onderzoek Struck/Limberger met valproeven

Tijdsduur van de stoot en topwaarde van de kracht

Uit deze berekeningen valt af te leiden dat de topwaarde van de uitgeoefende kracht F_{ext} in geval van een *starre sprong* toeneemt met de massa van het getroffen constructie-onderdeel. De topwaarden liggen in het interval van 2,3 tot 4,5 kN. De stijfheid van het constructie-onderdeel is voor de topwaarde van de kracht minder van belang. Bij een *flexibele sprong* liggen de topwaarden globaal tussen 2,8 en 5,7 kN en nemen, vooral bij lichte elementen, toe naarmate de stijfheid van het constructie-onderdeel toeneemt.

Door TNO-Bouw is in het kader van dit onderzoek welke belastingen te verwachten zijn bij het uitvoeren van een valproef, waarbij een zak zand met een massa van 35 kg van een zekere hoogte een als oneindig stijf te beschouwen vloerconstructie treft. De proeven zijn uitgevoerd in november 1992. Uit de proefnemingen op een starre onderconstructie blijkt dat de duur van de stoot bij een valhoogte van 0,7 m omstreeks 0,012 s bedraagt, en de topwaarde van de kracht bij deze valhoogte gemiddeld 32 kN. Vergeleken met de resultaten van de starre en de verende sprong, zoals gepresenteerd in bijlage II en III moet geconstateerd worden dat de topwaarde van de kracht bij de proef in de orde van 5 maal zo groot is.

Tijdens de proeven is geconstateerd dat het zand in de zandzak ten gevolge van de proef in belangrijke mate wordt verdicht. Indien de zandzak niet grondig wordt opgeschud, neemt de topwaarde van de kracht bij opeenvolgende valproeven sterk toe. De kans op een niet goed reproduceerbaar proefresultaat is hierdoor groot. Ten gevolge van de val vervormt de zakzand aanzienlijk. Er treedt naar verwachting een sterke dissipatie van energie in de zandzak op. De grootte hiervan is echter niet vastgesteld.

Er zijn ook proeven uitgevoerd met een zak volgens ISO 7892:1988. Bij een valhoogte van 0,7 m en een star object blijkt de topwaarde in de orde van 12 kN te bedragen bij een duur van de stoot van ca. 0,033 s. Opvallend is dat de zak volgens ISO 7892:1988 na de valproef weer goed in zijn oorspronkelijke vorm terugkomt. De proeven zijn daardoor ook vrij goed reproduceerbaar. Door de langere stootduur is, ondanks de grotere massa, de topwaarde van de kracht geringer dan bij de zandzak van 35 kg. De topwaarde van de externe kracht is nu in de orde van een factor 2 hoger dan volgens de proeven van Struck.

Overgedragen energie

Zowel bij de starre als bij de flexibele sprong neemt de overgedragen energie sterk af met stijfheid. De overgedragen energie is blijkens de berekeningen maximaal bij een grote flexibiliteit van het constructie-onderdeel en bedraagt dan circa 0.85 maal de kinetische energie van de stoot; bij een grote stijfheid van het constructie-onderdeel ligt de overgedragen energie in de orde van 0,2 maal de kinetische energie. Dit betekent dat naarmate de stijfheid van een vloer of dak toeneemt, een belangrijk deel van de valenergie in het stootobject moet worden opgenomen.

3.4.3 Conclusies naar aanleiding van de vergelijking

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat de topwaarden van de belasting bij het uitvoeren van een valproef groter zijn dan die welke worden veroorzaakt door springende personen. Met name de zandzakvalproef volgens de KOMO richtlijn dakbedekkingen (zie par. 4.4) levert zeer hoge belastingen (orde: factor 5 hoger). De valproef met een zak volgens ISO 7892 levert ook conservatieve waarden (orde: factor 2 hoger).

Wel moet worden gedacht dat met name op daken, de betrokken persoon gereedschappen of materialen met zich mee kan dragen (de dakdekker met een rol dakleer op de schouder bijvoorbeeld), die ten gevolge van de val ook op de vloer of op het dak terechtkomen. Over de belastingen die dit met zich meebrengt zijn in de literatuur geen gegevens aangetroffen. Het lijkt evenwel verstandig er rekening mee te houden dat dit tot een hogere belasting kan leiden dan optreedt ten gevolge van een springende persoon.

Dit alles overziende bestaat er een voorkeur, zowel gelet op het niveau van de belasting als op de reproduceerbaarheid van de proef, om de valproef uit te voeren met een zak volgens ISO 7892:1988.

4. INVENTARISATIE VAN MEET- EN BEPROEVINGSMETHODEN

4.1 Inleiding

In de literatuur wordt verwezen naar een groot aantal meet- en beproevingsmethoden voor de weerstand tegen stootbelasting. Een aantal van die methoden zijn in dit hoofdstuk geïnventariseerd en in dit hoofdstuk gepresenteerd.

4.2 UEAtc richtlijnen voor verticale elementen

4.2.1 *Note 1 'Comportement aux chocs des systemes d'isolation des facades par l'exterieur' (zj) (UEAtc)*

Dit document geeft een beproevingsmethode waarbij gebruik gemaakt wordt van een zachte zware zandzak met een massa van 50 kg en een valhoogte van 0,8 m. De zandzak heeft dezelfde afmetingen als omschreven in ISO 7892:1988. De toe te passen energie van de stoot bedraagt 400 Nm.

4.2.2 *Directives Communes pour l'agrement des facades legeres (UEAtc, z.j)*

Onder art 1.2 in deze richtlijn wordt de weerstand tegen uitwendige stootbelastingen behandeld; onder art 1.3 wordt behandeld de weerstand tegen inwendige stootbelastingen (de zgn. 'veiligheidsschokken').

Artikel 1.31 omschrijft een stootbelasting met een kinetische energie van 1000 Nm, toe te passen aan de buitenzijde van de uitwendige scheidingsconstructie.

Artikel 1.32 omschrijft de volgende stootbelasting aan de binnenzijde van de uitwendige scheidingsconstructie:

- Door niet-doorschijnende gedeelten moet weerstand worden geboden aan een schok met een zacht lichaam met een energie van 1000 Nm, waarbij de buitenbekleding niet mag worden doorboord of weggeslagen, alsmede geen brokstukken of elementen naar buiten vallen, die lichamelijk letsel zouden kunnen teweegbrengen bij personen, die zich buiten bevinden.
- Voor borstweringen aan de binnenzijde waarvan een beschermend element (leuning o.i.d.) is aangebracht mag de energie worden teruggebracht tot 750 Nm, indien het bedoelde element weerstand biedt aan een schok met een energie van 1000 Nm.

Het te hanteren proefobject is gespecificeerd in hoofdstuk IV, art. 1.2 en bestaat uit een zandzak van 50 kg, diameter 400 mm, één en ander conform ISO 7892.

4.2.3 *Directives UEAtc pour l'agrement des elements de remplissage*
(maart 1982)

Hoofdstuk II, art 1.12 van deze richtlijn stelt de eisen aan de mechanische weerstand tegen schokken. (1.121 algemeen, 1.122 uitwendige stootbelasting, 1.123 inwendige stootbelasting, 1.124 aard en grootte van de stootbelasting). De massa van het stootobject moet 50 kg bedragen, het energieniveau kan worden gekozen uit vijf categorieën

Hoofdstuk IV, art 4 van de richtlijn geeft de meetmethode voor de stootbelasting. De massa bedraagt 50 kg, de afmetingen zijn conform ISO 7892. De lengte van de hangdraad moet groter zijn dan 3 m

4.3 Nederlandse beoordelingsrichtlijnen voor verticale elementen

4.3.1 BRL 1002/03 van 84-11-01 (KOMO) 'Niet dragende Woningscheidende en woningbegrenzende wanden'.

Dit document verwijst naar UEAtc richtlijn 'Directives Communes pour l'agrement des cloisons legeres' hoofdstuk 11, par. 1.12 voor wat betreft de eis en hoofdstuk III, par 1.2 voor wat betreft de toetsingsmethode.

Deze beoordelingsrichtlijn eist van constructie-onderdelen dat zij niet doorboord worden, kapot gaan of beschadigingen vertonen op een voor de gebruiker gevaarlijke wijze onder invloed van een schok met een zacht lichaam met een energie van 240 Nm. Als interpretatie is aan de eis toegevoegd, dat het plaatmateriaal aan de ontvangzijde wel een deuk of scheur mag vertonen, maar niet volledig doorboord mag worden.

De massa en afmetingen van het beproevingsobject wijken af van ISO 7892, namelijk:

- massa: 30 kg
- opgehangen: 0.15 m voor de wand
- diameter: 0.25 m
- valhoogte: 0.8 m
- proef uit te voeren op het midden van de wand, 3 maal achtereenvolgend op dezelfde plaats.

Een object met massa 25 kg en valhoogte van 0,9 m wordt in deze beoordelingsrichtlijn gelijkwaardig geacht.

- 4.3.2 *BRL 1003/01 van 84-11-01 (KOMO) 'Niet dragende scheidingswanden'.*

Deze beoordelingsrichtlijn verwijst naar UEAtc richtlijn 'Directives Communes pour l'agrement des cloisons legeres' hoofdstuk 11, par. 1.12 voor wat betreft de eis en hoofdstuk III, par 1.2 voor wat betreft de toetsingsmethode.

De inhoud is verder gelijk aan de BRL genoemd onder punt 4.2.1

- 4.3.3 *BRL 2337/01 van 85-09-01 (KOMO) 'Gevels met sandwichpanelen toegepast in niet-woongebouwen' (staalplaat rond een kern van PUR procesgelaagd).*

Met betrekking tot stootbelastingen wordt onder art 4.1.1.2 geeist, onder verwijzing naar de UEAtc richtlijn hoofdstuk II par. 1.13, dat de veiligheid van bewoners ten allen tijde verzekerd moet blijven onder invloed van schokken, die een gevolg zijn van bewoning.

Idem, onder verwijzing naar hoofdstuk III, par. 1.212, moet door niet-doorschijnende gedeelten weerstand worden geboden aan een schok met een zacht lichaam met een energie van 1000 Nm, waarbij de buitenbekleding niet mag worden doorboord of weggeslagen, en de binnenbekleding niet beschadigd mag worden.

Idem, onder verwijzing naar par. 1.32, moet door niet-doorschijnende gedeelten weerstand worden geboden aan een schok met een zacht lichaam met een energie van 1000 Nm, waarbij de buitenbekleding niet mag worden doorboord of weggeslagen, alsmede geen brokstukken of elementen naar buiten vallen, die lichamelijk letsel zouden kunnen teweegbrengen bij personen, die zich buiten bevinden.

Voor borstweringen aan de binnenzijde waarvan een beschermend element (leuning o.i.d.) is aangebracht mag de energie worden teruggebracht tot

750 Nm, indien het bedoelde element weerstand biedt aan een schok met een energie van 1000 Nm.

Voor de toetsing of aan bovengenoemde eisen wordt voldaan, wordt gerefereerd aan UEAtc richtlijn hoofdstuk IV, par. 1.2. Het object is een zak gevuld met zand, met afmetingen conform ISO 7892. De vulling wijkt echter af en bestaat uit zand met een korreldiameter tussen 0 en 5 mm en een volumegewicht in droge toestand tussen 15,5 en 16 kN/m³. De massa bedraagt 50 kg, de valhoogte 2 m.

4.3.4 SBR rapport B40-1 'Richtlijnen voor balustraden'

In dit document worden twee bijzondere belastingen onderscheiden:

- a. een stootbelasting op de ongunstigste plaats met een energie van 0,5 kNm op de balustrade in z'n geheel;
- b. een stootbelasting op gesloten gedeelten van de balustrade met een energie van 0.005 kNm op de ongunstigste plaats. Deze stootbelasting moet worden aangebracht door middel van een kleine harde kogel.

Als belastingfactor moet worden aangehouden 1,0

In bijlage 1 en 2 bij dit rapport zijn proefmethoden gegeven, waarmee de bijzondere belasting kan worden aangebracht. Opgemerkt wordt dat in het SBR rapport zelf niet expliciet een relatie wordt gelegd tussen de bijzondere belasting en de proeven in bijlage 1 en 2 van SBR rapport B40-1.

In bijlage 1 van het SBR-rapport is de zandzakslingerproef omschreven, met een massa van 50 kg en een valhoogte van 1 m. De afmetingen van de zandzak zijn diameter 400 mm, gevuld met rivierzand met een korreldiameter van 0-5 mm en een volumegewicht in droge toestand van 1,55 a 1,60. Het zand wordt zo vaak gedroogd als nodig is om een constante kwaliteit te bereiken. Opgemerkt wordt dat de beschrijving van deze proef grotendeels is overgenomen in de toelichting op 9.5 van NEN 6702:1991.

4.4 Nederlandse beoordelingsrichtlijnen voor horizontale elementen

4.4.1 *Voorlopige Richtlijnen Dakbedekking (KOMO), KBR-2, 4e druk, september 1975.*

Onder de kwaliteitseisen voor dakplaten is in 2.1.1 opgenomen:

Zowel de dakplaten op zichzelf als de bevestigingen aan de draagconstructie en de aansluitingen tussen de dakplaten onderling moeten met een voldoende mate van veiligheid en zonder onaanvaardbare vormveranderingen weerstand bieden aan de stootbelasting, veroorzaakt door een vallend voorwerp of springend persoon. Deze eis geldt uitsluitend voor niet met pannen gedekte daken.

Onder 4.4.3 van de richtlijn is de schokbelastingproef nader omschreven. De massa van het valgewicht bedraagt 35 kg, de valhoogte 1,00 m. De valproef wordt éénmaal uitgevoerd, waarna de dakplaat ten minste 5 minuten onberoerd moet blijven staan. Aan de bovenzijde van de dakplaat wordt de blijvende doorbuiging gemeten. In aansluiting hierop wordt ter plaatse van waar het valgewicht is neergekomen een geconcentreerde belasting ter grootte van 200 kg aangebracht en gedurende 5 minuten gehandhaafd. Hierbij mag de plaat niet bezwijken.

Als nadere specificatie geldt voor het valgewicht dat deze moet bestaan uit een zak van cilindrische vorm, voorzien van een platte ronde bodem en gevuld met droog zand. De diameter van de zak bedraagt 0.35 m. De massa, de afmetingen en de vulling wijken af van ISO 7892.

4.5 Nederlandse normen voor verticale elementen

4.5.1 *NEN 3568:1980 "Glas voor gebouwen, Voorgespannen Glas - Eisen en meetmethoden" (1e druk, juli 1980)*

De norm specificeert een slagproef met een met kogels gevulde lederen zak, massa 45 ± 0.5 kg. De loden kogeltjes hebben een middellijn van $3,5 \pm 1$ mm. De valhoogte bedraagt 1200 mm, de energie bijgevolg ongeveer 540 Nm. De afmetingen, massa en vulling van het stootobject wijken af van ISO 7892.

4.6 Internationale normen voor verticale elementen

4.6.1 *ISO 8270:1985 "Doorsets - Soft heavy body impact tests"*

De norm volgt de beproeving van ISO 7892:1988 met afwijkende massa, nl. 30 kg, en afwijkende diameter, nl. circa 350 mm en gevuld met fijn zand (< 2 mm). De norm specificeert geen aan te houden valhoogte.

4.7 Conclusies naar aanleiding van de inventarisatie van meet- en beproevingsmethoden

Uit het hiervoor gepresenteerde overzicht van meet- en beproevingsrichtlijnen, beoordelingsrichtlijnen en normen blijkt dat er een grote verscheidenheid bestaat aan stootobjecten, aan te houden energie-niveaus en de wijze van uitvoering van de proef.

- Voor wat betreft het aan te houden energie-niveau voor een meet- of beproevingsmethode geeft NEN 6702:1991 reeds voldoende duidelijkheid: de energie-niveaus zijn immers in 9.5 en 9.6 van deze norm al aangegeven.

- Voor de afmetingen en massa van het stootobject zijn in de toelichting van NEN 6702 al aanwijzingen gegeven. De afmetingen en massa stemmen overeen met ISO 7892. Slechts een beperkt aantal van de geïnventariseerde meet- en beproevingsvoorschriften wijkt op het punt van massa en afmetingen af van ISO 7892. Er zijn vooralsnog geen redenen zijn om bij het opstellen van een meet- of beproevingsrichtlijn in aanvulling op NEN 6702 van ISO 7892 af te wijken voor wat betreft afmetingen en massa van het stootobject af te wijken
- De vulling van het proefobject bestaat in veel gevallen uit zand. ISO 7892 daarentegen geeft aan dat de vulling moet bestaan uit glaskorrels.
- De lengte van de hangdraad van het stootobject bij de beproeving van scheidingswanden e.d. verschilt van richtlijn tot richtlijn.
- Het aantal malen dat de proef op eenzelfde constructie-onderdeel of op eenzelfde plaats moet worden toegepast verschilt van richtlijn tot richtlijn
- Sommige richtlijnen geven aan dat bij de beproeving van daken de massa van het stootobject als belasting moet worden gehandhaafd gedurende zekere tijd. Deze eis wordt gesteld om duureffecten bij het bezwijken van constructie-onderdelen aan het licht te laten komen.

5. MEETMETHODE OF BEPROEVINGSMETHODE

Bij het nader omschrijven van een methode om na te gaan of een constructie-onderdeel in voldoende mate weerstand biedt tegen stootbelastingen kan worden gekozen voor een meetmethode of voor een beproevingsmethode.

Een meetmethode dient om de kwantiteit van een prestatie van een bouwwerk te bepalen. Een meetmethode moet derhalve worden toegepast op het bouwwerk zelf, althans op het beschouwde bouwdeel aangebracht in of aan het bouwwerk.

Een beproevingsmethode dient om de kwantiteit van een prestatie van een produkt of materiaal te bepalen. Een beproevingsmethode kan dus worden toegepast op het beschouwde constructie-onderdeel terwijl die niet in of aan het desbetreffende bouwwerk is bevestigd. De beproevingsmethode moet bijvoorbeeld worden gebruikt bij prototype-onderzoek in het laboratorium. In tegenstelling tot bij de meetmethode is bij de beproevingsmethode nader omschreven welke eisen worden gesteld aan de monsterneming en aan de vervaardiging of bevestiging van proefstukken.

Vanuit de filosofie van het Bouwbesluit geniet een meetmethode de voorkeur, omdat daarmee de prestatie van het bouwwerk kan worden getoetst. Anderzijds zullen in de praktijk de meeste beproevingen zijn gericht op prototype onderzoek in het laboratorium.

Een werkbare oplossing zal kunnen bestaan uit een normatieve meetmethode, waaraan een informatieve bijlage is toegevoegd met name voorwaarden voor de toepassing van deze meetmethode als beproevingsmethode ten behoeve van prototype-onderzoek.

6. BETROUWBAARHEIDSASPECTEN

6.1 Algemeen

De kentallen en verdere specificaties van de voorgeschreven meet- en beproevingsmethode dienen in relatie gebracht te worden tot de veiligheid die wordt nagestreefd. Dit nagestreefde veiligheidsniveau, in combinatie met de onzekerheden in belasting bepalen, de details van de uit te voeren proef. In het geval van een beproevingsmethode speelt verder de mogelijke spreiding in de constructieresponsie een rol, alsmede het aantal uitgevoerde proeven. Deze paragraaf zal op genoemde aspecten ingaan.

Voor de basis van het na te streven veiligheidsnivo dient te worden aangesloten bij de formuleringen daaromtrent in NEN 6700. Gegeven dat in het onderhavige geval het voorkomen van verlies van mensenlevens uitgangspunt is, maar dat in beginsel geen sprake is van een grote groep personen, ligt de keuze van veiligheidsklasse 2 voor de hand. Hiermee ligt de streefwaarde van de faalkans voor de levensduur van de constructie vast: $\beta = 3.4$ en $P(F) = 3 \cdot 10^{-4}$. Uitgegaan wordt verder van een levensduur van 50 jaar.

Bij de meetmethode ligt daarmee direct het waarschijnlijkheidsnivo van de belasting vast. De belasting in de test moet voldoen aan:

$$P\{S > S_d\} = 3 \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

Bij de beproevingsmethode is er sprake van onzekerheid aan de belastingkant en aan de sterktekant. Bij voorschriften (zie bijvoorbeeld Eurocode 1, Basis of Design) wordt dit meestal opgelost door de onzekerheden aan beide kanten bij benadering even groot te stellen. Dit geeft de volgende eisen voor de belasting en de sterkte:

$$P\{S > S_d\} = \Phi(-\alpha_S \beta) \quad (2)$$

$$P\{R < R_d\} = \Phi(-\alpha_R \beta) \quad (3)$$

Φ = verdelingsfunctie van de standaard normale verdeling

β = betrouwbaarheidsindex = 3.4

α_S = invloedsfactor belasting = 0.7

α_R = invloedsfactor sterkte = 0.8

Bij de gegeven getalwaarden volgt:

$$P\{S > S_d\} = 8 \times 10^{-3}$$

$$P\{R < R_d\} = 3 \times 10^{-3}$$

Bij de uitwerking van de beproeving dient verder rekening te worden gehouden met het feit dat slechts een steekproef van een beperkt aantal proefstukken wordt beschouwd. In 6.3 wordt hierop teruggekomen.

6.2 Belastingen bij toepassing van de meetmethode

De stootbelastingseisen zijn bedoeld om personen die op een dak of tegen een scheidingswand of balustrade aan vallen te beschermen tegen bezwijken van de constructie en daarmee een val over grote hoogte. Ook onevenredige beschadiging door eventuele vallende zware kleine voorwerpen dient door middel van het stellen van deze eisen te worden voorkomen. Aan dit laatste wordt hier verder voorbij gegaan. Het wordt geacht impliciet te zijn afgedekt. Slechts bij zeer brosse en weinig redundante systemen zal dit onjuist zijn.

6.2.1 Belastingen op daken

Het gaat hier om daken die in principe niet bedoeld zijn voor normaal gebruik door personen. Personen op daken hebben meestal een speciaal doel zoals het doen van inspectie en onderhoud. Uiteraard kan ook gedacht te worden aan kinderen die speelgoed dat op het dak terecht is gekomen (ballen, frisbees) daarvan afhalen. Het laatste gebeurt wellicht op sommige lage daken met grotere regelmaat dan het eerste.

Algemeen is het belopen van de meeste daken geen dagelijkse gebeurtenis. Voor de meeste daken zal het aantal "betredingen" liggen tussen de 10 en 1000 keer in de levensduur. Bij de gemiddelde betreding zal zich verder geen valpartij afspelen. De meeste mensen zijn op daken extra voorzichtig. Aan de andere kant is het oppervlak niet altijd helemaal vlak en ideaal beloopbaar. Al met al zal vallen op de meeste daken toch slechts een kwestie zijn van hooguit enkele malen tijdens de levensduur. We gaan voorlopig uit van slechts eenmaal in de levensduur.

De intensiteit van de val is afhankelijk van:

- de massa van de vallende persoon
- de valhoogte
- de wijze van neerkomen en de daarmee samenhangende effectieve stijfheid

Uitgaande van volwassen mannen (een conservatieve aanname), die eventueel een voorwerp meedragen, kunnen de volgende kansverdelingen voor deze parameters worden gekozen:

Tabel 1: Statistische uitgangspunten voor stootbelasting op daken

	gemiddelde	standaardafwijking	verdeling
massa m	85 kg	15 kg	lognormaal
valhoogte h	0.40 m	0.10 m	lognormaal
stijfheid k	30 kN/m	10 kN/m	lognormaal

Bij het neerkomen op een oneindig stijve plaat wordt de uitgeoefende belasting gegeven door $F = \sqrt{(2mghk)}$. Via een nivo II analyse (hier niet verder gespecificeerd, zie bijvoorbeeld [9]) volgt dan dat, uitgaande van $\beta = 3.4$ en het toepassen van een meetmethode (dit wil zeggen geen onzekerheid in de sterkte), het ontwerppunt gegeven wordt door:

$$m_d = 107 \text{ kg}$$

$$h_d = 0,64 \text{ m}$$

$$k_d = 70 \text{ kN/m}$$

De waarde voor de kracht F in het ontwerppunt is dan:

$$F_d = 9.7 \text{ kN}$$

Voor de oneindig stijve plaat zou dus gezocht moeten worden naar een valproef met dezelfde kracht op de ondergrond. De voorgestelde proef met het stootobject volgens ISO 7892:1988 (glaskorrelvulling, diameter 0.4 m, massa 50 kg, valhoogte 0.7 m) leidt blijkens proeven tot een kracht van 7.5 kN. Kennelijk heeft de bal iets te weinig stijfheid en wordt het tekort aan kinetische energie op het moment van impact niet voldoende gecompenseerd.

De vraag is vervolgens hoe de proef voldoet voor een niet stijve en lichte constructie. Als voorbeeld beschouwen we een dak met een equivalente veerstijfheid van 30000 N/m en equivalente massa van 20 kg. Voor een dergelijk dak speelt de stijfheid van het vallend voorwerp nauwelijks een rol. Bepalend zijn dus alleen de massa m en de valhoogte h . De ontwerpwaarden zijn dan:

$$m_d = 120 \text{ kg}$$

$$h_d = 0.80 \text{ m}$$

Het zal duidelijk zijn dat voor deze lichte daken een object met $m = 50$ kg en $h = 0.7$ m een veel te lichte beproeving is. Samenvattend zou gestreefd moeten worden naar een zwaarder object met vermoedelijk een

geringere stijfheid. Eventueel kan men ook ter compensatie van de te kleine massa een grotere valhoogte overwegen. Dit zou neerkomen op een valhoogte van 2.0 m.

6.2.2 Belasting op scheidingswanden

Stootbelasting op scheidingswanden en balustraden is het gevolg van personen die tegen de balustrade vallen of er tegen geduwd worden. De snelheid waarmee dit gebeurt zou theoretisch gelijk kunnen zijn aan de maximale sprintsnelheid van mensen (10 m/s), maar dit is toch wel een zeer ongeloofwaardig scenario. De snelheid waarmee men de muur treft ligt vermoedelijk dicht bij de snelheid van een of tweemaal gewoon lopen (1 tot 3 m/s). De stijfheid van het massa-veer-systeem waarmee het menselijk gedrag te benaderen valt ligt hoger dan bij een verticale val. De effectieve massa ligt echter lager. Vermoedelijk kan het hele proces als volgt worden gemodelleerd:

Tabel 2: Statistische uitgangspunten voor stootbelasting op scheidingswanden

	gemiddelde	standaardafwijking	verdeling
massa m	30 kg	10 kg	lognormaal
snelheid	1 m/s	0.4 m/s	lognormaal
stijfheid k	80 kN/m	20 kN/m	lognormaal

Het aantal malen dat een dergelijke belasting voorkomt is naar alle waarschijnlijkheid groot. Bij veel scheidingsconstructies vinden vermoedelijk regelmatig kleine botsingen plaats van het type als hierboven als gemiddeld zijn omschreven. Het lijkt redelijk uit te gaan van enkele botsingen per jaar, ofwel 50-500 in de levensduur. Uitgangspunt wordt voorlopig 100 botsingen, hetgeen de vereiste veiligheid per botsing op $P(F) = 3 \cdot 10^{-6}$ brengt, ofwel $\beta = 4.5$.

Voor de meetmethode heeft dit als consequentie:

- Ontwerppunt voor oneindig stijve wand:

$$m_d = 52 \text{ kg}; v_d = 4.9 \text{ m/s}; k_d = 109 \text{ kN/m}; F_d = 12 \text{ kN}$$

Het stootobject geeft hier vrijwel de goede waarde (12 kN bij $h = 1.00$ m).

- Ontwerppunt van lichte niet stijve constructie:

$$m_d = 53 \text{ kg}; v_d = 5.3 \text{ m/s}$$

De waarde van 5.3 m/s correspondeert met:

$$h_d = v_d^2 / 2g = 1.4 \text{ m}$$

Het zal duidelijk zijn dat voor deze lichte scheidingsconstructies het stootobject met $m = 50 \text{ kg}$ en $h = 1.0 \text{ m}$ (geeft $v = \sqrt{20} = 4.5 \text{ m/s}$) volgens deze analyse vrijwel de goede waarde geeft.

6.3 Belasting bij toepassing van de beproevingsmethode

Bij toepassing van de beproevingsmethode worden een aantal producten getest. In beginsel zijn er twee mogelijke uitvoeringswijzen:

- a) men bepaalt van ieder proefstuk de belasting waarbij het proefstuk bezwijkt, bijvoorbeeld door de bal van een steeds grotere hoogte te laten vallen;
- b) men beproeft een aantal proefstukken bij een bepaalde beproevingsbelasting en kijkt of deze al dan niet bezwijken.

Uitwerking beproevingsmethode (a)

Aannemende dat men de valhoogte bepaalt waarbij breuk optreedt, kan men bij methode (a) de ontwerpsterkte bepalen via:

$$R_d = \bar{R} \exp \{- k_n V\} \quad (4)$$

k_n = coefficient volgens tabel 3

$\bar{R}$ = steekproefgemiddelde van de valhoogten waarbij breuk optreedt

V = variatiecoefficient van de valhoogte bij breuk volgend uit de steekproef

De waarden van k_n in tabel 3 zijn ontleend aan [10]. Voor $n = \infty$ vindt men $\alpha_R \beta = 0.8 * 3.4 = 2.7$. De hogere waarden bij eindige n moeten de statistische onzekerheid ten gevolge van de beperkte steekproef compenseren.

De ontwerpwaarde voor de belasting h_d en de valmassa m_d worden gebaseerd op $\alpha_S \beta = 0.7 * 3.4 = 2.4$. Dit leidt via een niveau II berekening voor daken (lichte constructie) tot:

$$h_d = 0.65 \text{ m}$$

$$m_d = 110 \text{ kg}$$

Voor de wand kan dezelfde procedure worden gebruikt als de snelheid via $h = \frac{1}{2} v^2 / g$ wordt omgerekend naar een valhoogte. Dit geeft $\mu_h \approx 0.05 \text{ m}$ en $V_h \approx 0.8$. Verder moet rekening worden gehouden met het groter aantal keren (orde 100) dat deze belasting optreedt. Dit geeft een aangepaste waarde voor $\alpha_S \beta$ ($\alpha_S \beta' = \Phi^{-1} (\Phi(-2.4)/100) = 3.8$). Daarmee valt voor lichte constructies te berekenen:

$$h_d = 0.82 \text{ m}$$

$$m_d = 49 \text{ kg}$$

Ten opzichte van de meetmethode zijn de ontwerpwaarden voor de belasting dus iets kleiner; voor de h_d waarde voor de wand is de reductie zelfs aanzienlijk.

Geëist wordt dat de gevonden rekensterkte R_d bij beproeving met valmassa m_d groter is dan h_d .

Uitwerking beproevingsmethode (b)

Bij methode (b) kiest men een bepaalde proefbelasting op grond waarvan n proefstukken worden belast. Vervolgens bepaalt men de ontwerpsterkte uit:

$$R_d = \frac{1}{c_n} R_{\text{proefbelasting}} \quad (6)$$

De waarde van c_n vindt men in tabel 3. De procedure om c_n te bepalen is ontleend aan [11]. De getalwaarde voor "willekeurig materiaal" komen eveneens uit [11]. Indien de constructie van staal of aluminium is, mag worden uitgegaan van een bekende variatiecoëfficiënt van 0.10. De achtergrond van de berekening is opgenomen in bijlage IV. Er resulteren gunstiger c_n -waarden. Voor hout en beton is nog een kolom opgenomen uitgaande van $V = 0.20$. Voor kleine n geeft die kolom een gunstiger resultaat. Bij grote n is het willekeurig materiaal echter gunstiger omdat dan "kennelijk" tot een lage variatiecoëfficiënt geconcludeerd kan worden. Ter controle is ook nog een lognormale verdeling met $V = 0.25$ uitgerekend. Deze geeft ongeveer hetzelfde resultaat als normaal met $V = 0.20$.

Net als in geval a) wordt geeist dat R_d groter is dan h_d . De waarden voor h_d en m_d zijn identiek aan die bij methode (a). In de praktijk zal men eerst h_d en m_d bepalen en vervolgens de benodigde combinatie van $R_{\text{proefbelasting}}$ en n bepalen.

Opmerking 1: In principe is het natuurlijk mogelijk dat bij een beproeving volgens schema a) enkele proefstukken niet bezwijken en bij beproeving volgens b) enkele proefstukken juist wel. Voor die gevallen zijn er geen algemene formules. Men moet in zulke gevallen een statistisch geschoolde expert raadplegen.

Opmerking 2: In het rapport "Stootbelasting op constructie onderdelen" (TNO-Bouw, B-92-1134) zijn alleen de sterkte-eisen, maar niet de belastingeisen van dit rapport overgenomen. In B-92-1134 wordt uitgegaan van de ontwerpbelasting volgens NEN 6702.

Tabel 3: Coëfficiënten k_n en c_n ten behoeve van de statistische verwerking van de beproevingsmethode (a) respectievelijk (b)

n	k_n	c_n		
		staal/ aluminium (V = 0.10)	hout/ beton (V = 0.20)	willekeurig materiaal
3	11.0	1.40	2.0	-
4	6.0	1.33	1.9	-
5	4.6	1.25	1.8	2.50
10	3.2	1.15	1.5	1.67
20	2.9	1.10	1.4*	1.25
30	2.8	1.05	1.3*	1.15
∞	2.7	1.0	1.0	1.0

* hier mogen de waarden uit de kolom "willekeurig materiaal" worden gebruikt.

7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

In het voorgaande zijn de resultaten van een onderzoek naar de modellering van de stootbelasting op verticale en horizontale bouwdeel gepresenteerd. Uit door Struck verricht onderzoek kan een modellering voor de impact door mensen op bouwdeel worden afgeleid voor het geval van een schouderstoot op verticale bouwdeel, en voor een starre en veerkrachtige sprong op horizontale bouwdeel. Gegevens over de modellering van de impact van een persoon vallend van geringe hoogte ontbreken vooralsnog.

Tevens zijn experimenten uitgevoerd, ten einde de grootte van de stootbelasting te bepalen bij enkele thans in gebruik zijnde stootobjecten volgens verschillende normen. Deze stootbelastingen zijn bepaald bij een stoot tegen een star bouwdeel.

Conclusies met betrekking tot afscheidingen bij hoogteverschillen van vloeren

Uit het onderzoek is naar voren gekomen dat bij de thans gehanteerde zandzakslingerproef een groot deel van de kinetische energie wordt gedissipeerd. Dit aandeel is groter dan bij een door de mens uitgeoefende stoot met de schouder. Bij de schouderstoot treedt een maximum energie-overdracht op van circa 100 Nm. De kinetische energie van het stootobject zal, teneinde deze geringe overdracht te compenseren, groter moeten zijn dan 100 Nm. Blijkens het uitgevoerde onderzoek is de huidige eis in 9.6 van NEN 6702, waarbij een grotere massa en een grotere valhoogte is gekozen, leidend tot een representatieve waarde van 500 Nm, hiervoor is een redelijke compensatie mede in het licht van de spreiding van de belasting.

Niettemin valt het aan te bevelen bij het formuleren van een meetmethode voor de bepaling van de weerstand van scheidingswand tegen de stootbelasting uit te gaan van een vulling van de zak, die minder gevoelig is voor energie-dissipatie en verdichtingseffecten.

Dit zal ook de reproduceerbaarheid van de proef verbeteren. De zak met vulling volgens ISO 7892:1988 is daarom te preferen boven de zandzak gegeven in SBR rapport B40-1.

Conclusies met betrekking tot daken

Geconstateerd is dat slechts gegevens voorhanden zijn over mensen die op vloeren springen. Modellen, waarmee de belastingen tijdens een val van geringe hoogte kunnen worden beschreven zijn in de literatuur nog niet aangetroffen.

De maximale belasting op een stijve vloer of een stijf dak ten gevolge van de valproef met een zak van 50 kg volgens ISO 7892:1988 en een valhoogte van 0,7 m is iets lager dan de maximale belasting die bij een val op het constructie-onderdeel zou worden veroorzaakt.

Voor lichte daken levert de beproeving een aanzienlijke onderschrijding van de ontwerpwaarden. Overwogen moet hier worden de valhoogte te vergroten ten opzichte van de in NEN 6702 gegeven waarde.

LITERATUUR

- [1] E. Limberger, W. Struck, "Stossartige Beanspruchung von Bauteilen und ihre rechnerische Simulation an mechanischen Modellen", Die Bautechnik 49 (1972), 384 - 388.
- [2] E. Limberger, "Vereinfachte Ermittlung der Beanspruchung von Bauteilen infolge Massestoss unter Berücksichtigung elastisch-plastischen Tagverhaltens", Die Bautechnik, 52 (1975) 42 - 48.
- [3] W. Struck, "Die stossartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen, Vorschlag für ein Prüfverfahren" BAM Berichte nr. 37, Februari 1976, BAM, Berlin.
- [3] W. Struck, "Die stossartige Beanspruchung horizontaler Bauteile durch einen mit den Füßen aufprallenden Menschen", Die Bautechnik, 10, (1981), pp. 347 - 351.
- [4] W. Mann, "Stosskräfte aus fallenden Lasten und Personen und dadurch verursachter Bruch eines Gerüstes", Die Bautechnik, 5 (1979), 169 - 171.
- [5] W. Struck, "Massastoss auf leichte Bauteile im Hochbau; Hinweise auf neue Beurteilungsmöglichkeiten", Die Bautechnik, 2/1977 55 - 60.
- [6] W. Struck, "Verfahren zum Abschätzen der Beanspruchung in nichttragenden Wandteilen, die durch gegenprallenden Menschen stossartig belastet werden", Die Bautechnik, 2/1971 62-64.

- [7] W. Struck, W. Böhmert, "Verfahren zum Abschätzen der Beanspruchung in nichttragenden Wandteilen, die durch gegenprallenden Menschen Stossartig belastet werden", Bautechnik, 2 (1971) pp 62 - 64
- [8] R.G. Snyder, D.R. Foust, B.M. Bowman, "Study of Impact tolerance through free-fall investigations", Michigan University - Highway Safety Research Institute, US Dept. of Commerce report PB-277-537, 1977
- [9] A. Vrouwenvelder, Vrijling, J., "Probabilistisch Ontwerpen", Collegedictaat b3, TU Delft, 1984.
- [10] Eurocode 1, Basis of Design, ENV 1991-1, Draft October 1993.
- [11] Ditlevsen, O., A. Vrouwenvelder, "Objective low informative priors for Bayesian inference from totally censored Gaussian data, Submitted to Structural Safety, Nov. 1993, accepted Febr. 1994, revised March 1994.

BIJLAGE I IMPACT OP VERTICALE ELEMENTEN

Berekeningsresultaten voor de maximale interne en externe kracht, overgedragen energie, factor K, verhouding van de overgedragen energie en het tijdstip waarop de maximale interne kracht optreedt, voor verschillende combinaties van de massa en stijfheid van de scheidingsconstructie als gevolg van een schouderstoot ($v = 2,6 \text{ m/s}$, $m = 30 \text{ kg}$).

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_{pot} (Nm)	K_K -	M_M -	t_{max} (s)
20.0	30000.0	2.454	2.647	100.406	0.812	0.990	0.060
20.0	40000.0	2.843	2.655	101.038	0.815	0.996	0.055
20.0	50000.0	3.188	2.664	101.643	0.817	1.002	0.052
20.0	60000.0	3.502	2.672	102.179	0.820	1.008	0.050
20.0	70000.0	3.773	2.681	101.673	0.818	1.003	0.048
20.0	80000.0	4.003	2.691	100.135	0.811	0.988	0.047
20.0	90000.0	4.199	2.700	97.947	0.802	0.966	0.046
20.0	100000.0	4.367	2.710	95.359	0.792	0.940	0.045
20.0	110000.0	4.512	2.720	92.540	0.780	0.913	0.044
20.0	120000.0	4.637	2.730	89.605	0.768	0.884	0.043
20.0	130000.0	4.746	2.740	86.630	0.755	0.854	0.042
20.0	140000.0	4.840	2.751	83.671	0.742	0.825	0.041
20.0	150000.0	4.922	2.762	80.760	0.729	0.796	0.041
40.0	30000.0	2.438	3.154	99.087	1.141	0.977	0.080
40.0	40000.0	2.808	3.158	98.589	1.139	0.972	0.073
40.0	50000.0	3.131	3.163	98.026	1.135	0.967	0.068
40.0	60000.0	3.419	3.168	97.388	1.132	0.960	0.064
40.0	70000.0	3.679	3.174	96.666	1.127	0.953	0.061
40.0	80000.0	3.916	3.179	95.847	1.123	0.945	0.059
40.0	90000.0	4.133	3.184	94.915	1.117	0.936	0.057
40.0	100000.0	4.332	3.189	93.845	1.111	0.925	0.056
40.0	110000.0	4.514	3.194	92.605	1.103	0.913	0.055
40.0	120000.0	4.677	3.200	91.143	1.095	0.899	0.054
40.0	130000.0	4.823	3.205	89.481	1.085	0.882	0.053
40.0	140000.0	4.955	3.210	87.682	1.074	0.865	0.052
40.0	150000.0	5.073	3.216	85.794	1.062	0.846	0.051
60.0	30000.0	2.313	3.402	89.143	1.326	0.879	0.095
60.0	40000.0	2.661	3.405	88.507	1.321	0.873	0.085
60.0	50000.0	2.964	3.408	87.839	1.316	0.866	0.079

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_{pot} (Nm)	K_K -	M_M -	t_{max} (s)
60.0	60000.0	3.234	3.411	87.138	1.311	0.859	0.074
60.0	70000.0	3.478	3.415	86.403	1.305	0.852	0.071
60.0	80000.0	3.702	3.418	85.632	1.300	0.844	0.068
60.0	90000.0	3.907	3.421	84.825	1.293	0.837	0.066
60.0	100000.0	4.098	3.424	83.978	1.287	0.828	0.064
60.0	110000.0	4.276	3.428	83.091	1.280	0.819	0.062
60.0	120000.0	4.441	3.431	82.161	1.273	0.810	0.061
60.0	130000.0	4.594	3.434	81.187	1.265	0.801	0.059
60.0	140000.0	4.738	3.438	80.165	1.257	0.791	0.058
60.0	150000.0	4.871	3.441	79.092	1.249	0.780	0.057
80.0	30000.0	2.182	3.551	79.384	1.445	0.783	0.107
80.0	40000.0	2.511	3.553	78.795	1.440	0.777	0.096
80.0	50000.0	2.796	3.555	78.190	1.434	0.771	0.088
80.0	60000.0	3.051	3.558	77.567	1.428	0.765	0.083
80.0	70000.0	3.282	3.560	76.931	1.422	0.759	0.079
80.0	80000.0	3.493	3.562	76.276	1.416	0.752	0.075
80.0	90000.0	3.689	3.564	75.607	1.410	0.746	0.073
80.0	100000.0	3.871	3.567	74.921	1.404	0.739	0.070
80.0	110000.0	4.041	3.569	74.220	1.397	0.732	0.068
80.0	120000.0	4.200	3.571	73.501	1.390	0.725	0.067
80.0	130000.0	4.350	3.573	72.765	1.383	0.718	0.065
80.0	140000.0	4.490	3.576	72.012	1.376	0.710	0.064
80.0	150000.0	4.623	3.578	71.244	1.369	0.703	0.063
100.0	30000.0	2.064	3.651	71.031	1.528	0.701	0.117
100.0	40000.0	2.375	3.652	70.520	1.523	0.695	0.105
100.0	50000.0	2.646	3.654	70.001	1.517	0.690	0.096
100.0	60000.0	2.887	3.656	69.473	1.511	0.685	0.090
100.0	70000.0	3.107	3.657	68.936	1.505	0.680	0.086
100.0	80000.0	3.308	3.659	68.391	1.499	0.674	0.082

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_{pot} (Nm)	K_K -	M_M -	t_{max} (s)
100.0	90000.0	3.494	3.661	67.839	1.493	0.669	0.079
100.0	100000.0	3.668	3.662	67.279	1.487	0.664	0.076
100.0	110000.0	3.831	3.664	66.711	1.481	0.658	0.074
100.0	120000.0	3.984	3.665	66.134	1.474	0.652	0.072
100.0	130000.0	4.128	3.667	65.552	1.468	0.646	0.070
100.0	140000.0	4.265	3.669	64.961	1.461	0.641	0.069
100.0	150000.0	4.394	3.670	64.362	1.455	0.635	0.067
120.0	30000.0	1.960	3.722	64.057	1.590	0.632	0.126
120.0	40000.0	2.256	3.724	63.621	1.584	0.627	0.113
120.0	50000.0	2.514	3.725	63.179	1.579	0.623	0.104
120.0	60000.0	2.744	3.726	62.734	1.573	0.619	0.097
120.0	70000.0	2.953	3.727	62.283	1.567	0.614	0.092
120.0	80000.0	3.145	3.729	61.828	1.562	0.610	0.088
120.0	90000.0	3.324	3.730	61.368	1.556	0.605	0.084
120.0	100000.0	3.490	3.731	60.905	1.550	0.601	0.081
120.0	110000.0	3.646	3.732	60.438	1.544	0.596	0.079
120.0	120000.0	3.794	3.734	59.965	1.538	0.591	0.077
120.0	130000.0	3.933	3.735	59.490	1.532	0.587	0.075
120.0	140000.0	4.065	3.736	59.012	1.526	0.582	0.073
120.0	150000.0	4.190	3.737	58.528	1.519	0.577	0.071
140.0	30000.0	1.869	3.776	58.230	1.637	0.574	0.134
140.0	40000.0	2.151	3.777	57.858	1.632	0.571	0.120
140.0	50000.0	2.398	3.778	57.482	1.626	0.567	0.110
140.0	60000.0	2.618	3.779	57.103	1.621	0.563	0.103
140.0	70000.0	2.818	3.780	56.722	1.616	0.559	0.097
140.0	80000.0	3.002	3.781	56.338	1.610	0.556	0.093
140.0	90000.0	3.174	3.782	55.952	1.605	0.552	0.089
140.0	100000.0	3.334	3.783	55.564	1.599	0.548	0.086
140.0	110000.0	3.484	3.784	55.173	1.593	0.544	0.083

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_{pot} (Nm)	K_K -	M_M -	t_{max} (s)
140.0	120000.0	3.626	3.785	54.780	1.588	0.540	0.081
140.0	130000.0	3.760	3.786	54.385	1.582	0.536	0.079
140.0	140000.0	3.888	3.787	53.989	1.576	0.532	0.077
140.0	150000.0	4.010	3.788	53.590	1.570	0.528	0.075
160.0	30000.0	1.789	3.818	53.322	1.675	0.526	0.142
160.0	40000.0	2.059	3.819	53.003	1.670	0.523	0.127
160.0	50000.0	2.295	3.820	52.681	1.665	0.520	0.116
160.0	60000.0	2.507	3.821	52.357	1.659	0.516	0.108
160.0	70000.0	2.699	3.821	52.031	1.654	0.513	0.102
160.0	80000.0	2.876	3.822	51.705	1.649	0.510	0.098
160.0	90000.0	3.041	3.823	51.376	1.644	0.507	0.094
160.0	100000.0	3.195	3.824	51.047	1.639	0.503	0.090
160.0	110000.0	3.340	3.825	50.715	1.633	0.500	0.087
160.0	120000.0	3.477	3.825	50.383	1.628	0.497	0.085
160.0	130000.0	3.607	3.826	50.051	1.623	0.494	0.083
160.0	140000.0	3.731	3.827	49.716	1.617	0.490	0.081
160.0	150000.0	3.849	3.828	49.381	1.612	0.487	0.079
180.0	30000.0	1.717	3.852	49.147	1.705	0.485	0.149
180.0	40000.0	1.977	3.853	48.871	1.701	0.482	0.133
180.0	50000.0	2.204	3.853	48.593	1.696	0.479	0.122
180.0	60000.0	2.408	3.854	48.313	1.691	0.476	0.114
180.0	70000.0	2.593	3.855	48.034	1.686	0.474	0.107
180.0	80000.0	2.764	3.855	47.752	1.681	0.471	0.102
180.0	90000.0	2.923	3.856	47.470	1.676	0.468	0.098
180.0	100000.0	3.072	3.857	47.188	1.671	0.465	0.094
180.0	110000.0	3.212	3.857	46.904	1.666	0.463	0.091
180.0	120000.0	3.345	3.858	46.619	1.661	0.460	0.088
180.0	130000.0	3.471	3.859	46.335	1.656	0.457	0.086
180.0	140000.0	3.591	3.859	46.049	1.651	0.454	0.084

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_{pot} (Nm)	K_K -	M_M -	t_{max} (s)
180.0	150000.0	3.705	3.860	45.763	1.646	0.451	0.082
200.0	30000.0	1.653	3.880	45.561	1.731	0.449	0.156
200.0	40000.0	1.904	3.880	45.320	1.726	0.447	0.139
200.0	50000.0	2.123	3.881	45.077	1.722	0.445	0.127
200.0	60000.0	2.320	3.881	44.835	1.717	0.442	0.118
200.0	70000.0	2.499	3.882	44.591	1.712	0.440	0.112
200.0	80000.0	2.664	3.882	44.348	1.708	0.437	0.106
200.0	90000.0	2.818	3.883	44.102	1.703	0.435	0.102
200.0	100000.0	2.962	3.884	43.858	1.698	0.433	0.098
200.0	110000.0	3.098	3.884	43.612	1.693	0.430	0.095
200.0	120000.0	3.226	3.885	43.366	1.689	0.428	0.092
200.0	130000.0	3.348	3.885	43.119	1.684	0.425	0.089
200.0	140000.0	3.465	3.886	42.873	1.679	0.423	0.087
200.0	150000.0	3.576	3.886	42.626	1.674	0.420	0.085

BIJLAGE II IMPACT OP HORIZONTALE ELEMENTEN

Berekeningsresultaten voor de maximale interne en externe kracht, overgedragen energie, factor K, verhouding van de overgedragen energie en het tijdstip waarop de maximale kracht optreedt, voor verschillende combinaties van de massa en stijfheid van de scheidingsconstructie een starre sprong van 0,25 m hoogte ($k = 65\,000\text{ N/m}$).

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
20.0	30000.0	3.076	2.332	157.720	0.398	0.715	0.072
20.0	40000.0	3.568	2.353	159.154	0.400	0.721	0.069
20.0	50000.0	3.935	2.375	154.820	0.395	0.701	0.066
20.0	60000.0	4.212	2.398	147.830	0.386	0.670	0.063
20.0	70000.0	4.423	2.424	139.764	0.375	0.633	0.061
20.0	80000.0	4.586	2.454	131.442	0.364	0.596	0.059
20.0	90000.0	4.711	2.487	123.289	0.352	0.559	0.057
20.0	100000.0	4.807	2.529	115.518	0.341	0.523	0.056
20.0	110000.0	4.879	4.645	108.223	0.330	0.490	0.054
20.0	120000.0	4.934	4.687	101.439	0.320	0.460	0.053
20.0	130000.0	4.974	4.725	95.161	0.310	0.431	0.052
20.0	140000.0	5.002	4.759	89.369	0.300	0.405	0.050
20.0	150000.0	5.021	4.790	84.032	0.291	0.381	0.049
40.0	30000.0	3.488	3.017	202.760	0.639	0.919	0.093
40.0	40000.0	4.081	3.034	208.154	0.647	0.943	0.088
40.0	50000.0	4.541	3.053	206.190	0.644	0.934	0.085
40.0	60000.0	4.901	3.072	200.165	0.635	0.907	0.082
40.0	70000.0	5.186	3.092	192.128	0.622	0.870	0.079
40.0	80000.0	5.414	3.114	183.211	0.607	0.830	0.076
40.0	90000.0	5.597	3.137	174.053	0.592	0.789	0.074
40.0	100000.0	5.745	3.161	165.012	0.576	0.748	0.072
40.0	110000.0	5.864	3.187	156.286	0.561	0.708	0.071
40.0	120000.0	5.959	3.215	147.978	0.546	0.670	0.069
40.0	130000.0	6.036	3.246	140.135	0.531	0.635	0.067
40.0	140000.0	6.097	3.280	132.771	0.517	0.602	0.066
40.0	150000.0	6.145	3.321	125.878	0.503	0.570	0.065

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
60.0	30000.0	3.622	3.427	218.606	0.813	0.990	0.110
60.0	40000.0	4.198	3.442	220.327	0.816	0.998	0.102
60.0	50000.0	4.701	3.456	220.957	0.817	1.001	0.097
60.0	60000.0	5.108	3.472	217.396	0.810	0.985	0.094
60.0	70000.0	5.438	3.488	211.214	0.799	0.957	0.091
60.0	80000.0	5.708	3.504	203.649	0.784	0.923	0.088
60.0	90000.0	5.931	3.521	195.437	0.768	0.885	0.086
60.0	100000.0	6.116	3.539	187.019	0.752	0.847	0.083
60.0	110000.0	6.269	3.557	178.662	0.735	0.809	0.082
60.0	120000.0	6.397	3.576	170.522	0.718	0.773	0.080
60.0	130000.0	6.504	3.596	162.691	0.701	0.737	0.078
60.0	140000.0	6.592	3.616	155.217	0.685	0.703	0.077
60.0	150000.0	6.666	3.638	148.121	0.669	0.671	0.075
80.0	30000.0	3.649	3.708	221.913	0.945	1.005	0.123
80.0	40000.0	4.211	3.720	221.661	0.945	1.004	0.113
80.0	50000.0	4.700	3.732	220.925	0.943	1.001	0.107
80.0	60000.0	5.129	3.745	219.193	0.940	0.993	0.103
80.0	70000.0	5.488	3.757	215.127	0.931	0.975	0.099
80.0	80000.0	5.787	3.770	209.341	0.918	0.948	0.097
80.0	90000.0	6.039	3.784	202.598	0.903	0.918	0.094
80.0	100000.0	6.251	3.797	195.379	0.887	0.885	0.092
80.0	110000.0	6.431	3.811	187.989	0.870	0.852	0.090
80.0	120000.0	6.584	3.826	180.621	0.853	0.818	0.088
80.0	130000.0	6.714	3.840	173.397	0.836	0.786	0.086
80.0	140000.0	6.826	3.855	166.392	0.819	0.754	0.084
80.0	150000.0	6.921	3.871	159.649	0.802	0.723	0.083

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
100.0	30000.0	3.627	3.915	219.221	1.050	0.993	0.135
100.0	40000.0	4.177	3.925	218.051	1.048	0.988	0.123
100.0	50000.0	4.653	3.935	216.508	1.044	0.981	0.116
100.0	60000.0	5.073	3.945	214.462	1.039	0.972	0.110
100.0	70000.0	5.444	3.956	211.667	1.032	0.959	0.106
100.0	80000.0	5.763	3.966	207.597	1.022	0.941	0.103
100.0	90000.0	6.035	3.977	202.363	1.009	0.917	0.101
100.0	100000.0	6.268	3.988	196.451	0.994	0.890	0.098
100.0	110000.0	6.468	3.999	190.183	0.978	0.862	0.096
100.0	120000.0	6.641	4.010	183.772	0.962	0.833	0.094
100.0	130000.0	6.791	4.022	177.361	0.945	0.804	0.093
100.0	140000.0	6.920	4.033	171.044	0.928	0.775	0.091
100.0	150000.0	7.033	4.045	164.880	0.911	0.747	0.089
120.0	30000.0	3.580	4.074	213.654	1.136	0.968	0.145
120.0	40000.0	4.119	4.083	212.031	1.132	0.961	0.132
120.0	50000.0	4.584	4.091	210.129	1.127	0.952	0.123
120.0	60000.0	4.995	4.100	207.895	1.121	0.942	0.117
120.0	70000.0	5.360	4.108	205.249	1.113	0.930	0.113
120.0	80000.0	5.686	4.117	202.075	1.105	0.916	0.109
120.0	90000.0	5.973	4.126	198.179	1.094	0.898	0.106
120.0	100000.0	6.221	4.135	193.505	1.081	0.877	0.104
120.0	110000.0	6.437	4.144	188.337	1.067	0.853	0.102
120.0	120000.0	6.625	4.153	182.897	1.051	0.829	0.100
120.0	130000.0	6.790	4.163	177.339	1.035	0.803	0.098
120.0	140000.0	6.935	4.172	171.767	1.019	0.778	0.096
120.0	150000.0	7.062	4.182	166.256	1.002	0.753	0.095

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
140.0	30000.0	3.522	4.201	206.770	1.207	0.937	0.154
140.0	40000.0	4.049	4.208	204.936	1.202	0.928	0.140
140.0	50000.0	4.504	4.216	202.894	1.196	0.919	0.131
140.0	60000.0	4.907	4.223	200.617	1.189	0.909	0.124
140.0	70000.0	5.266	4.230	198.073	1.181	0.897	0.119
140.0	80000.0	5.589	4.238	195.219	1.173	0.884	0.115
140.0	90000.0	5.879	4.245	192.001	1.163	0.870	0.111
140.0	100000.0	6.137	4.253	188.343	1.152	0.853	0.109
140.0	110000.0	6.366	4.260	184.185	1.139	0.834	0.107
140.0	120000.0	6.566	4.268	179.657	1.125	0.814	0.104
140.0	130000.0	6.744	4.276	174.917	1.110	0.792	0.103
140.0	140000.0	6.901	4.283	170.079	1.095	0.771	0.101
140.0	150000.0	7.040	4.291	165.221	1.079	0.749	0.099
160.0	30000.0	3.459	4.305	199.383	1.267	0.903	0.162
160.0	40000.0	3.975	4.311	197.471	1.261	0.895	0.147
160.0	50000.0	4.420	4.317	195.402	1.255	0.885	0.137
160.0	60000.0	4.815	4.324	193.163	1.247	0.875	0.130
160.0	70000.0	5.168	4.330	190.738	1.239	0.864	0.124
160.0	80000.0	5.486	4.336	188.108	1.231	0.852	0.120
160.0	90000.0	5.775	4.343	185.251	1.221	0.839	0.116
160.0	100000.0	6.036	4.349	182.141	1.211	0.825	0.113
160.0	110000.0	6.271	4.356	178.749	1.200	0.810	0.111
160.0	120000.0	6.481	4.362	175.041	1.187	0.793	0.109
160.0	130000.0	6.669	4.369	171.056	1.174	0.775	0.107
160.0	140000.0	6.836	4.375	166.903	1.159	0.756	0.105
160.0	150000.0	6.986	4.382	162.667	1.145	0.737	0.103

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
180.0	30000.0	3.393	4.391	191.925	1.319	0.870	0.170
180.0	40000.0	3.899	4.397	190.011	1.312	0.861	0.154
180.0	50000.0	4.336	4.402	187.977	1.305	0.852	0.143
180.0	60000.0	4.722	4.408	185.816	1.298	0.842	0.136
180.0	70000.0	5.069	4.413	183.522	1.290	0.831	0.129
180.0	80000.0	5.383	4.418	181.083	1.281	0.820	0.125
180.0	90000.0	5.668	4.424	178.491	1.272	0.809	0.121
180.0	100000.0	5.928	4.430	175.733	1.262	0.796	0.117
180.0	110000.0	6.166	4.435	172.800	1.251	0.783	0.115
180.0	120000.0	6.381	4.441	169.677	1.240	0.769	0.112
180.0	130000.0	6.577	4.446	166.351	1.228	0.754	0.110
180.0	140000.0	6.752	4.452	162.825	1.215	0.738	0.108
180.0	150000.0	6.910	4.458	159.165	1.201	0.721	0.107
200.0	30000.0	3.328	4.464	184.626	1.363	0.836	0.177
200.0	40000.0	3.824	4.469	182.753	1.356	0.828	0.161
200.0	50000.0	4.252	4.474	180.787	1.349	0.819	0.149
200.0	60000.0	4.631	4.479	178.725	1.341	0.810	0.141
200.0	70000.0	4.972	4.483	176.564	1.333	0.800	0.134
200.0	80000.0	5.281	4.488	174.297	1.325	0.790	0.129
200.0	90000.0	5.563	4.493	171.922	1.316	0.779	0.125
200.0	100000.0	5.821	4.498	169.432	1.306	0.768	0.121
200.0	110000.0	6.058	4.503	166.823	1.296	0.756	0.118
200.0	120000.0	6.275	4.508	164.088	1.285	0.743	0.116
200.0	130000.0	6.474	4.513	161.224	1.274	0.730	0.114
200.0	140000.0	6.656	4.518	158.225	1.262	0.717	0.112
200.0	150000.0	6.821	4.522	155.087	1.250	0.703	0.110

BIJLAGE III IMPACT OP HORIZONTALE ELEMENTEN

Berekeningsresultaten voor de maximale interne en externe kracht, overgedragen energie, factor K, verhouding van de overgedragen energie en het tijdstip waarop de maximale kracht optreedt, voor verschillende combinaties van de massa en stijfheid van de scheidingsconstructie een verende sprong van 1,0 m hoogte ($k = 20\ 000\ \text{N/m}$).

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
20.0	30000.0	5.301	2.796	468.352	0.343	0.530	0.101
20.0	40000.0	5.510	5.233	379.551	0.309	0.430	0.093
20.0	50000.0	5.576	5.344	310.893	0.280	0.352	0.087
20.0	60000.0	5.567	5.420	258.243	0.255	0.292	0.082
20.0	70000.0	5.518	5.470	217.469	0.234	0.246	0.078
20.0	80000.0	5.447	5.499	185.435	0.216	0.210	0.074
20.0	90000.0	5.365	5.515	159.888	0.201	0.181	0.071
20.0	100000.0	5.277	5.522	139.227	0.187	0.158	0.069
20.0	110000.0	5.187	5.522	122.297	0.175	0.139	0.066
20.0	120000.0	5.097	5.518	108.262	0.165	0.123	0.064
20.0	130000.0	5.009	5.512	96.502	0.156	0.109	0.062
20.0	140000.0	4.923	5.505	86.554	0.148	0.098	0.061
20.0	150000.0	4.839	5.500	78.066	0.140	0.088	0.059
40.0	30000.0	6.327	3.502	667.209	0.580	0.756	0.131
40.0	40000.0	6.687	3.603	559.021	0.530	0.633	0.122
40.0	50000.0	6.858	4.716	470.283	0.487	0.533	0.114
40.0	60000.0	6.922	4.933	399.302	0.448	0.452	0.108
40.0	70000.0	6.925	5.115	342.499	0.415	0.388	0.103
40.0	80000.0	6.890	5.261	296.664	0.386	0.336	0.099
40.0	90000.0	6.832	5.377	259.286	0.361	0.294	0.095
40.0	100000.0	6.760	5.468	228.472	0.339	0.259	0.091
40.0	110000.0	6.680	5.539	202.802	0.320	0.230	0.088
40.0	120000.0	6.595	5.594	181.208	0.302	0.205	0.086
40.0	130000.0	6.508	5.637	162.880	0.286	0.184	0.083
40.0	140000.0	6.420	5.670	147.196	0.272	0.167	0.081
40.0	150000.0	6.333	5.696	133.673	0.259	0.151	0.079

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
60.0	30000.0	6.729	3.922	754.576	0.755	0.855	0.151
60.0	40000.0	7.206	3.990	649.076	0.700	0.735	0.141
60.0	50000.0	7.468	4.069	557.672	0.649	0.632	0.132
60.0	60000.0	7.604	4.164	481.794	0.603	0.546	0.126
60.0	70000.0	7.662	4.395	419.342	0.563	0.475	0.120
60.0	80000.0	7.671	4.651	367.799	0.527	0.417	0.115
60.0	90000.0	7.648	4.858	324.970	0.495	0.368	0.111
60.0	100000.0	7.604	5.026	289.094	0.467	0.327	0.107
60.0	110000.0	7.545	5.163	258.793	0.442	0.293	0.104
60.0	120000.0	7.478	5.276	232.992	0.419	0.264	0.101
60.0	130000.0	7.404	5.370	210.857	0.399	0.239	0.098
60.0	140000.0	7.327	5.447	191.731	0.380	0.217	0.095
60.0	150000.0	7.248	5.512	175.097	0.364	0.198	0.093
80.0	30000.0	6.871	4.210	786.905	0.890	0.891	0.166
80.0	40000.0	7.440	4.261	691.855	0.835	0.784	0.155
80.0	50000.0	7.778	4.317	604.955	0.780	0.685	0.146
80.0	60000.0	7.977	4.378	530.284	0.731	0.601	0.139
80.0	70000.0	8.088	4.446	467.238	0.686	0.529	0.133
80.0	80000.0	8.140	4.522	414.147	0.646	0.469	0.128
80.0	90000.0	8.153	4.611	369.294	0.610	0.418	0.123
80.0	100000.0	8.139	4.717	331.191	0.577	0.375	0.119
80.0	110000.0	8.105	4.841	298.615	0.548	0.338	0.116
80.0	120000.0	8.059	4.966	270.583	0.522	0.306	0.112
80.0	130000.0	8.002	5.080	246.305	0.498	0.279	0.109
80.0	140000.0	7.940	5.180	225.150	0.476	0.255	0.107
80.0	150000.0	7.873	5.267	206.611	0.456	0.234	0.104

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
100.0	30000.0	6.885	4.421	790.019	0.997	0.895	0.178
100.0	40000.0	7.525	4.462	707.732	0.944	0.802	0.167
100.0	50000.0	7.926	4.505	628.240	0.889	0.712	0.158
100.0	60000.0	8.180	4.550	557.621	0.838	0.632	0.150
100.0	70000.0	8.338	4.598	496.558	0.791	0.562	0.144
100.0	80000.0	8.430	4.650	444.172	0.748	0.503	0.138
100.0	90000.0	8.477	4.704	399.240	0.709	0.452	0.133
100.0	100000.0	8.492	4.763	360.579	0.674	0.408	0.129
100.0	110000.0	8.484	4.827	327.162	0.642	0.371	0.125
100.0	120000.0	8.459	4.894	298.128	0.613	0.338	0.122
100.0	130000.0	8.421	4.966	272.768	0.586	0.309	0.119
100.0	140000.0	8.375	5.039	250.503	0.561	0.284	0.116
100.0	150000.0	8.322	5.112	230.857	0.539	0.261	0.113
120.0	30000.0	6.829	4.585	777.141	1.083	0.880	0.188
120.0	40000.0	7.524	4.618	707.693	1.034	0.802	0.176
120.0	50000.0	7.978	4.652	636.563	0.980	0.721	0.167
120.0	60000.0	8.280	4.688	571.253	0.929	0.647	0.159
120.0	70000.0	8.479	4.725	513.470	0.881	0.582	0.153
120.0	80000.0	8.607	4.764	463.022	0.836	0.524	0.147
120.0	90000.0	8.686	4.804	419.135	0.796	0.475	0.142
120.0	100000.0	8.728	4.846	380.925	0.758	0.431	0.138
120.0	110000.0	8.744	4.890	347.561	0.724	0.394	0.134
120.0	120000.0	8.740	4.936	318.316	0.693	0.361	0.130
120.0	130000.0	8.722	4.983	292.573	0.665	0.331	0.127
120.0	140000.0	8.692	5.031	269.813	0.638	0.306	0.124
120.0	150000.0	8.653	5.081	249.603	0.614	0.283	0.121

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
140.0	30000.0	6.733	4.715	755.534	1.154	0.856	0.197
140.0	40000.0	7.473	4.743	698.076	1.109	0.791	0.185
140.0	50000.0	7.971	4.771	635.339	1.058	0.720	0.175
140.0	60000.0	8.312	4.801	575.770	1.007	0.652	0.167
140.0	70000.0	8.548	4.831	521.872	0.959	0.591	0.160
140.0	80000.0	8.709	4.861	474.016	0.914	0.537	0.155
140.0	90000.0	8.816	4.893	431.822	0.872	0.489	0.150
140.0	100000.0	8.885	4.926	394.674	0.834	0.447	0.145
140.0	110000.0	8.923	4.959	361.928	0.799	0.410	0.141
140.0	120000.0	8.940	4.993	332.988	0.766	0.377	0.137
140.0	130000.0	8.939	5.028	307.327	0.736	0.348	0.134
140.0	140000.0	8.925	5.064	284.492	0.708	0.322	0.131
140.0	150000.0	8.901	5.101	264.098	0.682	0.299	0.128
160.0	30000.0	-0.001	4.822	-1.000	0.000	-0.001	0.128
160.0	40000.0	7.390	4.846	682.705	1.172	0.773	0.192
160.0	50000.0	7.924	4.870	627.957	1.124	0.711	0.182
160.0	60000.0	8.300	4.894	574.135	1.075	0.650	0.174
160.0	70000.0	8.568	4.919	524.335	1.028	0.594	0.167
160.0	80000.0	8.758	4.945	479.387	0.982	0.543	0.161
160.0	90000.0	8.892	4.970	439.242	0.940	0.497	0.156
160.0	100000.0	8.984	4.997	403.521	0.901	0.457	0.152
160.0	110000.0	9.043	5.024	371.748	0.865	0.421	0.147
160.0	120000.0	9.079	5.051	343.448	0.832	0.389	0.144
160.0	130000.0	9.095	5.079	318.182	0.800	0.360	0.140
160.0	140000.0	9.097	5.107	295.562	0.771	0.335	0.137
160.0	150000.0	9.087	5.135	275.248	0.744	0.312	0.134

m_2 (kg)	k_2 (N/m)	F_{int} (kN)	F_{ext} (kN)	E_p (Nm)	K -	E_p/E_K -	t (s)
180.0	30000.0	-0.001	4.912	-1.000	0.000	-0.001	0.134
180.0	40000.0	7.288	4.932	663.964	1.226	0.752	0.199
180.0	50000.0	7.852	4.953	616.613	1.182	0.698	0.189
180.0	60000.0	8.258	4.973	568.319	1.135	0.644	0.180
180.0	70000.0	8.554	4.994	522.611	1.088	0.592	0.174
180.0	80000.0	8.770	5.016	480.684	1.043	0.544	0.167
180.0	90000.0	8.927	5.038	442.764	1.001	0.501	0.162
180.0	100000.0	9.041	5.060	408.675	0.962	0.463	0.157
180.0	110000.0	9.120	5.082	378.092	0.925	0.428	0.153
180.0	120000.0	9.174	5.104	350.648	0.891	0.397	0.149
180.0	130000.0	9.206	5.127	325.988	0.859	0.369	0.146
180.0	140000.0	9.223	5.150	303.781	0.830	0.344	0.143
180.0	150000.0	9.226	5.173	283.736	0.802	0.321	0.140
200.0	30000.0	-0.001	4.988	-1.000	0.000	-0.001	0.140
200.0	40000.0	-0.001	5.005	-1.000	0.000	-0.001	0.140
200.0	50000.0	7.764	5.023	602.761	1.232	0.683	0.194
200.0	60000.0	8.195	5.041	559.666	1.187	0.634	0.186
200.0	70000.0	8.515	5.059	517.922	1.142	0.587	0.179
200.0	80000.0	8.754	5.078	479.007	1.098	0.543	0.173
200.0	90000.0	8.933	5.096	443.374	1.056	0.502	0.168
200.0	100000.0	9.067	5.115	411.021	1.017	0.466	0.163
200.0	110000.0	9.164	5.134	381.752	0.980	0.432	0.158
200.0	120000.0	9.234	5.153	355.301	0.946	0.402	0.154
200.0	130000.0	9.282	5.172	331.383	0.913	0.375	0.151
200.0	140000.0	9.313	5.191	309.727	0.883	0.351	0.148
200.0	150000.0	9.329	5.211	290.081	0.854	0.329	0.145

BIJLAGE IV

Voor de kolommen in tabel 3 met de "gegeven variatiecoëfficiënt" ($V = 0.10$ en $V = 0.20$) is gebruik gemaakt van de volgende a priori-verdeling voor het gemiddelde μ (zie [11] formule (9)):

$$f'_{\mu}(m) = f'_p(p) \frac{d}{d\mu} \Phi\left(\frac{\mu-a}{\sigma}\right)$$

Hierin is $\Phi(\cdot)$ de verdelingsfunctie van de standaard normale verdeling. Gegeven de veronderstelde uniforme a priori verdeling $f'_p(p)$ op $[0,1]$ is $f'_p(p) = 1$; a komt overeen met R_{proef} in de hoofdtekst. Omdat V is gegeven (i.p.v. σ zoals in [11]) volgt verder:

$$f'_{\mu}(m) = 1 \cdot \varphi\left(\frac{\mu-a}{V\mu}\right) \frac{d}{d\mu} \left\{ \frac{1}{V} - \frac{a}{V\mu} \right\} = \varphi\left(\frac{\mu-a}{\sigma}\right) \cdot \left\{ \frac{a}{V\mu^2} \right\}$$

met:

$$\varphi\left(\frac{\mu-a}{V\mu}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{\mu-a}{V\mu}\right)^2\right\}$$

De posteriori-verdeling voor μ bij n waarnemingen $R > a$ wordt dan gegeven door:

$$f''_{\mu}(m) = C \frac{a}{V\mu^2} \varphi\left(\frac{\mu-a}{V\mu}\right) \Phi\left(\frac{\mu-a}{V\mu}\right)^n$$

C is een normaliseringsconstante.

Tenslotte volgt voor de verdelingsfunctie van R :

$$F_R(r) = \int_0^{\infty} \Phi\left(\frac{r-m}{V_m}\right) f''_{\mu}(m) dm$$

Merk op dat bij "gegeven V " de analyse alleen zinvol is voor $\mu > 0$; de integratie is daarom tot dit gebied beperkt; bij de bepaling van C wordt hier ook rekening mee gehouden.

De ontwerpwaarde R_d volgt uit $F_R(R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta)$; de waarde van c_n in tabel 3 volgt uit $c_n = R_{\text{proef}}/R_d = a/R_d$.