

Veiligheid bestaande breedplaatvloeren op basis van track record

Probabilistische achtergronden bij de veiligheid van bestaande breedplaatvloeren

Voor een goed en betrouwbaar inzicht in de veiligheid van breedplaatvloeren is een probabilistische methode ontwikkeld, die rekening houdt met het zogenoemde track record (het presteren van de bestaande voorraad vloeren) van deze bouwwijze in de praktijk. In de probabilistische aanpak zijn alle onzekerheden gecombineerd om tot een uitspraak over de faalkans van de vloerconstructie te komen.

Uitkomsten van experimenten aan breedplaatvloeren geven weinig vertrouwen in de in het verleden toegepaste voegdetails [1].

Dat terwijl er in Nederland veel gebouwen met dergelijke vloeren bestaan. In de praktijk lijkt men zich daar in bepaalde gevallen evenwel niet uiterst ongemakkelijk bij te voelen; dit heeft vermoedelijk te maken met de aanwezigheid van de vele constructies die al geruime tijd zonder problemen functioneren onder de gebruikscondities tot dan toe. De wens is een stap te zetten van deze informele niet gekwantificeerde beschouwing naar een formele gekwantificeerde beschouwing, waarbij de uitkomst kan worden getoetst aan een geaccepteerd criterium in de bouwregelgeving.

Verder speelt de vraag hoe de meest onveilige gebouwen snel kunnen worden geïdentificeerd en indien nodig met voor-

rang kunnen worden versterkt. En of daarbij een onderverdeling in vloertypologieën mogelijk is.

Om aan beide punten invulling te geven is een probabilistische aanpak van de veiligheidsbeschouwing vereist, gebruikmakend van een track record.

Veiligheidsfilosofie voor bestaande bouw bij gebruikmaking van track record

In Eurocode 0 (NEN-EN 1990) worden ten aanzien van constructieve veiligheid voor nieuwbouw in hoofdstuk 2.1 in beginsel drie eisen gesteld:

- (a) Voldoende weerstand bieden tegen alle belastingen en invloeden;
- (b) Voldoende weerstand bieden tegen brand gedurende een voorgeschreven tijdsperiode;
- (c) Geen beschadiging oplopen bij buitengewone belastingen en foutieve menselijke

auteurs



**PROF.DR.IR.
RAPHAEL
STEENBERGEN**

TNO / UGent



IR. REIN DE VRIES

TNO / TU Delft



**PROF.IR. TON
VROUWENVELDER**

TNO

handelingen die niet in verhouding staat tot de oorzaak.

Delen van NEN-EN 1990 zijn door het Bouwbesluit 2012 aangewezen, waarmee de betreffende eisen publiekrechtelijk zijn. Voor (c) kiest het Bouwbesluit 2012 deels een strengere eis dan NEN-EN 1990 (het gaat niet om disproportioneel 'bezwijken', maar om het niet mogen bezwijken van niet direct aangrenzende constructieve onderdelen). Minder streng is dat het Bouwbesluit 2012 alleen kijkt naar gekende buitengewone belastingen. Voor bestaande bouw zijn de eisen onder (c) helemaal vervallen en zijn de eisen gerelateerd aan (a) en (b) verlicht ten opzichte van nieuwbouw in NEN 8700.

In de gebruikte probabilistische beoordelingsmethode wordt de in de praktijk aanwezige bestaande weerstand van de breedplaten zo goed mogelijk gekwantificeerd, en meegenomen via een variabele die wordt aangeduid als de modelonzekerheid. In de terminologie van de betrouwbaarheidstheorie worden hiermee aspecten bedoeld die wel invloed hebben op de sterkte, maar niet of niet volledig in het model zijn meegenomen. Immers, in elk rekenmodel worden vereenvoudigingen aangebracht die bij elke individuele toepassing tot een grotere of kleinere, positieve dan wel negatieve afwijking leiden van de theoretische waarde.

In de basis wordt voor de uitwerking alle beschikbare informatie over de betrouwbaarheid van bestaande breedplaatvloeren gebruikt. Gebruikt van de procedures in NEN-EN 1990 Annexen C en D. Deze procedures vormen ook de achtergrond voor de veiligheidsfactoren in de Eurocodes en de kalibratie van de partiële factoren in de normen zoals aangegeven in de nationale bijlagen van in het Bouwbesluit aangewezen normen.

In de onderhavige studie worden twee typen experimenten meegenomen:

→ Informatie vanuit de beschikbare laboratoriumproeven. In deze experimenten wordt een aantal malen falen en een aantal malen overleven waargenomen bij een bepaalde belasting.

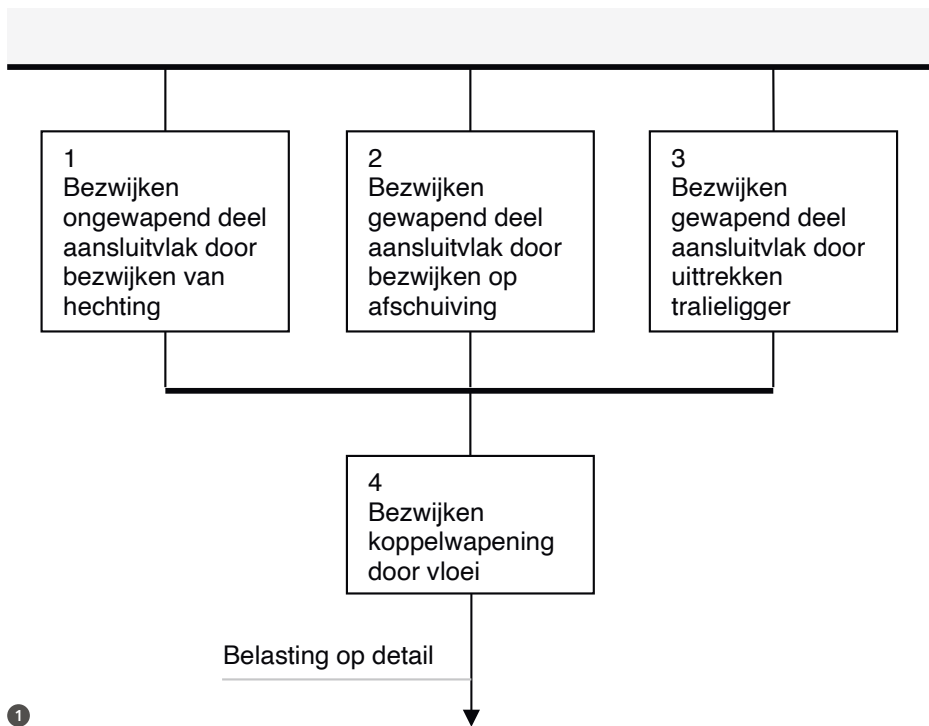
→ Informatie uit een 'mega-experiment' van een groot aantal gebouwen, schaal 1 op 1, in Nederland. Van één van deze gebouwen is een vloer ingestort bij een bepaalde belasting (dakvloer Eindhoven Airport) en bij andere gebouwen hebben de bestaande vloeren een bepaalde (zekere of onzekere) belasting overleefd. We noemen dit een 'track record'. In dit mega-experiment zijn alle genoemde zaken vallend onder de hierboven genoemde modelonzekerheid inbegrepen. Opgemerkt wordt dat het mega-experiment plaatsvindt op het niveau van 'echte' complete constructies in plaats van op het niveau van details, vloeren, liggers en kolommen.

De volgens Annex D van NEN-EN 1990 vastgestelde gemiddelde waarde en standaardafwijking van de modelonzekerheid worden altijd bepaald voor een bepaald toepassingsgebied of (sub)populatie. In dit geheel is de keuze van een (sub)populatie van groot belang. Het heeft bijvoorbeeld geen zin de veiligheid van de breedplaatvloeren met een langснаad ter plaatse van het maximale veldmoment als veilig te kwalificeren, door te wijzen op de grote groep goed functionerende breedplaatvloeren waar dit detail niet aanwezig is. Dergelijke informatie is van belang en moet dus zorgvuldig worden meegenomen, in zoverre dat dit mogelijk is op basis van de kennis van verschillende typen detailleringen, uitvoeringsvormen etc. Daar waar het mogelijk is, zijn daarom in het onderhavige project subpopulaties onderscheiden en beoordeeld (voor de definitie van de subpopulaties zie [3]).

Opzet faalkansberekening

In [2] is het bezwijken van de voeg tussen twee breedplaten beschreven via vier faalmechanismen:

- 1 Bezwijken ongewapend aansluitvlak op aanhechting;
- 2 Bezwijken gewapend aansluitvlak op afschuiving;
- 3 Bezwijken gewapend aansluitvlak door uittrekken van de tralieligger;
- 4 Bezwijken na vloeien van de koppelwepening.



1

In het systeemgedrag staan faalmechanismen 1 t/m 3 parallel geschakeld en vervolgens gezamenlijk in serie met mechanisme 4, het vloeien van de koppelwapening (fig. 1). De constructie bezwijkt dus als mechanisme 4 zich voordoet of als een van de eerste drie mechanismen optreedt. De overige faalmechanismen van de breedplaatvloer zijn in de praktijk afgedekt door een correct ontwerp conform de normen en zijn niet verder beschouwd.

In een probabilistische berekening wordt de verwerking van de faalmechanismen meegenomen met behulp van de grenstoestandsfuncties ($g(\cdot)$). Deze functies van stochasten zijn gedefinieerd als het verschil tussen de sterkte en het belasting(effect). Een negatief verschil komt overeen met bezwijken, een positief verschil met overleven. Er wordt daarbij niet alleen rekening gehouden met de maximale capaciteit van het mechanisme, maar ook met de (mogelijk beperkt aanwezige) ductiliteit in de mechanismen 1, 2 en 3.

De kans P op de gebeurtenis falen F van een te beoordelen vloerconstructie wordt in een probabilistische berekening gegeven door:

$$P(F) = P(g < 0) \tag{1}$$

Hierbij is $g(\cdot)$ de grenstoestandsfunctie voor de combinatie van vier geïntroduceerde mechanismen. De grenstoestandsfuncties worden voor ieder faalmechanisme apart berekend, resulterend in waarden g_{R1} t/m g_{R4} . Om de uiteindelijke g -waarde te bepalen moeten deze vier functies dus gecombineerd worden. De mechanismen 1, 2 en 3 zijn zoals eerder gezegd onderling parallel geschakeld: bezwijken treedt op als een van deze drie functies negatief wordt. Dat is wiskundig het geval als de grootste waarde ofwel het maximum van $[g_{R1}, g_{R2}, g_{R3}]$ negatief wordt. Bezwijken treedt echter ook op als g_{R4} negatief wordt. Wiskundig bepalend wordt daarmee de kleinste waarde van het minimum van g_{R4} en het maximum van $[g_{R1}, g_{R2}, g_{R3}]$. De uiteindelijke g -waarde waarmee wordt bepaald of falen optreedt ($g < 0$), volgt uit daarmee uit:

$$g = \min(\max[g_{R1}, g_{R2}, g_{R3}], g_{R4}) \tag{2}$$

De bewerking ‘max’ is in deze uitdrukking dus van toepassing op de functies van de mechanismen 1, 2 en 3; de bewerking →

1 Schematische weergave combinatie van faalmechanismen van de voeg. Mechanismen 1-3 staan parallel geschakeld, mechanismen 1-3 samen staan in serie met mechanisme 4. Voor bezwijken is het dus voldoende als mechanisme 4 optreedt of een van de mechanismen 1-3

'min' is van toepassing op de functie van mechanisme 4 en het maximum van 1, 2 en 3. De afzonderlijke grenstoestandsfuncties worden geschreven als $g = R - (G + Q)$, met R de sterkte, G de eigengewichtsbelasting en Q de veranderlijke belasting. De sterkte R in het werkelijke gebouw wordt hier geschreven als een modelonzekerheid θ_r maal de sterkte volgend uit de laboratoriumexperimenten R_{exp} .

Het track record van de constructie zelf en van vergelijkbare constructies wordt tot uitdrukking gebracht door $P(F)$ in (1) te vervangen door:

$$P(F | D) = P(g < 0 | D) \quad (3)$$

Hierbij is de sterkte op basis van laboratoriumtesten meegenomen in de grenstoestandsfunctie g en stelt D de verzameling van alle relevante data (waarnemingen in het 'mega-experiment') voor. De verticale streep in (3) moet worden gelezen als 'gegeven', het gaat dus om de kans op falen gegeven de data beschikbaar in het track record.

De verzameling van relevante waarnemingen kan als volgt worden samengevat:

- Het goed functioneren van de beschouwde vloer over een aantal jaren t ;
- Het goed functioneren van een groep van vergelijkbare vloeren over een aantal jaren en/of het met succes doorstaan van een proefbelasting;
- Het instorten van de dakvloer in de parkeergarage op Eindhoven Airport en het niet instorten van de overige vloeren op Eindhoven Airport.

Genoteerd in termen van falen (F) of overleven (S , survival) kan dus de beschikbare verzameling waarnemingen D worden geschreven als:

$$D = [S_1, S_2, \dots, S_n, F_{E,1}, S_{E,1}, \dots, S_{E,m}] \quad (4)$$

Hierin staat S voor het overleven (de survival) vanaf de bouw tot op heden van de beschouwde vloer zelf. S_i staat voor het overleven van een vergelijkbare andere vloer i , eveneens vanaf de bouw tot heden al dan niet inclusief het doorstaan van een proef-

belasting. $F_{E,1}$ is het falen (instorten) van de vloer van de parkeergarage in aanbouw bij de luchthaven Eindhoven. $S_{E,j}$ staat voor het tot op heden overleven van de niet bezweken vloeren van de parkeergarage in aanbouw bij de luchthaven Eindhoven.

Al deze gebeurtenissen zijn vervolgens weer uit te drukken in termen van grenstoestandsfuncties (let hierbij op het verschil in >- en <-tekens):

$$S_i = \{g_i(X) > 0\} \quad (5a)$$

$$F_{E,1} = \{g_E(X) < 0\} \quad (5b)$$

$$S_{E,j} = \{g_E(X) > 0\} \quad (5c)$$

De g -functies van de stochasten X worden voor alle gebouwen uitgewerkt waarbij verschillende subpopulaties worden onderscheiden. De g_E -functie betreft de grenstoestandsfunctie voor de vloeren in Eindhoven Airport.

Lang niet alle vloeren zijn gelijk qua afmetingen, legpatroon en voegdetails. In het project zijn daarom 12 subpopulaties onderscheiden (zie [2]).

De berekening van de kans is geprogrammeerd via Monte Carlo-simulatie.

Betrouwbaarheid

Om de betrouwbaarheid van een bestaande breedplaatvloer te beoordelen, wordt met behulp van het model een analyse uitgevoerd waarbij het presteren van andere vloeren ook in beschouwing wordt genomen. Er wordt gerekend met een aantal van n gebouwen van een bepaalde subpopulatie (uit het 'track record'), met per gebouw (gemiddeld) 30 niet gefaalde vloervelden (uitgezonderd bij dakvloeren, waar gerekend wordt met 5 niet gefaalde vloervelden per gebouw), aangevuld met van het gebouw Eindhoven Airport:

- de gefaalde dakvloer;
- niet gefaalde tussenvloeren;
- een niet gefaalde naastliggende dakvloer alleen belast door eigen gewicht.

Voor 'niet falen' van de vloeren in de n gebouwen wordt uitgegaan van de eerste 10 jaar van de levensduur. Deze 10 jaar is een voorzichtig (conservatief) gekozen waarde voor de leeftijd van de n gebouwen, gegeven het bouwjaar van veel Nederlandse gebouwen met breedplaatvloeren.

De kans op falen van een bepaalde te analyseren vloer in de eerste 15 jaar van de levensduur wordt als volgt berekend (het \cap -teken in het onderstaande moet weer worden gelezen als 'gegeven' of 'onder de conditie dat' en het \cup -teken als 'en', T staat voor belasting door temperatuur):

$P_f = P(\text{falen beschouwde vloer in 0-15 jaar} \mid 1 \times \text{falen Eindhoven dakvloer zonder } Q \text{ en met } T \cap 8 \times \text{niet falen Eindhoven verdiepingsvloer zonder } Q \cap n \times \text{niet falen gebouwen met 30 vloeren in 0-10 jaar})$

BEWEZEN STERKTE

Het algemene principe van bewezen sterkte bij bestaande constructies is dat op basis van een zonder problemen (zoals een instorting) overleefde belastingobservatie de faalkans wordt bijgesteld. Deze faalkans (voor een jaar of anderszins zinvolle periode) wordt namelijk in de gebruikelijke (semi-)probabilistische methoden bepaald zonder deze bijstelling, hetgeen conservatief is. De overleefde belasting toont aan dat bepaalde waarden van de modelonzekerheid en/of de sterkteparameters waarschijnlijk worden onderschat of de belasting overschat. In figuur 2 is dit weergegeven voor de verdeling van de belasting (eigengewichtsbelasting en vloerbelasting) en een verdeling van de sterkte (opgebouwd uit de op basis van laboratoriumexperimenten bepaalde sterkte en een modelonzekerheid). Met de observatie op een bepaald ogenblik van een bepaalde belasting (oranje stippellijn) kan een sterkte lager dan deze observatie voor die constructie kennelijk niet voorkomen. De kansdichtheid van de sterkte die niet kan voorkomen (het lichtblauw gekleurde deel links van de stippellijn) wordt (overeenkomstig de regels van de kansrekening) herverdeeld over de rest van de sterkte (het lichtblauw gekleurde deel rechts van de stippellijn). Het effect hiervan is dat de verwachte sterkte enigszins groter is dan voor de observatie, wat de faalkans vervolgens doet afnemen. Er is echter voornamelijk een effect te zien van reducering van de spreiding in de linker staart van de sterkte. Dit kan afhankelijk van de onzekerheid in de linker staart een grote invloed hebben op de faalkans. In het onderhavige geval van de beoordeling van breedplaatvloeren is vanwege de grote spreiding in de experimenteel bepaalde sterkte en in de modelonzekerheid aan de sterkte kant, het effect van bewezen sterkte inderdaad significant.

De verschuiving zoals getekend in lichtblauw in figuur 2 geldt alleen voor een belasting met bekende grootte gelijk aan de stippellijn. Bij een belasting met onbekende grootte (rode lijn) vlt de update met bewezen sterkte enigszins uit. We krijgen dan situatie zoals geschetst in figuur 3.

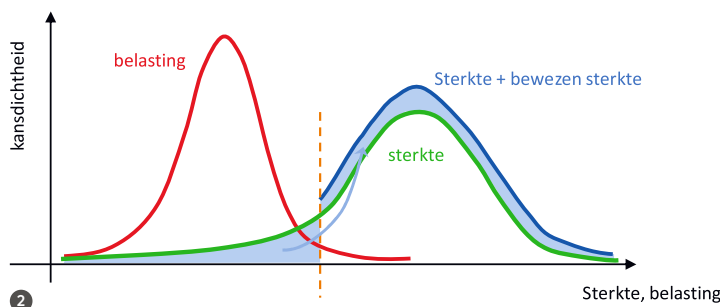
Gegeven de faalkans, is de betrouwbaarheidsindex te vinden via de tabel voor de normale verdeling. Hoe meer gebouwen die goed presteren, hoe hoger de betrouwbaarheid.

In bovenstaande faalkansberekening wordt gewerkt met een referentieperiode van 15 jaar. Dit is gedaan omdat voor het afkeurniveau in NEN 8700 deze referentieperiode is voorgeschreven. We kijken dus naar een faalkans in een periode van 15 jaar volgend op de beoordeling.

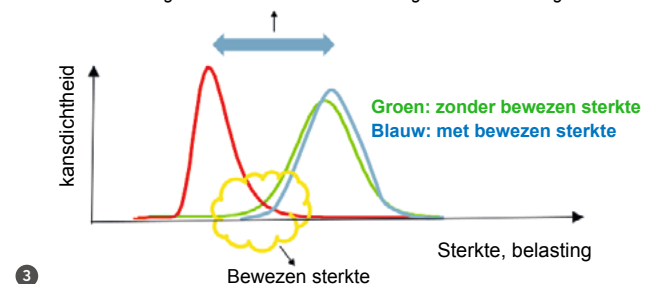
Voor hetzelfde type vloer, maar kijkend naar de periode 5-20 jaar (dus onder voorwaarde dat de beschouwde vloer niet heeft gefaald in de eerste 5 jaar), wordt de kans bepaald als:

$P_f = P(\text{falen beschouwde vloer in 5-20 jaar} \mid 1 \times \text{falen Eindhoven dakvloer zonder } Q \text{ en met } T \cap 8 \times \text{niet falen Eindhoven verdiepingsvloer zonder } Q \cap n \times \text{niet falen gebouwen met 30 vloeren in 0-10 jaar}) \cap 1 \times \text{niet falen beschouwde vloer in 0-5 jaar})$

Op dezelfde wijze kan dan worden gekeken naar een periode 10-25 jaar (dus onder voorwaarde dat de beschouwde vloer niet heeft gefaald in de eerste 10 jaar), en ook verder in de tijd. →



Afstand verwachtingswaarde sterkte en verwachtingswaarde belasting



Er wordt onderscheid gemaakt tussen normale (tussen)vloeren en dakvloeren. Bij niet geïsoleerde dakvloeren wordt extra gekeken naar effecten van opgelegde vervormingen door krimp of temperatuur.

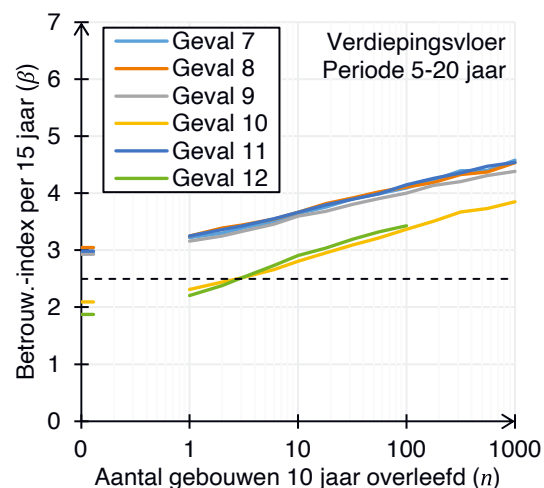
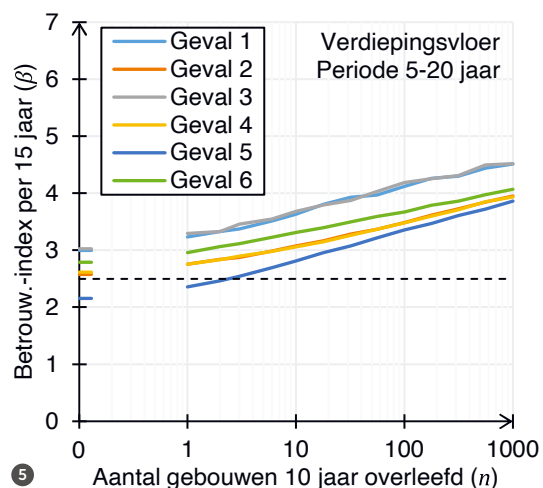
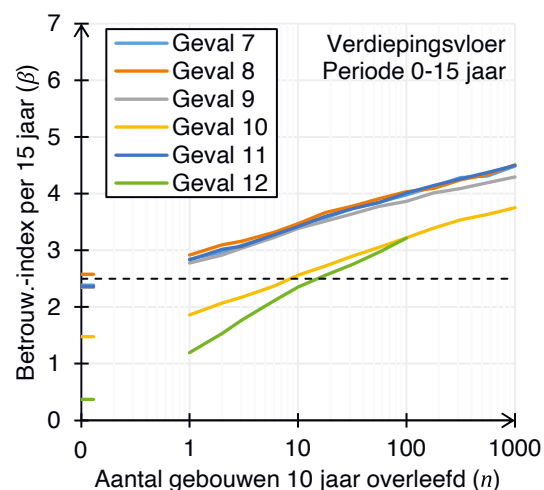
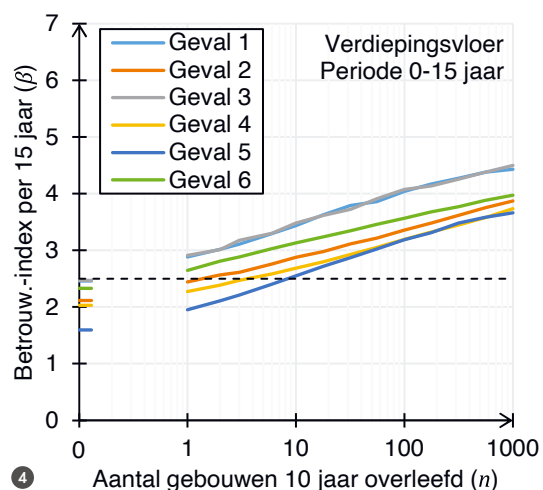
Berekeningsuitkomsten

In [2] zijn voor alle 12 subpopulaties en leeftijden probabilistische berekeningen uitgevoerd inclusief een groot aantal variatiestudies. Voor de exacte definitie van de subpopulaties wordt verwezen naar [2]. Ter illustratie worden hieronder enkele berekeningen getoond.

In figuren 4 en 5 is het betrouwbaarheidsniveau van een te beoordelen breedplaatvloer weergegeven (uitgedrukt in een β -waarde voor een referentieperiode van 15 jaar volgend op de beoordeling conform NEN 8700 voor het afkeurniveau). Voor elk

van de subpopulaties geldt een afzonderlijke lijn. In figuur 4 is de betrouwbaarheid weergegeven voor een constructie beschouwd op $t = 0$; met andere woorden zonder bewezen sterkte van diezelfde constructie in de tijd.

In figuur 5 is de betrouwbaarheid beschouwd op $t = 5$ jaar, met andere woorden een bestaande constructie van minimaal 5 jaar oud. Op de horizontale as is de informatiebasis vanuit het track record gegeven. Dit geeft aan wat het effect is op de betrouwbaarheid als gevolg van het aantal succesvol presterende gebouwen met een vergelijkbare vloeropbouw. Of anders gezegd het aantal benodigde succesvolle gebouwen om een bepaalde betrouwbaarheid aan te tonen. Er is op de horizontale as van de figuren niet direct uitgegaan van een daadwerkelijk beschikbaar track record, maar er wordt van uitgegaan dat een track record met n gebou-



wen beschikbaar zou zijn. Uit de grafiek kan dus afgelezen worden hoeveel gebouwen er in een track record moeten zitten, om te kunnen zeggen dat de β -waarde voldoende groot is. Voor de gebouwen uit het track record (niet zijnde het gebouw dat beoordeeld wordt) wordt uitgegaan van een voorzichtig gekozen gemiddelde van 10 jaar succesvol presteren.

Doordat informatie beschikbaar is over het succesvol presteren van de eigen of andere vloerconstructies, wordt het minder waarschijnlijk dat de constructie een lage faalkans heeft; in de figuren 4 en 5 vertoont het verloop van de betrouwbaarheid een stijgende lijn met toenemende n . Met behulp van de theorie worden de schattingen van gemiddelde en standaardafwijking bijgesteld (geüpdate); het gemiddelde wordt groter, de spreiding kleiner. Bij een probabilistische berekening levert dit een kleinere faalkans op. Bij een semi-probabilistische beschouwing leidt dit tot een hogere rekenwaarde van de weerstand en daarmee een afname van de Unity Check. Ook is te zien dat de te beoordelen vloerconstructie een eigen bewezen sterkte in de tijd heeft; de waarden voor de betrouwbaarheid liggen hoger in figuur 5 dan in figuur 4. Ten slotte zijn de 12 subpopulaties zichtbaar met een duidelijk verschillend verloop van de betrouwbaarheid.

Conclusie

TNO heeft een betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd voor de beoordeling van bestaande Nederlandse breedplaatvloerconstructies waarbij sprake is van primaire krachtoverdracht (buigende momenten in het midden van een overspanning) over het constructiedetail ter plaatse van de langsnaden of langsvogen tussen de breedplaten. Gekozen is voor het ontwikkelen van een probabilistische beoordelingsmethode. Met deze methode is het mogelijk om alle typen informatie over de constructieve sterkte en alle onzekerheden op een verantwoorde wijze mee te nemen en de vloeren direct te toetsen aan de in de vigerende regelgeving vereiste betrouwbaarheid. Zowel informatie uit laboratoriumproeven over het gedrag

van de naad en informatie uit het track record van bestaande vloerconstructies is verwerkt. Het track record bevat het falen van de dakvloer bij de parkeergarage van Eindhoven Airport, evenals het niet falen (overleven) van vloeren van gebouwen met breedplaatvloeren onder opgetreden gebruikbelastingen en proefbelastingen.

Conclusie: In aanleg kunnen grote vraagtekens worden geplaatst bij de constructieve veiligheid van breedplaatvloeren gebouwd tot 2017 waarbij primaire krachtsafdracht plaats moet vinden bij de langsvog. Dit is het gevolg van de rekenkundig gezien onvoldoende detaillering ter plaatse van de langsvog. Door combinatie van de rekenmodellen, de uitkomsten van laboratoriumproeven en de bewezen sterkte analyse kan echter worden geconcludeerd dat voor bepaalde gebouwtypologieën de vloeren toch voldoende betrouwbaar zijn.

Voor de conclusies op niveau van de verschillende subpopulaties wordt verwezen naar [2]]. Bijzondere aandacht is daarin gevraagd voor direct door zonlicht bestraalde dakvloeren en grote overspanningen (10-15m); deze voldoen na analyse niet aan de betrouwbaarheidseis voor CC2 uit NEN 8700 en de betrouwbaarheid is zeer laag. ●

LITERATUUR

- 1 Wijte, S., & Dieteren, G., Rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren. *Cement* 2019/4.
- 2 Steenberg, R., Dieteren, G., Vries, R. de, Borsje, H., Vrouwenvelder, T., & Wijte, S. TNO-2022-R10122 Probabilistische kwantificering van de veiligheid van bestaande breedplaatvloeren. Delft: TNO, 2022.
- 3 Wijte, S., & Dieteren, G., Vereenvoudigde beoordelingsprocedure breedplaatvloeren. *Cement* 2024/4.