



# *Nieuwe rekenregels bestaande breedplaat- vloeren*

Foto: Havebo Groep

*Naar aanleiding van aanvullend onderzoek, waaronder een bewezen sterkte analyse, zijn de rekenregels voor bestaande breedplaatvloeren aangepast, is een nieuw stappenplan opgesteld en wordt voor een aantal CC2-vloeren een onderzoeksplicht ingesteld.*

**31** Rekenregels breedplaatvloeren: een overzicht

**32** Update rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren

**42** Vereenvoudigde beoordelingsprocedure bestaande breedplaatvloeren

**49** Veiligheid bestaande breedplaatvloeren op basis van track record

# Rekenregels breedplaatvloeren: een overzicht

**Naar aanleiding van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport zijn in 2019 rekenregels en een stappenplan voor de beoordeling van bestaande breedplaatvloeren gepubliceerd.** In 2020 is door het ministerie van BZK een onderzoeksplicht afgekondigd voor CC3-constructies waarin dit type vloeren is toegepast. Hierbij moest het genoemde stappenplan worden gebruikt.

Er is nu aanvullend onderzoek uitgevoerd naar koppelstaven met korte lengte en tevens een oriënterend onderzoek naar kopvoegen. Op basis daarvan zijn de rekenregels aangepast. Daarnaast is in een studie een bewezen sterkte analyse uitgevoerd, waarbij rekening is gehouden met het presenteren van de bestaande voorraad breedplaatvloeren. Uit dit onderzoek volgt dat het nader beoordelen van CC2-constructies in een aantal situaties nodig is.

## Stappenplan aangepast

Deze bevindingen zijn verwerkt in een aangepast stappenplan (Stappenplan 2022), waarin een vereenvoudigde beoordelingsmethodiek is opgenomen. Naast enkele aangepaste rekenregels staat hier een nieuwe '3e toets' in, waarin is aangegeven dat beoordeling van CC2-constructies (geldt eventueel ook voor CC1) bij bepaalde typologische

criteria (o.a. type vloer, overspanning, detaillering) niet nodig is.

## Onderzoeksplicht uitgebreid

Per 1 juli 2024 is de eerder ingestelde onderzoeksplicht uitgebreid naar CC2-constructies. Hierbij moet het Stappenplan 2022 worden gebruikt. De uitkomsten van dit onderzoek moeten voor 1 juli 2025 in een rapport zijn vastgelegd.

Meer specifiek gaat het om een uitbreiding naar alle gebouwen binnen CC2 met breedplaatvloeren met een overspanning van meer dan 8,5 m en/of met niet-geïsoleerde daken uitgevoerd met breedplaten (vooral parkeergarages). Gebouwen met uitsluitend een woonfunctie zijn uitgesloten. Verder geldt de onderzoeksplicht (net als de eerdere onderzoeksplicht) niet voor gebouwen van vóór 2000. Ook gebouwen met een na 2018 verleende omgevingsvergunning zijn uitgesloten. Toen golden immers al nieuwe rekenregels voor breedplaatvloeren.

Gebouwen die al volgens het Stappenplan 2019 zijn onderzocht hoeven daarom niet opnieuw te worden beoordeeld.

## Drie artikelen

Meer achtergrondinformatie staat in de hierna volgende drie artikelen. In het artikel 'Update rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren' worden het aanvullende

onderzoek en de aanpassing van de rekenregels toegelicht. In het artikel 'Vereenvoudigde beoordelingsprocedure bestaande breedplaatvloeren' wordt ingegaan op de vereenvoudigde procedure in het nieuwe stappenplan. In het artikel 'Veiligheid bestaande breedplaatvloeren op basis van track record' wordt de probabilistische methode toegelicht, op basis waarvan de vereenvoudigde procedure is afgeleid. ●

## HANDIGE LINKS

Stappenplan 2022:



Onderzoeksplicht:



# Update rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren

Aanpassing op basis van resultaten aanvullend onderzoek  
korte koppelstaven en bewezen sterkte analyse

*Naar aanleiding van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport zijn in 2019 rekenregels voor de beoordeling van bestaande breedplaatvloeren gepubliceerd. Deze rekenregels zijn nu aangepast, naar aanleiding van aanvullend onderzoek.*

**Uit onderzoek naar de oorzaak van de instorting van de parkeergarage bij Eindhoven Airport blijkt dat vloeren die zijn uitgevoerd met breedplaten in bepaalde gevallen onvoldoende veilig kunnen zijn.** Voor het beoordelen van bestaande breedplaatvloeren zijn rekenregels [1] opgesteld, die beschreven zijn in een stappenplan (hierna Stappenplan 2019 [2]). Naar aanleiding hiervan is door het ministerie van BZK in 2020 een onderzoeksplicht afgekondigd voor CC3-constructies waarin dit type vloeren is toegepast. De betreffende rekenregels waren gebaseerd op de resultaten van tot dan toe in Nederland uitgevoerd onderzoek naar het gedrag van het detail bij de langsnaden tussen twee breedplaten in een breedplaatvloer, waar sprake is van een primaire krachtsoverdracht en een optredend positief moment (fig. 1a).

Zoals aangegeven in [1] was er behoefte om voor kleinere diameters (korte

auteurs



IR. GERRIE  
DIETEREN

TNO

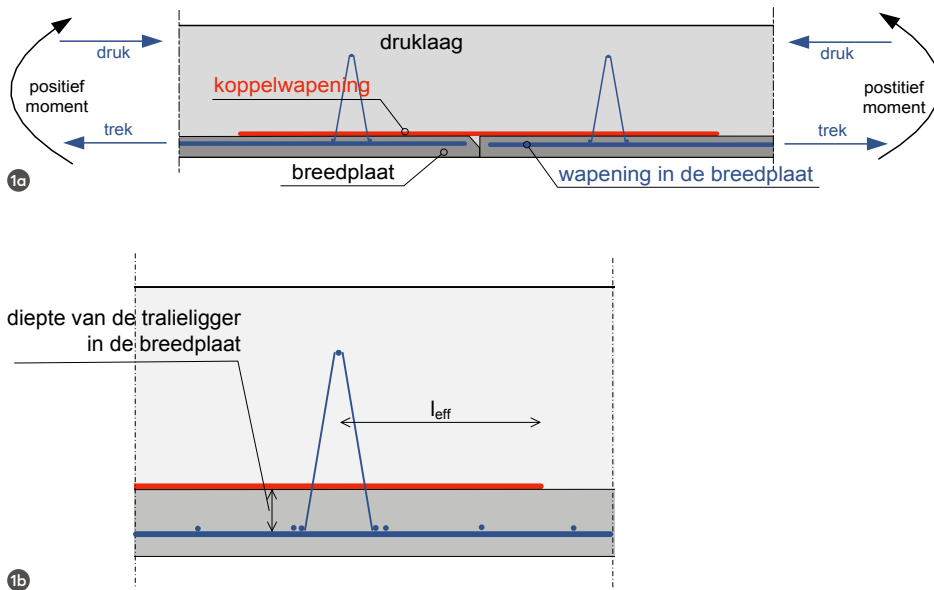


PROF. IR. SIMON  
WIJTE

Adviesbureau  
Hageman / TU/e

verankeringslengtes / effectieve lengte, fig. 1b) aanvullend onderzoek uit te voeren aan langsnaden. Dit omdat er met de in het verleden toegepaste staaflengte sprake kan zijn van een relatief korte doorsteek van de koppelwapening voorbij de tralieliggers. Deze korte lengte kan van invloed zijn op de weerstand van het detail en zodoende de aan te houden rekenregels. Tevens was de afwijkende situatie bij kopvoegen, waarbij de tralieliggers niet parallel lopen aan de voeg maar hier haaks op staan, in het eerder uitgevoerde onderzoek niet experimenteel beschouwd. Daarom is in de afgelopen periode aanvullend experimenteel onderzoek uitgevoerd naar het gedrag bij een korte doorsteek en bij kopvoegen. Daarnaast is gekeken of op basis van een bewezen sterkte analyse [3], onder bepaalde voorwaarden, de beoordeling van vloeren in CC2- en CC1-gebouwen kan worden vereenvoudigd.

Naar aanleiding van de uitgevoerde onderzoeken zijn de rekenregels beperkt



*Er is experimenteel onderzoek uitgevoerd naar het gedrag bij een korte doorsteek en naar het gedrag bij kopvoegen*

aangepast en is het Stappenplan 2019 gerevisieerd tot het Stappenplan 2022 (gepubliceerd begin 2024) [4]. Per 1 juli 2024 is de onderzoeksplicht uitgebreid naar CC2-constructies met een overspanning groter dan 8,5 m. In dit artikel wordt ingegaan op de aangepaste rekenregels. In een afzonderlijk artikel wordt een toelichting gegeven op enkele uitgangspunten van de uitgevoerde bewezen sterkte analyse [5] en wordt de doorvertaling hiervan in de beoordelingsprocedure van het Stappenplan 2022 weer gegeven.

### Achtergrond aanvullend experimenteel onderzoek

Tijdens alle uitgevoerde experimenten op naden tussen twee breedplaatvloeren traden er op hoofdlijnen twee soorten bezwijken op: het vloeien van de koppelwapening werd bereikt of het aansluitvlak tussen de breedplaten en de druklaag bezweek voordat vloeien van de koppelwapening kon optreden.

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen de volgende bezwijkmechanismen (zie ook kader ‘Wanneer treedt welk mechanisme op?’):

- 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 koppelwapening.

Om te kunnen spreken van een gewapend aansluitvlak, zoals bij mechanisme 2 en 3, moet de koppelwapening doorsteken tot achter de tralieligger. Bij een proefstuk met een ongewapend aansluitvlak is tijdens het opvoeren van de belasting meestal mechanisme 1 maatgevend. In geval van een gewapend aansluitvlak treedt mechanisme 1 wel op, maar is dit in het algemeen niet het mechanisme dat tot bezwijken leidt.

Inclusief vloeien van de koppelwapening zijn er dus vier (bezwijk)mechanismen die kunnen optreden. Welke er optreedt is onder andere afhankelijk van de effectieve lengte van de koppelstaven achter de tralieligger ( $l_{eff}$ , fig. 1b), of de positie van de tralieligger (diepte in breedplaat) en de ruwheid van het aansluitvlak.

In de uitwerking van de proeven is altijd een analyse voor de verschillende waargenomen mechanismen uitgevoerd. Bij de in [1] beschouwde proeven varieerde de effectieve lengte ( $l_{eff}$ ) van de koppelstaven van 300 tot 750 mm. Dit omdat de focus in eerste instantie lag op koppelstaven met grotere staafdiameters met bijbehorende grotere →

1a Kritisch vloerdetail

1b Diepte van de tralieligger en effectieve lengte ( $l_{eff}$ ) van de koppelwapening

## WANNEER TREEDT WELK MECHANISME OP?

Afhankelijk van de effectieve lengte van de koppelstaven ( $l_{eff}$  in fig. 1b) achter de tralie, ofwel de positie van de tralie en de ruwheid van het aansluitvlak, zijn de volgende bezwijkvormen mogelijk:

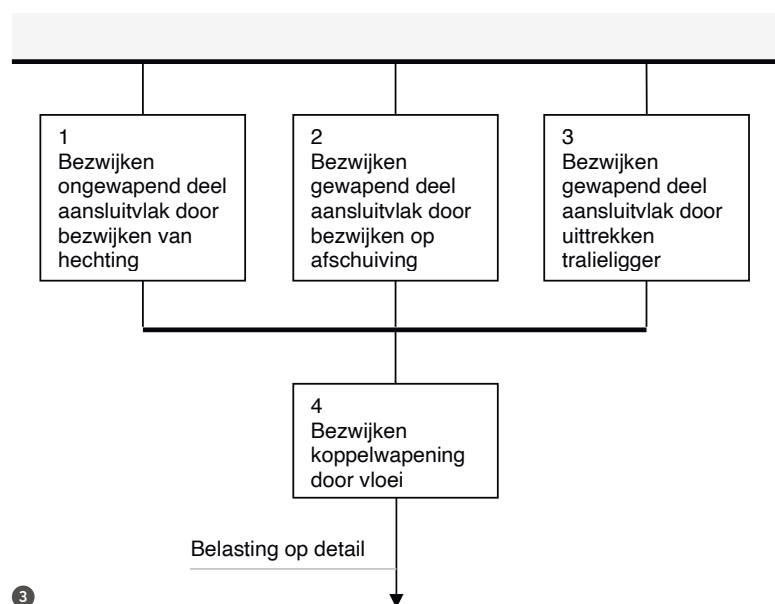
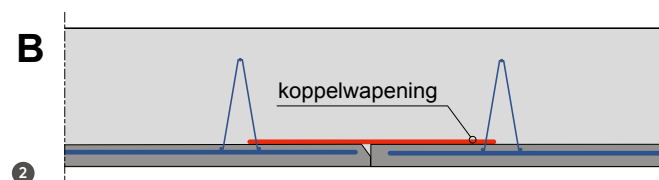
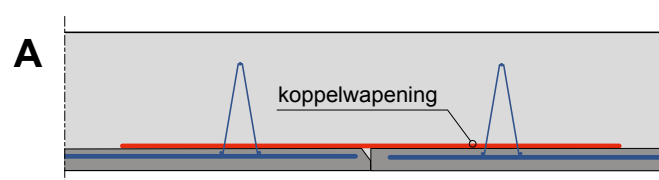
- Voor detailleringwijze A (fig. 2): alle vier de mechanismen
- Voor detailleringwijze B (fig. 2): mechanismen 1 en 4

Het optreden van de mechanismen 1 t/m 3, die alle betrekking hebben op het aansluitvlak, zullen ieder afzonderlijk geen aanleiding geven tot bezwijken van het detail. In de keten staan faalmechanismen 1 t/m 3 daarom parallel geschakeld en vervolgens gezamenlijk in serie met mechanisme 4, het vloeien van de koppelwapening (fig. 3).

verankeringslengte. Mechanisme 1 is zodoende niet als maatgevend mechanisme waargenomen in de toen beschouwde proeven. Tevens is in [1] onderkend dat voor praktijksituaties waarbij de koppelwapening niet of slechts beperkt doorsteekt tot voorbij de tralieligger, er in de literatuur slechts enkele proefresultaten beschikbaar waren. Dit is de reden waarom in het Stappenplan 2019 [2] voor toepassing van de daar gegeven rekenregels is geëist dat de effectieve lengte ten minste 100 mm is. Om voor de in Nederland gebruikelijke detaillering na te gaan of de rekenmodellen voor relatieve korte effectieve lengten van de koppelwapening ook toepasbaar zijn, zijn er aanvullende proeven uitgevoerd [6].

## Onderzoek invloed effectieve lengte koppelstaven langsnaeden

Om na te gaan wat het effect is van een kortere effectieve lengte van de koppelstaven bij langsnaeden zijn er aanvullend vier verschillende proefseries uitgevoerd met telkens drie identieke proefstukken per serie. De belangrijkste parameters per serie zijn in tabel 1 weergegeven. Hierbij is de effectieve lengte van de koppelstaven gevarieerd tussen 0 en 200 mm. De breedplaatvloeren waren uitgevoerd in traditioneel grindbeton C30/37 (breedplaat en druklaag) met een breedplaatdikte van 70 mm. Voor de evaluatie van de proeven is op basis van proefkubussen voor de breedplaten, alsook de druklaag, de druksterkte ten tijde van beproeven bepaald.



*De in rekening te brengen hoeveelheid wapening die het aansluitvlak doorkruist is begrensd*

Tabel 1 Overzicht van beproefde proefstukken [7]

proefstuk	effectieve lengte [mm]	nabewerkt oppervlak	verdere omschrijving
T25-T27	0	nee	$h = 250$ mm, druklaag C30/37, koppelwapening $\varnothing 10-75$
T28-T30	100	nee	$h = 250$ mm, druklaag C30/37, koppelwapening $\varnothing 10-75$
T31-T33	200	nee	$h = 250$ mm, druklaag C30/37, koppelwapening $\varnothing 10-75$
R4-R6	100	ja	$h = 250$ mm, druklaag C30/37, koppelwapening $\varnothing 10-75$

Bij een deel van de proeven werd waargenomen dat er twee weerstandniveaus zijn te onderscheiden (fig. 4). Nadat de maximale weerstand wordt bereikt, valt de weerstand snel terug. Daarna is er een tweede niveau dat enigszins constant blijft bij een toenemende vervorming tot daadwerkelijk bezwijken optreedt.

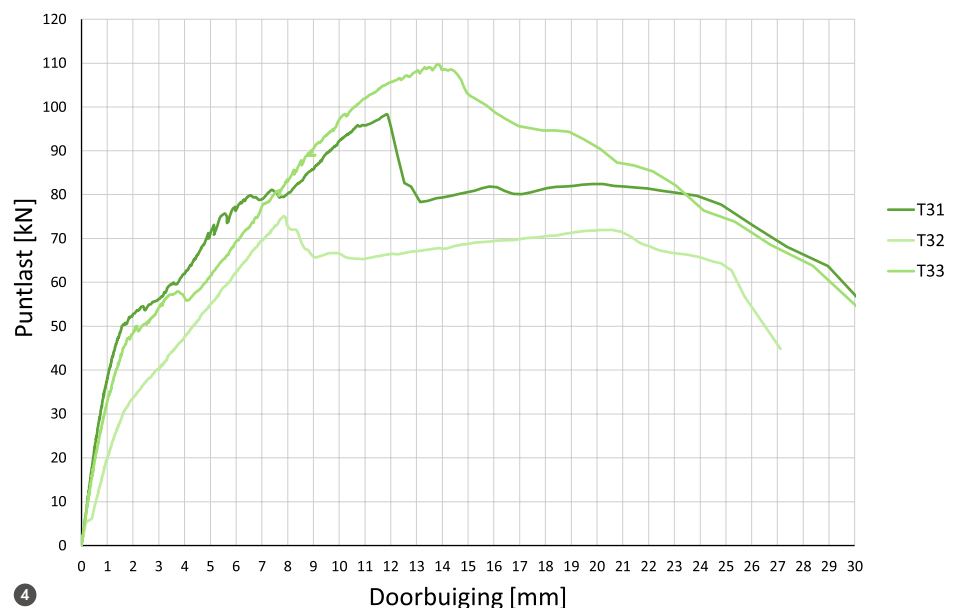
Dit gedrag is ook beschreven in [1] en [8], waarbij is beschreven dat het niveau met een minder ductiel vervormingsgedrag, hier het maximale niveau, wordt ontleend aan mechanisme 2 (afschuifsterkte) en het tweede, hier lager gelegen niveau, aan mechanisme 3 (uittrekken tralieligger).

### Evaluatie proefresultaten voor langsvoegen

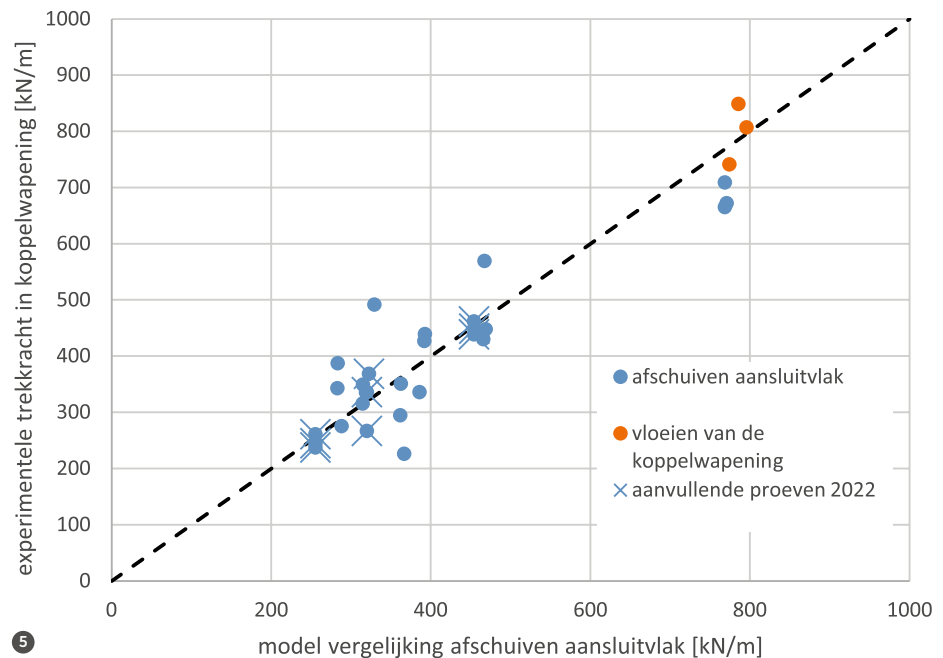
**Afschuiven van het aansluitvlak (mechanisme 2)** Voor de evaluatie van de nieuwe proeven met de in [1] afgeleide rekenregels,

is voor mechanisme 2 (afschuiven van het aansluitvlak) uitgegaan van de maximaal in de proef bepaalde optredende kracht in de koppelwapening. Voor mechanisme 3 (uittrekken tralieligger) is in die gevallen waar een tweede (lagere) niveau werd waargenomen, uitgegaan van dit lagere tweede niveau. Voor de voorspelling van de weerstand voor beide mechanismen is in eerste instantie uitgegaan van de rekenregels zoals gegeven in [1] en [2]. Voor de vergelijking met de proeven zijn de rekenregels uiteraard aangepast om de gemiddelde waarde van de weerstand te bepalen.

In figuur 5 is de vergelijking tussen de voorspelling (horizontale as) en de proeven (verticale as) gegeven voor mechanisme 2. De nieuwe proeven met een effectieve lengte van 0, 100 en 200 mm zijn gemarkeerd met een kruisje. Als de nieuwe proefresultaten worden toegevoegd aan de dataset van de →



*Voor het uittrekken van de tralieligger is een bovengrens gesteld, afhankelijk van de treksterkte van het beton*



in [1] gehanteerde proeven, blijkt dat de gemiddelde waarde en de variatiecoëfficiënt met de nieuwe proeven nagenoeg gelijk blijven. Zodoende is geconcludeerd dat ook voor korte effectieve lengtes van koppelstaven ( $100 \text{ mm} < l_{\text{eff}} < 300 \text{ mm}$ ) de vergelijking voor mechanisme 2 goed toepasbaar is.

Vervolgens is beoordeeld of ook voor kortere effectieve lengtes (korter dan  $100 \text{ mm}$ ) de vergelijking voor mechanisme 2 toepasbaar is. Hiertoe is gebruikgemaakt van de nieuw uitgevoerde proeven met een effectieve lengte van  $0 \text{ mm}$ . Hierbij is rekenkundig uitgegaan van een effectieve lengte van  $1 \text{ mm}$ . Dit betekent met name dat bij koppelwapening die net voorbij de tralieligger loopt, een volledige bijdrage van het aansluitvlak doorstekende wapening (de tralieligger) in de aanwezig capaciteit wordt verondersteld. In de praktijk zal een effect van door het aansluitvlak doorkruisende wapening al merkbaar zijn bij koppelstaven die op een bepaalde afstand voor het hart van de tralieligger stoppen. Welke afstand dat precies is en hoe deze bijdrage moet worden bepaald, kan op basis van de beschikbare proeven niet exact worden aangegeven. Daarom is gekozen voor een aanpak waarbij mechanisme 2 pas kan worden toegepast als de koppelstaven

(net) voorbij het hart van de tralieligger doorlopen.

De uitgevoerde vergelijking tussen de proeven en het model maakt duidelijk dat ook bij een beperkte waarde voor  $l_{\text{eff}}$  het model toepasbaar is. Er is weliswaar een grotere spreiding in de resultaten, maar zoals in figuur 5 zichtbaar is, wordt de invloed van de effectieve lengte  $l_{\text{eff}}$  op de voorspelling voor alle waarden gemiddeld even goed meegenomen. Op basis van deze vergelijking wordt geconcludeerd dat ook voor lage waarden van  $l_{\text{eff}}$  het mechanisme afschuiven aansluitvlak toepasbaar is.

Bij de beschrijving van dit mechanisme werd in het Stappenplan 2019 [2] echter geen bovengrens aan de hoeveelheid verbindingswapening (de aansluitvlak doorkruisende wapening  $A_{s,v}$ ) gesteld. Ten gevolge daarvan zou, in het geval van een onbeperkte hoeveelheid verbindingswapening, de weerstand van het mechanisme onbeperkt kunnen worden opgevoerd. In dit mechanisme zit echter impliciet ook het mechanisme van de verankering van de koppelwapening achter de verbindingswapening. Dit is bij de beproevingen impliciet meegenomen. Bedacht moet echter worden dat indien de gevonden relatie voor de afschuifsterkte

wordt toegepast buiten het domein van de bij de experimenten beschouwde toegepaste variabelen, zoals de hoeveelheid verbindingswapening, andere mechanismen bepalend kunnen worden. Daarom is een bovengrens bepaald voor de bijdrage van aansluitvlak doorkruisende wapening in de afschuifweerstand.

De bovengrens is gebaseerd op de proefstukken T25-T27 en T28-T30 waarbij geldt  $l_{\text{eff}} \approx 0$  mm resp. 100 mm en  $A_{\text{sv,a}} = 356$  mm<sup>2</sup>/m. Op basis van de maximale spanning in de koppelstaven in de proeven is geconcludeerd dat bij  $l_{\text{eff}} \approx 0$  mm de bijdrage van de tralieligger in de capaciteit 60% bedraagt en er dus een begrenzing nodig is. Beschikbare buitenlandse proeven met lage waarden van  $l_{\text{eff}}$  zijn hierbij buiten beschouwing gelaten, omdat deze minder representatief worden geacht voor de Nederlandse situatie en ook minder goed voorspeld werden met het model.

Voor de grootte van de maximaal in rekening te brengen aansluitvlak doorkruisende wapening  $A_{\text{sv}}$ , is op basis van de proeven T25-T27 en T28-T30 afgeleid dat bij  $l_{\text{eff}} \approx 0$  mm,  $A_{\text{sv,a}}$  gelijk moet zijn aan  $0,4 \times 356 = 142$  mm<sup>2</sup>/m. Bij een effectieve lengte van 100 mm zou dit

356 mm<sup>2</sup>/m moeten zijn. Dit leidt tot de volgende vergelijking:

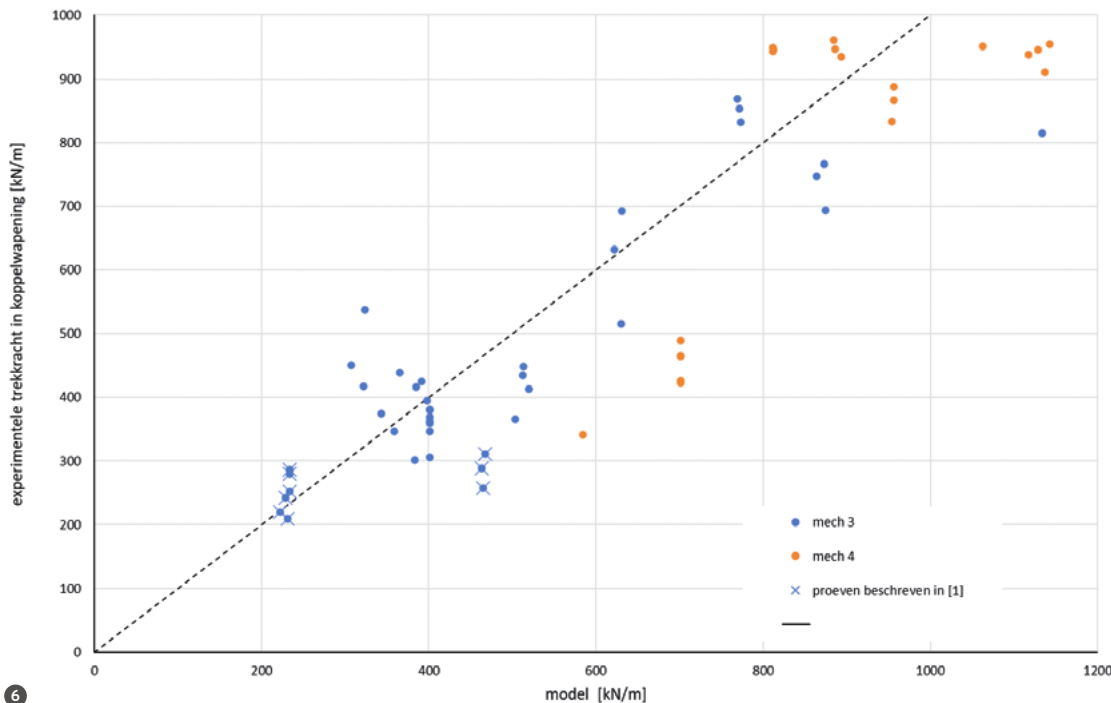
$$A_{\text{sv,a,max}} = 142 + 2,14 l_{\text{eff}} \text{ [mm}^2\text{/m]} \quad (1)$$

met  $l_{\text{eff}}$  in [mm]

### Uittrekken van de tralieligger (mechanisme 3)

Bij de vergelijking van de proefresultaten met de voorspelling volgens het mechanisme 3 (uittrekken tralieligger) bleek dat voor de aanvullende proeven de voorspelde weerstand sterk kon afwijken van de in de proef waargenomen waarden (fig. 6). Geconcludeerd werd dat een aanpassing van de rekenregel nodig was. Een nadere studie van de variabelen in de weerstandsvergelijking maakte duidelijk dat de inbeddingsdiepte van de tralieligger gecombineerd met de treksterkte van beton weliswaar een bepalende factor is voor het uittrekken van de tralieligger (grootte en sterkte van de betonconus hiervan afhankelijk), maar dat hier een bovengrens aan moet worden gesteld.

Bij enkele proeven bleek dat de tralieligger niet werd uitgetrokken, maar dat er sprake was van breken van de diagonalen van de tralieligger. Om dit mee te nemen in de weerstandsbepaling, is er een boven- →



6 Verhouding bezwijkwaarden voor experimenten voorspeld voor mechanisme 3 (uittrekken) en 4 (vloeien van de wapening), beschreven in [1] en [8], uitgezet tegen het experimenteel gevonden trekkracht in koppelwapening



grens toegevoegd. Nadere analyse maakte duidelijk dat met een bovengrens op de factor  $d_t$ , die afhankelijk is van de treksterkte van beton, dit kan worden ondervangen. Daarom is aan de vergelijking op basis van gemiddelde waarden de volgende grenswaarde voor  $d_t$  toegevoegd:

$$d_t \leq \left( \frac{750}{f_{ctm,bp}} \right)^{2/3} \quad (2)$$

Tevens bleek enerzijds dat voor kortere effectieve lengten van de koppelwapening met het model uit 2019 de weerstand werd overschat en anderzijds dat deze weerstand altijd lager was dan de weerstand van mechanisme 2. Daarom is besloten om de toepassing van het weerstandsmodel voor uittrekken van de tralieligger te beperken tot die gevallen waar geldt  $l_{eff} \geq 250\text{mm}$ .

In het Stappenplan 2019 [2] was niet expliciet aangegeven dat de rekenregel voor het uittrekken van tralieliggers gold voor 3D-tralieliggers. De proeven waarop de rekenregel is gebaseerd, waren echter allemaal voorzien van 3D-tralieliggers. Voor het wel of niet uittrekken van de tralieligger is het aantal onderstaven in de tralieligger (één bij 2D en twee bij 3D) van belang, daar deze de grootte van de te activeren betonkegel bepalen. In het Stappenplan 2022 [4] is daarom vereist dat er sprake moet zijn van tralieliggers met twee onderdraden en één bovendraad (3D-tralie).

Noot:

*Voor het mechanisme afschuiven van het aansluitvlak geldt weliswaar ook dat de proeven alleen met 3D-tralieliggers zijn uitgevoerd, maar in de rekenregel wordt de aansluitvlak doorkruisende wapening in rekening gebracht. Hierdoor wordt ook voor 2D-tralieliggers de weerstand correct bepaald.*

#### **Aanpassing semi-probabilistische analyse op basis van probabilistische analyses**

Op basis van de hiervoor gegeven evaluatie van de additionele proeven zijn de rekenregels zoals gegeven in Stappenplan 2019 [2] op enkele punten aangepast (zie verderop onder 'Aanpassing rekenregels in Stappenplan 2022').

Naast de aanpassing op basis van de aanvullende proeven, is naar aanleiding van een uitgevoerde probabilistische analyse [9 en 10] ook gekeken of de semi-probabilistische analyse zoals gegeven in het Stappenplan 2019, verder kan worden geoptimaliseerd voor de beschouwing van gebouwen ingedeeld in CC1 of CC2.

Voor een populatie van veel voorkomende breedplaatvloerconfiguraties is een vergelijking gemaakt tussen semi-probabilistische beoordeling en een probabilistische analyse voor dezelfde vloer. Het doel was om de semi-probabilistische toets volgens NEN 8700 voor de onderhavige toepassing beter aan te laten sluiten op het bijbehorend probabilistische resultaat. Hiertoe is een (additionele) correctiefactor afgeleid. Aan de hand van de in [10] gerapporteerde analyse is bewezen dat met een correctiefactor van 1,2 een betrouwbaarheid van  $\beta = 2,5$  wordt gevonden bij een Unity Check (UC) = 1,0. Zodoende is geconcludeerd dat, indien sprake is van een ten minste vijf jaar oude constructie, bij ongewijzigd gebruik, met een correctiefactor van 1,2 de weerstand van de mechanismen 2 en 3 mag worden vergroot bij een toets van de constructieve veiligheid. Er is sprake van ongewijzigd gebruik als de functies op de beschouwde vloer niet wijzigen. In het Stappenplan 2022 [4] is dit resultaat verwerkt door de introductie van de factor  $k_\gamma$  in zowel de weerstandsvergelijking voor afschuiven van het aansluitvlak alsook voor uittrekken van tralieliggers.

#### **Kopvoegen**

De hiervoor omschreven onderzoeken hadden betrekking op doorsneden met een positief moment ter plaatse van langsvoegen tussen breedplaten. Echter, ook in doorsneden bij een naad aan het einde van een breedplaat (korte zijde) kan een positief moment optreden. Op deze positie, hierna aangeduid als kopvoegen, zijn tralieliggers aanwezig in de richting loodrecht op de naad die doorlopen tot nabij de naad. In die zin onderscheidt de detaillering bij kopvoegen zich van de detaillering van het kritische detail ter plaatse van langsnaden.

Het beoordelen van de kopvoegen maakt strikt genomen geen onderdeel uit



van de stappen in het stappenplan. Wel is in de beschrijving van het stappenplan aanvullende informatie opgenomen over hoe de weerstand van kopvoegen kan worden bepaald. Tot nu toe is in Stappenplan 2019 [2] voor de weerstandsbepaling aangehaakt bij de reguliere rekenregels uit NEN-EN 1992-1-1 [11]. De vraag was echter of de afstand tussen de tralieliggers, bij gewapende breedplaten maximaal gelijk aan 800 mm, van invloed is op de weerstand van het aansluitvlak bij toepassing van een gelijkmatige verdeling van de koppelwapening. Het zou mogelijk kunnen zijn dat de weerstand van het aansluitvlak, en de daarmee samenhangende effectiviteit van de koppelwapening, niet gelijkmatig over de breedte van de kopvoeg is verdeeld. Om dit te onderzoeken zijn er ook experimenten uitgevoerd op kopvoegen. Dit om meer inzicht te krijgen in het gedrag van breedplaatvloeren bij kopvoegen in het algemeen en de invloed van de verdeling van de tralieliggers in het bijzonder. Er zijn daarvoor twee typen proefstukken ontworpen die beproefd zijn in een vierpuntsbuigproef. Van ieder proefstuktype zijn drie identieke proefstukken beproefd.

De proefstukken KV1-KV3 zijn 1,6 m breed en hebben tralieliggers met een h.o.h.-afstand van 800 mm. De hoeveelheid koppelwapening is zo gekozen, dat op basis van de rekenregels in NEN-EN 1992-1-1 [11] bezwijken van het aansluitvlak mag worden verwacht voordat de koppelwapening gaat vloeien.

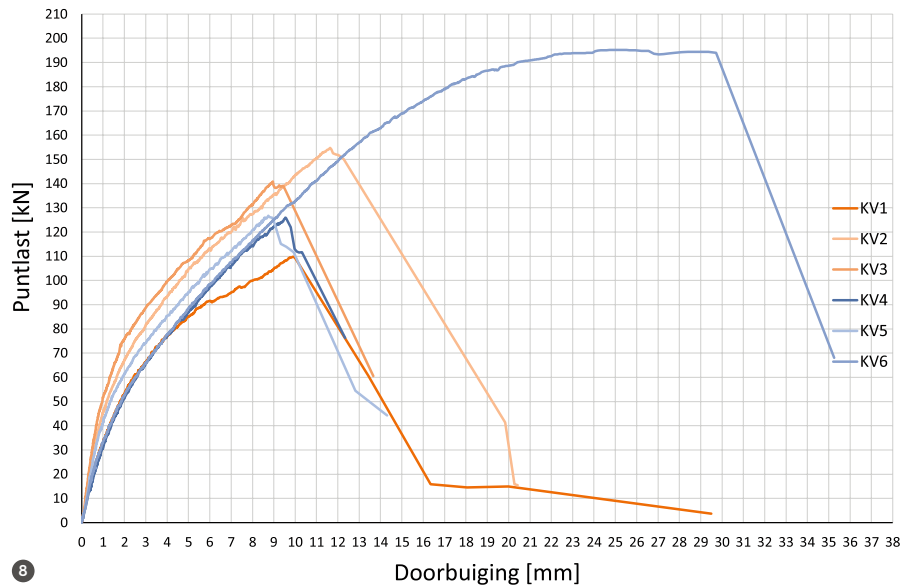
De proefstukken KV4-KV6 zijn identiek aan de proefstukken KV1-KV3, alleen de h.o.h.-afstand van de vier tralieliggers is 400 mm

bij een gelijkblijvende totale hoeveelheid wapeningsdoorsnede van de diagonalen in het aansluitvlak. Bij deze proefstukken is daartoe de helft van de diagonalen weggeknipt.

Alle zes proefstukken zijn bezweken door het bezwijken van het aansluitvlak tussen de druklaag en de breedplaat. Het last-ervormingsgedrag van de zes proefstukken is in figuur 8 gegeven. Uit de figuur blijkt dat de proefstukken KV1 tot en met KV5 zich redelijk gelijk gedragen. Bij proefstuk KV6 kon de belasting significant hoger worden opgevoerd (als gevolg van spreiding in materiaaleigenschappen). Deze bereikte het niveau waarbij de wapening gaat vloeien. Toch is ook dit proefstuk bezweken door het bezwijken van het aansluitvlak.

Op basis van de rekenregels uit NEN-EN 1992-1-1 [11] is een gemiddelde waarde van de weerstand per proefstuk voorspeld. De verhouding tussen de voorspelling van de rekenwaarde van de opneembare schuifspanning en de gemiddelde schuifspanning in de proeven, is ordegrrootte gelijk aan die voor langsvoeegen werd gevonden. Er is ook geen significant verschil tussen de proeven met twee tralieliggers en de proeven met vier tralieliggers.

Op basis van deze waarnemingen is geconcludeerd dat de resultaten van de uitgevoerde proeven geen aanwijzing geven dat de aanwijzingen uit Stappenplan 2019 moeten worden aangepast. Hierbij moet wel de kanttekening worden geplaatst dat op basis →



8

van de proeven niet kan worden aangegeven of dit ook nog van toepassing is bij een grotere h.o.h.-afstand van de tralieliggers dan 800 mm.

### Aanpassing rekenregels in Stappenplan 2022

In het Stappenplan 2022 [4] zijn de rekenregels voor mechanisme 2 en 3 overeenkomstig de hiervoor in dit artikel aangegeven wijzigingen aangepast. Bij mechanisme 2 is de hoeveelheid aansluitvlak doorkruisende wapening begrensd en bij mechanisme 3 is het effect van de diepte van de tralieligger begrensd en is het toepassingsgebied beperkt tot  $l_{\text{eff}}$  groter dan 250 mm en het gebruik van 3D-tralieliggers. Daarnaast is bij beide de hierboven omschreven factor  $k_y$  toegevoegd.

#### Afschuiven aansluitvlak (mechanisme 2)

De maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op de schuifsterkte van het aansluitvlak volgt uit:

$$F_{R,\text{kop},a,d} = v_{Rd,i} A_{\text{eff}} \quad (3)$$

waarin:

$F_{R,\text{kop},a,d}$  is de maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op de schuifsterkte van het aansluitvlak per breedte  $b$

$$v_{Rd,i} = k_y k_1 \left[ c_{v1} \frac{\sqrt{f_{\text{ck}}}}{\gamma_c} + \rho_a f_{\text{yd}} \mu_v \right] \quad (4)$$

is de schuifsterkte van het effectieve aansluitvlak in MPa

$$A_{\text{eff}} = b l_{\text{eff}} - A_{\text{gbe}}$$

$A_{\text{gbe}}$  is het deel van het binnen  $b \cdot l_{\text{eff}}$  gelegen oppervlak waar door de aanwezigheid van gewichtsbesparende elementen de druklaag niet op de breedplaat aansluit

$k_y = 1,2$  in het geval het beschouwde gebouw is ingedeeld in CC1 of CC2, waarbij de te beoordelen vloerconstructie minimaal vijf jaar functioneert onder de betreffende gebruikscondities (het gebruik van de vloerconstructie in de aflopen minimaal vijf jaar is niet gewijzigd en verandert in de toekomst niet significant)

$k_1 = 1,0$  in de overige gevallen

$k_1 = 1,1$  voor zelfverdichtend beton

$k_1 = 1,2$  voor traditioneel beton

$c_{v1}$  is een factor afhankelijk van het wel of niet bewerkt zijn van het oppervlak van de breedplaat, volgens tabel 2

$f_{\text{ck}}$  is de kleinste waarde van de karakteristieke cilinderdruksterkte van het beton van de breedplaat en de druklaag, in MPa

$\gamma_c = 1,5$

$\rho_a = A_{\text{svd},a} / A_{\text{eff}}$

$$A_{\text{svd},a} = A_{\text{sv}} \sin \alpha \leq A_{\text{sv},a,\text{max}}$$

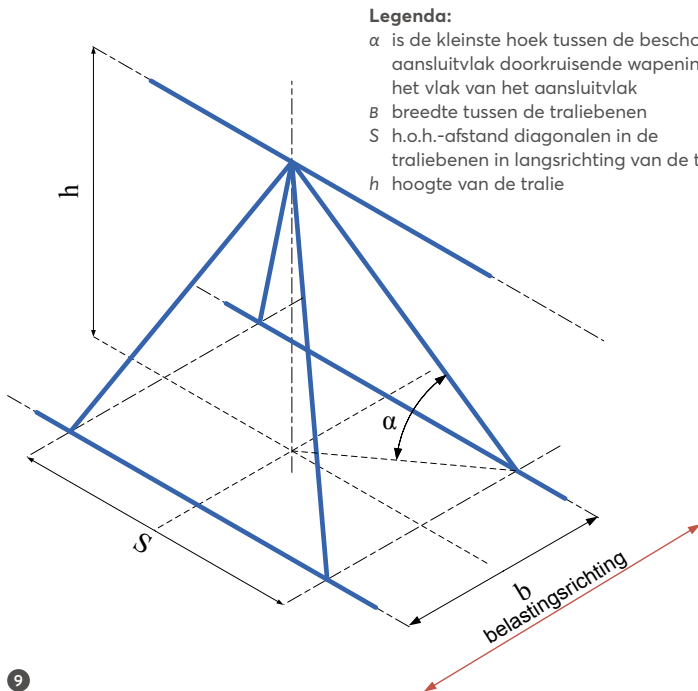
$A_{\text{sv}}$  is het oppervlak van de doorsnede van de aansluitvlak doorkruisende wapening

$\alpha$  is de kleinste hoek tussen de beschouwde aansluitvlak doorkruisende wapening en het vlak van het aansluitvlak (fig. 9)

Tabel 2 Oppervlakte ruwheid afhankelijke coëfficiënten

oppervlakteruwheid	$c_{v1}$	$\mu_v$
ruw <sup>1</sup> (bewerkt)	0,15	0,7
glad <sup>1</sup> (niet bewerkt)	0,075	0,6

<sup>1</sup> Classificaties van oppervlakken zoals gegeven in 6.2.5 (2) van NEN-EN1992-1-1+C2/A1:2015 [11]



**Legenda:**  
 $\alpha$  is de kleinste hoek tussen de beschouwde aansluitvlak doorkruisende wapening en het vlak van het aansluitvlak  
 B breedte tussen de traliebenen  
 S h.o.h.-afstand diagonalen in de traliebenen in langsrichting van de tralie  
 h hoogte van de tralie

9

$\geq 45^\circ$   
 $\leq 135^\circ$   
 $A_{sv,a,max} = 142 + 2,14 l_{eff} [mm^2/m]$  met  $l_{eff}$  in [mm]  
 $f_{yd}$  is de rekenwaarde van de vloeigrens van de aansluitvlak doorkruisende wapening, in MPa  
 $\mu_v$  is een factor afhankelijk van de ruwheid, volgens tabel 2  
 $b$  is de breedte van de beschouwde doorsnede  
 $l_{eff}$  is de grootste lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening, gezien vanaf de naad (fig. 1)

**Uittrekken van de tralieligger (mechanisme 3)**

De maximale trekkracht in de koppelwapening, gebaseerd op het uittrekken van tralieliggers met twee onderdraden en één bovendraad (3D-tralie), waarbij  $l_{eff}$  ten minste gelijk is aan 250 mm (fig. 1), volgt uit:

$$F_{R,kop,b,d} = 2 k_v f_{ctd,bp} d_t^{1,5} k_2 k_3 \quad (5)$$

waarin:

$F_{R,kop,b,d}$  is de maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger, in kN/m  
 $f_{ctd,bp}$  is de rekenwaarde van de trek-

sterkte van het beton van de breedplaat, in MPa

$d_t$  is de diepte van de onderzijde van de tralieligger ten opzichte van de bovenzijde van de breedplaat in mm (fig. 10)

$$\leq \left( \frac{350}{f_{ctd,bp}} \right)^{2/3}$$

$$k_2 = \frac{l_{eff}}{600} \leq 1,0$$

$$k_3 = \frac{56 - \emptyset_{koppel}}{40} \geq 0,9 \text{ en } \leq 1,1$$

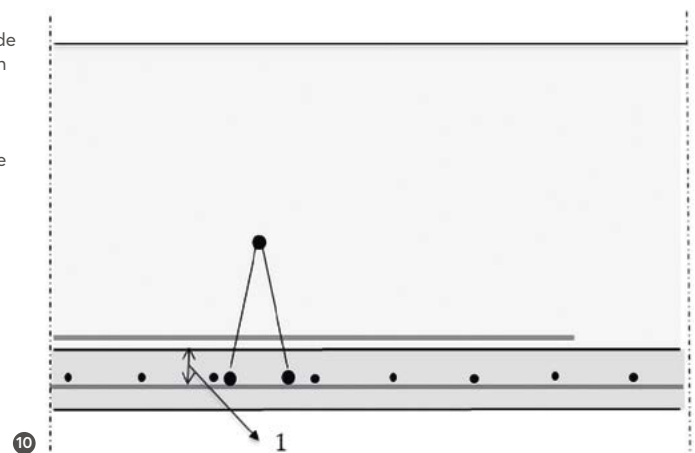
$k_v = 1,2$  in het geval het beschouwde gebouw is ingedeeld in CC1 of CC2, waarbij de te beoordelen vloerconstructie minimaal vijf jaar functioneert onder de betreffende gebruikscondities

= 1,0 in de overige gevallen

$l_{eff}$  is de grootste lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste 3D-tralieligger, in mm (fig. 1)

$\emptyset_{koppel}$  is de diameter van de koppelwapening die bepalend is voor  $l_{eff}$  in mm

De diepte van de 3D-tralieligger,  $d_t$ , mag zijn bepaald uit de dikte van de breedplaat minus de som van de toegepaste dekking aan de onderzijde van de breedplaat en de dikte van de wapening in de breedplaat waarop de tralieliggers zijn geplaatst. ●



10

**Legenda**  
 1 = diepte van de tralieligger,  $d_t$

**LITERATUUR**

- 1 Adviesbureau Hageman. (2019-01). Rapport 9780-1-0, Voorstellen voor en achtergronden bij rekenregels voor beoordeling van bestaande bouw. Rijswijk.
- 2 Adviesbureau Hageman. (2019-02). Notitie 20-5-2019 "Stappenplan beoordeling bestaande gebouwen met breedplaatvloeren". Rijswijk.
- 3 Steenbergen, R., & Vrouwenfelder, T., Update rekenregels en beoordelingsprocedure bestaande breedplaatvloeren. *Cement* 2024/4.
- 4 Stappenplan beoordeling bestaande gebouwen met breedplaatvloeren 2022. Delft: TNO / Adviesbureau ir. J.G. Hageman (incl. erratum), 2022.
- 5 Dieteren, G., Wijte, S., Vereenvoudigde beoordelingsprocedure bestaande breedplaatvloeren. *Cement* 2024/4.
- 6 TNO 2022-R10320: Bewezen sterkte breedplaatvloeren - Analyse resultaten experimentele onderzoeken. Delft: TNO / Adviesbureau Hageman, 2022.
- 7 TU/e Bouwkunde - Structures Laboratory Eindhoven. Meetrapport 4-puntsbuigproeven op breedplaatvloeren. Eindhoven: TU/e, 2021.
- 8 Wijte, S., & Dieteren, G., Rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren. *Cement* 2019/4.
- 9 Steenbergen, R., Dieteren, G., Vries, R. D., Borsje, H., Vrouwenfelder, T., & Wijte, S. TNO-2022-R10122 Probabilistische kwantificering van de veiligheid van bestaande breedplaatvloeren. Delft: TNO.
- 10 Steenbergen, R., Dieteren, G., Wijte, S., Vrouwenfelder, T., & Vries, R. d. (2022). TNO 2022 R12219 - Aanvullende achtergrondinformatie bij stappenplan beoordeling breedplaatvloeren. Delft: TNO, 2022.
- 11 NEN-EN 1992-1-1+C2/A1:2015, Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regel en regels voor gebouwen.

9 Hoek  $\alpha$  bij een 3D-tralieligger  
 10 Diepte van de tralieligger

---

# Vereenvoudigde beoordelingsprocedure bestaande breedplaatvloeren

---

## Aanvullende resultaten onderzoek korte koppelstaven en bewezen sterkte analyse constructieve veiligheid CC1 en CC2 utiliteitsgebouwen

*Naar aanleiding van onderzoek naar bestaande breedplaatvloeren, werd in 2020 door het ministerie van BZK een onderzoeksplicht afgekondigd voor breedplaatvloeren voor CC3-constructies. Om na te gaan of een uitbreiding van deze onderzoeksplicht naar CC2-constructies nodig was, is de invloed van het beschouwen van bewezen sterkte onderzocht. Op basis hiervan is door het ministerie van BZK besloten een onderzoeksplicht af te kondigen voor CC2-constructies met vloeren met een overspanning groter dan 8,5 m.*

**Zoals onder andere omschreven in het tweede artikel in deze serie [1], is in de afgelopen periode aanvullend experimenteel onderzoek uitgevoerd naar het gedrag van breedplaatvloeren.** Het ging hierbij specifiek om de krachtsoverdracht over voegen met koppelstaven met een korte doorsteek door de tralieligger (korte effectieve lengte) en kopvoegen.

Ook is gekeken of op basis van een bewezen sterkte analyse, onder bepaalde voorwaarden, de beoordeling van vloeren in CC2- (en CC1-) gebouwen kan worden vereenvoudigd. In dit artikel wordt ingegaan op enkele uitgangspunten van de uitgevoerde analyse, die nader is omschreven in het vierde deel in deze serie [2].

### Vervormingscapaciteit langsvoegen

Voor de bewezen sterkte analyse is inzicht benodigd in de vervormingscapaciteit bij statisch onbepaalde vloervelden, om te bepalen in welke mate herverdeling mogelijk is. Om dit inzicht te verkrijgen, is gebruikgemaakt van de metingen bij de in Nederland uitgevoerde proeven. In het algemeen waren de proeven opgezet zoals weergegeven in figuur 1.

Bij het bezwijken van breedplaatvloeren kan onderscheid worden gemaakt tussen de vier mechanismen zoals omschreven in [1]. Bij drie daarvan (1 t/m 3) gaat het om bezwijken van het aansluitvlak. Er is een selectie gemaakt van hiervoor representatieve proeven. Per mechanisme is gekeken naar het wel of niet aanwezig zijn van

auteur



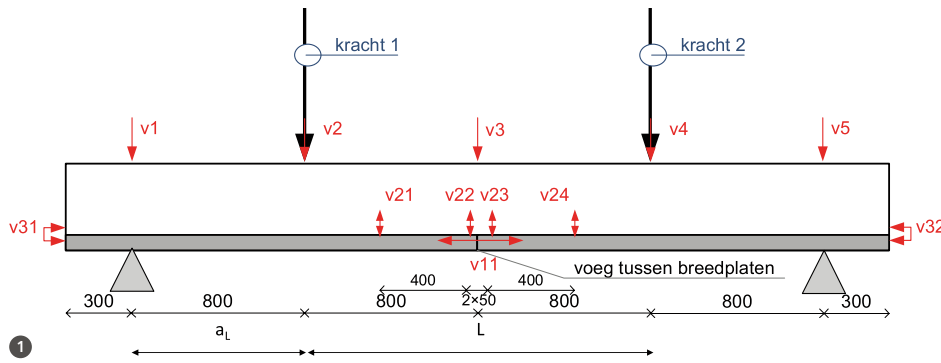
IR. GERRIE  
DIETEREN

TNO



PROF. IR. SIMON  
WIJTE

Adviesbureau  
Hageman / TU/e



vervormingscapaciteit. Voor mechanisme 1, waarbij het ongewapende aansluitvlak bezwijkt, bleek de vervormingscapaciteit dermate laag dat herverdelen hier uitgesloten is. Voor mechanismen 2 en 3, waarbij het gewapende aansluitvlak bezwijkt, is dit in detail onderzocht.

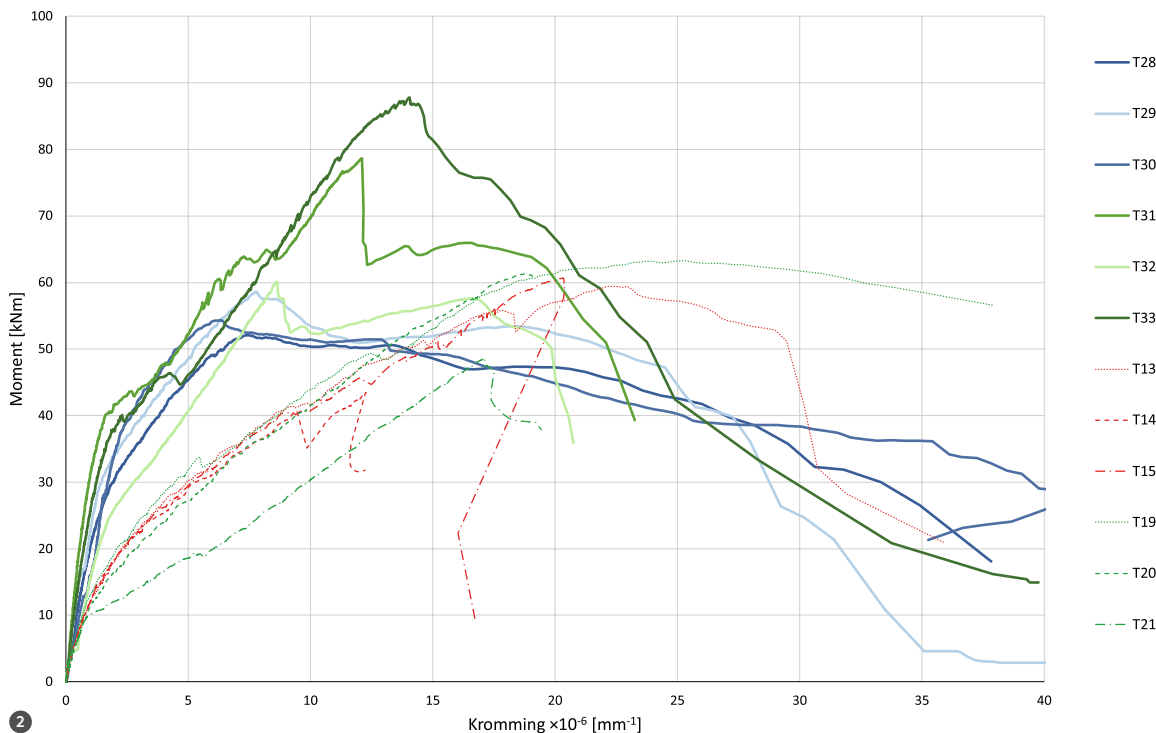
Voor het vierde mechanisme, waarbij de koppelwapening gaat vloeien, is uitgegaan van de achtergronden bij prEN1992-1-1 [3].

Na het bereiken van de momentcapaciteit voor mechanisme 3 (uittrekken tralieligger) is beperkt sprake van vervormingscapaciteit en kan enige herverdeling optreden. Deze

vervormingscapaciteit is per beschouwde proef vastgesteld aan de hand van de beschikbare metingen.

In het hiernavolgende wordt ingegaan op de vervormingscapaciteit bij mechanisme 2 (afschuiven aansluitvlak) in relatie tot die voor mechanisme 3. In figuur 2 is een overzicht gegeven van het moment-krommingsgedrag van verschillende proefstukken in traditioneel beton, met een gelijke totale hoogte van de proefstukken en een variërende lengte van de koppelstaven en dus  $l_{eff}$ .

Bij de proefstukken T19, T20 en T21 was de druksterkte van het beton van de



1 Proefopstelling met overzicht toegepaste metingen

2 Moment-krommingsgedrag voor verschillende proefstukken Hageman [5]

## Voor de bewezen sterkte analyse wordt rekening gehouden met de herverdelingsmogelijkheden in een breedplaatvloer

druklaag meer dan 50% lager dan bij de overige proefstukken waardoor de weerstand lager is.

Bij de proefstukken die in figuur 2 zijn weergegeven met een dikke doorgaande lijn, was mechanisme 2 bepalend en is in de regel na het bereiken van de top een terugval van het weerstandsniveau zichtbaar naar een niveau dat overeenkomt met het niveau horende bij mechanisme 3. Bij de dunne gestippelde lijnen was mechanisme 3 bepalend.

In de figuur is te zien dat als mechanisme 2 bepalend blijkt te zijn, het gedrag in het begin van de proef stijver is dan de proefstukken waarbij mechanisme 3 bepalend is. Wat echter ook te zien is, is dat als mechanisme 2 bepalend is, na het bereiken van de maximale belasting de totale vervormingscapaciteit in het algemeen kleiner is dan bij de proefstukken waar mechanisme 3 bepalend was.

De ductiliteit van de voeg tussen de breedplaten wordt in de probabilistische analyse [2,4] in rekening gebracht door middel van parameter  $\mu$ . Deze parameter beschrijft de verhouding tussen de maximaal toelaatbare kromming en de kromming waarbij het lineair-elastisch gedrag overgaat naar plastisch gedrag. Het punt waarbij dit gebeurt, is bepaald door een schematisering toe te passen. Per proef is een bi-lineaire beschrijving gefit aan het testresultaat. Echter, in de grenstoestandsfuncties van de voeg tussen de breedplaatvloeren zijn alleen de momenten- en rotatiecapaciteit opgenomen – in lijn met de simpelere elasto-plastische beschrijving (fig. 3).

Er moet dus een vertaling plaatsvinden van de bi-lineaire beschrijving zoals gebruikt in [5], naar een elasto-plastische beschrijving aansluitend op de grenstoestandsfuncties. Er

is hierbij gekozen om de initiële stijfheid ( $EI$ ) te behouden en deze eerste tak vervolgens door te trekken tot de momentcapaciteit wordt bereikt. Dit omdat het bij het gedrag van de breedplaten niet zozeer gaat om de energie-equivalentie (bij cyclisch belasten), maar om de uiterste vervormingscapaciteit. De nieuw verkregen 'yield' kromming volgt dan uit:

$$\kappa_y = \frac{M_2}{EI} = \frac{M_2}{M_1/\kappa_1} \quad (1)$$

De uiterste kromming en momentcapaciteit worden direct overgenomen ( $\kappa_u = \kappa_2$  en  $M = M_2$ ). De bij deze schematisering passende ductiliteit is:

$$\mu = \kappa_u / \kappa_y \quad (2)$$

De ductiliteit mag niet kleiner zijn dan 1. Er is zodoende gekozen om  $\mu - 1$  als stochastische parameter op te nemen met een log-normale verdeling. Na het voor iedere elasto-plastische curve bepalen van deze waarde (via  $\kappa_u / \kappa_y - 1$ ), is vervolgens een gemiddelde waarde en de variatiecoëfficiënt berekend.

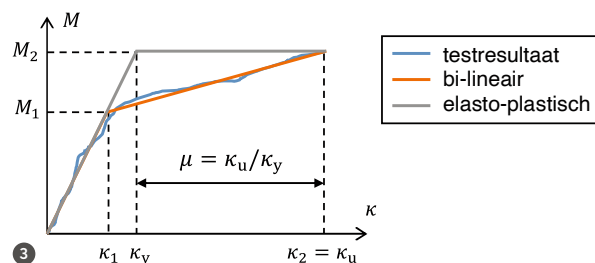
Voor de vervormingscapaciteit van mechanisme 4 (vloeien wapening) is gebruikgemaakt van de achtergronddocumenten bij de nieuwe Eurocode prEN1992-1-1 [3]. Op basis van [5] en deze achtergronden volgen per mechanisme de in tabel 1 gegeven waarden.

### Vloertypologieën voor subpopulaties

Voor de probabilistische beschouwing is gekeken naar een aantal subpopulaties aan toegepaste breedplaatvloeren. Hierbij werd beoogd om het gros van de CC2-gebouwen die moet worden beschouwd, af te dekken. Naast verschillende afmetingen van de overspanning en de beoogde toepassing van de vloer, was het voegdetaal hierbij onderscheidend.

Belangrijke eigenschappen van het voegdetaal voor het onderscheiden van subpopulaties zijn:

- wel of niet doorlopen van de koppelwapening tot voorbij de eerste tralieligger;
- nabewerking van het breedplaatoppervlak;



**Tabel 1** Invoerparameters op basis van elasto-plastisch gedrag

mechanisme	gemiddelde $\mu - 1$	variatiecoëfficiënt
2 afschuiving	$2,15 \cdot 10^{-3}$	0,51
3 uittrekken tralieligger	$2,17 \cdot 10^{-3}$	0,48
4 vloeien van de wapening	$4,18 \cdot 10^{-3}$	0,381

wel of niet nabewerkt, dit is van invloed op de weerstand bij mechanisme 1 en 2;  
 → betonsoort breedplaat: traditioneel of zelfverdichtend.

De beschouwde gevallen zijn tevens gebaseerd op veel voorkomende overspanningen in gebouwen (5,4 m / 7,2 m en 10 m), met daarvoor gekozen een ontwerp gebaseerd op volgende aannamen:

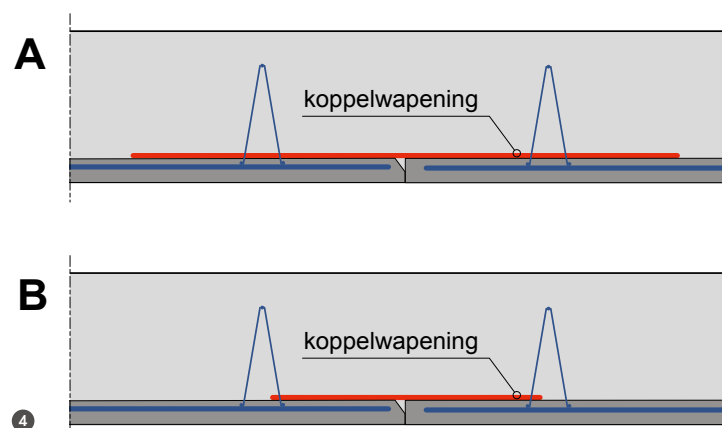
- hoogte vloer 1/25 – 1/30 van de overspanning;
- koppelwapening geoptimaliseerd op h.o.h.-afstand orde grootte 150 mm;
- lengte koppelwapening gebaseerd op standaard ontwerpeisen zoals van toepassing tijdens de bouw;
- plaatsing eerste tralie op 400 mm vanaf de rand;
- traditioneel beton zonder gewichtsbesparende elementen met nabewerking;
- zelfverdichtend beton met gewichtsbesparende elementen zonder nabewerking.

Daarnaast zijn er variaties op deze ‘standaardgevallen’ gedefinieerd om het effect hiervan na te gaan voor vanuit de praktijk bekende afwijkingen (zie [4]).

Bij in het verleden gerealiseerde breedplaatvloeren zijn er wat betreft de plaatsing

van de koppelwapening ten opzichte van de aansluitvlak doorkruisende wapening twee situaties te onderscheiden. Dit zijn detailleringwijze A, waarbij de koppelwapening doorloopt tot voorbij het hart van de tralieligger, en detailleringwijze B, waarbij de koppelwapening niet voorbij het hart van de tralieligger is doorgezet (fig. 4). Detailleringwijze B kon ontstaan omdat in het ontwerp de lengte van de koppelstaven was gekoppeld aan eisen voor overlapping van wapening zonder rekening te houden met de plaatsing van de tralieliggers. In [4] is aangegeven dat de ontwikkelde rekenregels en beschouwingen niet geschikt zijn voor vloeren met detailleringwijze B en dat deze vloeren een specifieke beoordeling vereisen.

Op basis van info vanuit producenten is geconcludeerd dat voor vloeren met gewichtsbesparende elementen er nagenoeg altijd is uitgegaan van zelfverdichtend beton (ZVB) en er geen nabehandeling van het oppervlak plaatsvond. De reductie door gewichtsbesparende elementen bedroeg 22% – 30%. Alle vloeren zijn beschouwd als kantoorroimte met uitzondering van een vloer met 15 m overspanning. Deze stramienmaat is als parkeerdek beschouwd. Voor de vloer met 7,2 m overspanning is in een tweetal gevallen uitgegaan van detailleringwijze B (1x ZVB en →





# Het resultaat van de bewezen sterkte analyse is als 3e toets opgenomen in het Stappenplan 2022

ix traditioneel beton). Alle andere gevallen betroffen detailleringwijze A. Het totaal resulteerde in twaalf vloertypologieën. Voor de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat is uitgegaan van  $d_1 = 25$  mm.

Daarnaast is aanvullend een gevoeligheidsstudie uitgevoerd, waarbij onder andere is gekeken naar:

- afwijkende vloerbelastingen;
- ductiliteit van de voegdetaillering (parameter waarden eenmaal significant verhoogd en verlaagd);
- het effect van statisch bepaalde vloervelden;
- voorkomen van meerdere kritische naden in een overspanning;
- de invloed van niet nabewerken van traditioneel beton (effect in twee cases onderzocht);
- de mate van herverdeling naar steunpunten;
- de diameter van de tralieligger;
- het effect van toepassing 2D-tralieliggers (weerstandmodel uittrekken tralieligger - mechanisme 3; aangenomen als 0).

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn meegenomen in het opstellen van de voorwaarden voor toepassing van de 3e toets in het Stappenplan 2022 [7]. Met deze toets kan op basis van een beperkt aantal gegevens relatief eenvoudig worden beoordeeld of de beschouwde vloer voldoet aan de geldende eisen voor betrouwbaarheid.

Bij de evaluatie van de resultaten van de probabilistische analyses is enerzijds gekeken welke vloeren qua betrouwbaarheid wel of niet voldoen aan het wettelijk minimum voor bestaande bouw (afkeurniveau NEN 8700, CC2). Dit wettelijk minimum geeft aan wanneer er directe maatregelen (gebruiksbeperking of versterking) nodig zijn omdat de veiligheid in het geding is. Anderzijds is ook gekeken welke vloeren wel of niet voldoen aan de eisen op het gebied van lange termijn instandhouding, robuustheid en faalgedrag. Deze eisen zijn niet direct gekoppeld aan een wettelijke betrouwbaarheidseis, maar zijn gewenst bij een juist en gangbaar constructief ontwerp en verantwoord beheer van de constructie.

Deze combinatie heeft geleid tot de in de 3e toets gegeven voorwaarden waarop er kan worden afgezien van een nadere beoordeling. Enkele van de belangrijke criteria voor deze 3e toets zullen hierna kort nader worden toegelicht.

## Vereenvoudigde procedure voor CC2

Bij de uitbreiding van de onderzoeksplicht voor breedplaatvloeren naar vloeren in gebouwen die volgens NEN 8700 vallen in CC2, neemt het aantal te beschouwen gebouwen en daarmee de benodigde inspanning enorm toe. Daarom is er gezocht naar een vereenvoudigde beoordelingsmethodiek waarbij op basis van enkele voorwaarden kan worden afgezien van een nadere uitgebreide beoordeling van de langsvoegen in een breedplaatvloerconstructie. Deze methodiek is gebaseerd op een bewezen sterkte analyse [2]. Het resultaat hiervan is als 3e toets in het Stappenplan 2022 [7] ingevoegd (fig. 5).

Met deze methodiek is dus beoogd om voor een groot deel van de te beschouwen vloeren te voorkomen dat een nadere analyse noodzakelijk is om de beoogde constructieve veiligheid aan te tonen. Dit kan resulteren in de conclusie dat voor een geheel bouwwerk geen nadere analyse nodig is, maar kan ook betekenen dat voor een beperkt aantal delen van een bouwwerk geen nadere beoordeling nodig is. De vereenvoudigde procedure is alleen van toepassing bij gebouwen die mogen worden ingedeeld in CC2 of CC1. Dit betekent dat constructies die in het verleden volgens NEN 6702 werden ingedeeld in veiligheidsklasse 3 alleen hiermee beschouwd mogen worden als deze volgens NEN 8700 vallen onder CC2.

Voor de eerste twee eisen, statisch onbepaalde constructies en detailleringwijze A, is hierna kort aangegeven waarom dit als voorwaarde is opgenomen. Voor de overige voorwaarden geldt:

- In de meeste breedplaatvloeren zijn 3D-tralieliggers toegepast. Deze zijn daarom ook in de bewezen sterkte analyse aangehouden, waardoor de rekenregels voor mechanisme 3 (uittrekken tralieligger) van

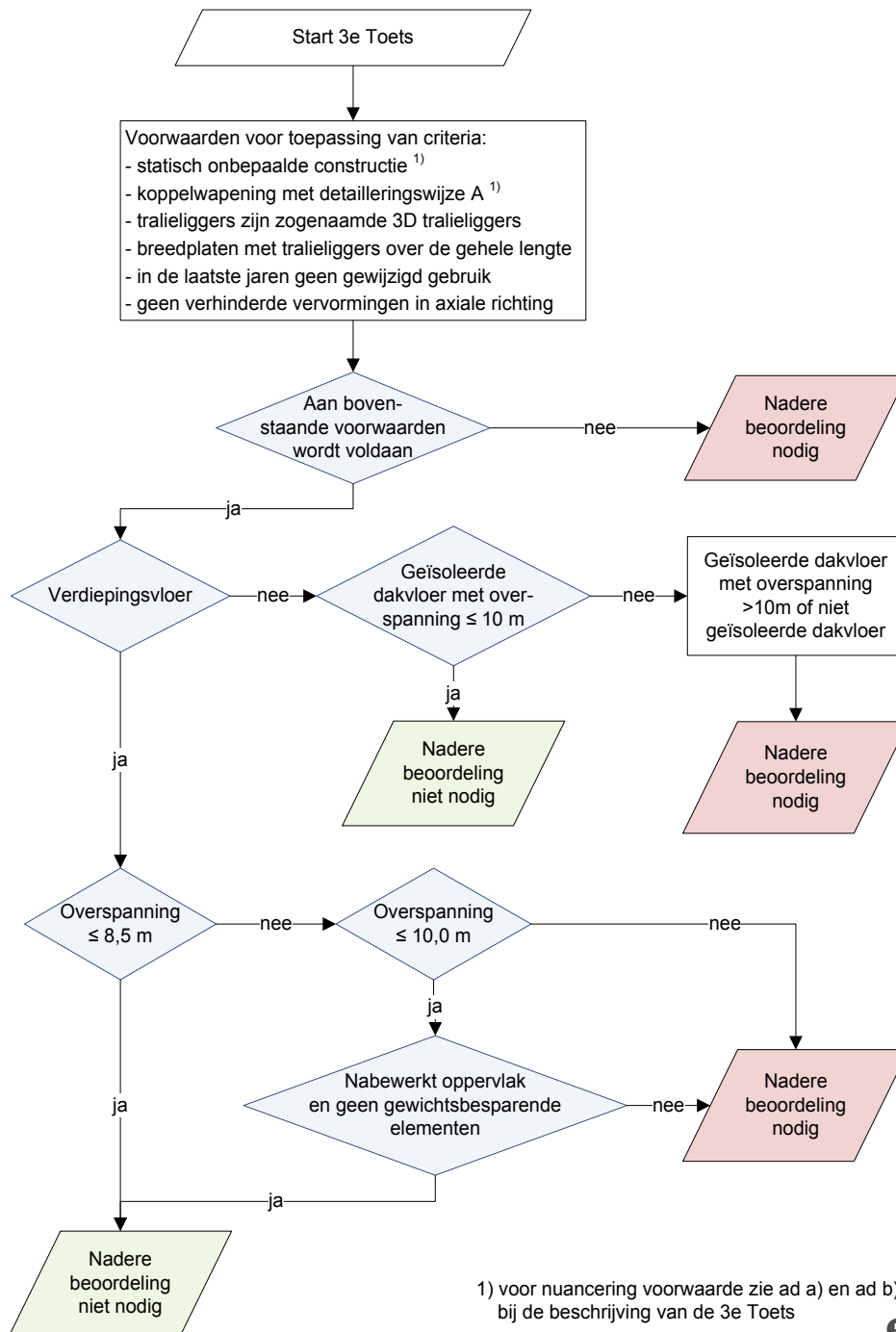
toepassing waren. Zoals in het tweede artikel van deze serie [1] aangegeven, is dit niet het geval bij 2D-tralieliggers.

→ Als tralieliggers niet over de volledige lengte van de breedplaat doorlopen, is er over een deel sprake van detailleringwijze B en is toepassing daarom uitgesloten. Dit kan met name het geval zijn bij voorgespannen breedplaten.

→ Als uitgangspunt van het onderzoek is aangenomen dat het gebruik in de afgelopen vijf jaar niet is gewijzigd. Dit is daarom een voorwaarde voor het toepassen van de 3e toets.

→ Indien er sprake is van een significante belemmering van de axiale vervorming in eindvelden in de richting haaks op de vloerrand, zal de capaciteit van het kritische detail fors beperkt kunnen zijn. →

*In de 3e toets zijn voorwaarden gegeven waarop er kan worden afgezien van een nadere beoordeling*



## LITERATUUR

- 1 Dieteren, G., Wijte, S., Update rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren. *Cement* 2024/4.
- 2 Steenbergen, R., Vrouwenvelder, T., Vries, R. de, Veiligheid bestaande breedplaatvloeren op basis van track record. *Cement* 2024/4.
- 3 CEN TC250 SC2, Background document for FprEN 1992-1-1:2023-04 (CEN/TC250/SC2 N2087). CEN, 2023..
- 4 Steenbergen, R., Dieteren, G., Vries, R. d., Borsje, H., Vrouwenvelder, T., & Wijte, S., TNO-2022-R10122 Probabilistische kwantificering van de veiligheid van bestaande breedplaatvloeren. Delft: TNO, 2022.
- 5 TNO 2022-R10320: Bewezen sterke breedplaatvloeren - Analyse resultaten experimentele onderzoeken. Delft: TNO / Adviesbureau Hageman, 2022.
- 6 Notitie 20-5-2019 Stappenplan beoordeling bestaande gebouwen met breedplaatvloeren. Rijswijk: Adviesbureau Hageman, februari 2019.
- 7 Stappenplan beoordeling bestaande gebouwen met breedplaatvloeren 2022. Delft: TNO / Adviesbureau ir. J.G. Hageman, 2022.

Het onderscheid tussen verdiepingsvloeren en geïsoleerde dakvloeren, en de wijze van nabewerken voor verdiepingsvloeren is in de toets opgenomen, omdat uit de bewezen sterkte analyse volgde dat - afhankelijk van deze vloerparameters - een optimalisatie naar de gegeven overspanningen gegeven kon worden. Zonder dit zou de toepassing tot vloeren van 8,5 m overspanning beperkt zijn.

**Statisch systeem** De probabilistische analyse houdt rekening met de mogelijke herverdeling van krachten in de constructie. Bij een vloerveld dat als statisch bepaalde constructie moet worden beschouwd, zal er geen sprake zijn van waarschuwend gedrag door het ontbreken van een herverdelingsmogelijkheid. Voorwaarde voor statisch bepaalde velden is dan ook dat kan worden aangetoond dat de koppelwapening met voldoende betrouwbaarheid kan worden belast tot vloeren. Dit moet per geval worden beoordeeld, waardoor statisch bepaalde velden uitgesloten zijn van de vereenvoudigde toets.

**Detaileringswijze van de koppelwapening bij langснаad** Bij detaileringswijze B is sprake van geen of een zeer beperkte vervormingscapaciteit van de voeg, een onwenselijke situatie qua constructief gedrag. Voor het ontwerp van een nieuwe constructie is dit daarom niet toegestaan. Voor de beoordeling van een bestaande constructie is in [4] voor detaileringswijze B uitgegaan van alleen optreden van faalmechanisme 'bezwijken ongewapend aansluitvlak op aanhechting'. Hiermee is er dus uitgegaan van een bros faalmechanisme en is ook de mogelijkheid tot herverdeling zeer beperkt, daar de rotatiecapaciteit lager werd aangehouden. Daarom is in [4] geadviseerd om vloerconstructies waarin detaileringswijze B voorkomt niet volgens de vereenvoudigde aanpak te beoordelen. Dit omdat er sprake is van een bros bezwijkgedrag. Eventuele consequenties van het bezwijken van een specifieke naad zullen daarom minimaal moeten worden onderzocht. Aanvullend wordt opgemerkt dat in het stappenplan

ook rekenregels voor het bepalen van de weerstand van de koppelwapening voor detaileringswijze B ontbreken.

**Luchtkanalen** Vooral in de laatste jaren zijn regelmatig relatief grote luchtkanalen in breedplaatvloeren opgenomen. Toepassen van deze kanalen in de zone waar de koppelwapening achter de tralieligger is verankerd, kan een significante invloed hebben op de weerstand van het detail. Deze situaties zijn niet beschouwd in het voorgaande. De rekenregels voor de weerstand van het detail en de vereenvoudigde toets zijn in dat geval dan ook niet zonder meer toepasbaar.

## Tot slot

Door het invoeren van de vereenvoudigde procedure als 3e toets in het Stappenplan 2022, is beoogd de benodigde inspanning om de constructieve veiligheid van een bestaande CC2- of CC1-gebouw, met breedplaatvloeren die een positief moment moeten overdragen, in veel gevallen te beperken. Met dit artikel en het vierde artikel in deze reeks [4] wordt de gebruiker van het Stappenplan 2022 meer inzicht gegeven in de achterliggende berekeningen en gemaakte afwegingen.

Om de inspanningen die volgen uit de onderzoeksplicht te beperken, heeft het ministerie van BZK besloten de onderzoeksplicht te beperken tot vloeren met een overspanning groter dan 8,5 m en/of met niet-geïsoleerde daken uitgevoerd met breedplaten (vooral parkeergarages). Uit de 3e toets blijkt dat niet zonder meer alle vloeren uit CC2-constructies met een overspanning kleiner dan 8,5 m voldoen aan de eisen voor bestaand bouw. In welke mate bij een onderzoek door de onderzoekers toch wordt gekeken naar vloeren met een overspanning kleiner dan 8,5 m, is een keuze en verantwoordelijkheid van de betreffende onderzoeker. De 3e toets kan hierbij helpen om een verantwoorde keuze te maken. ●

# 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.

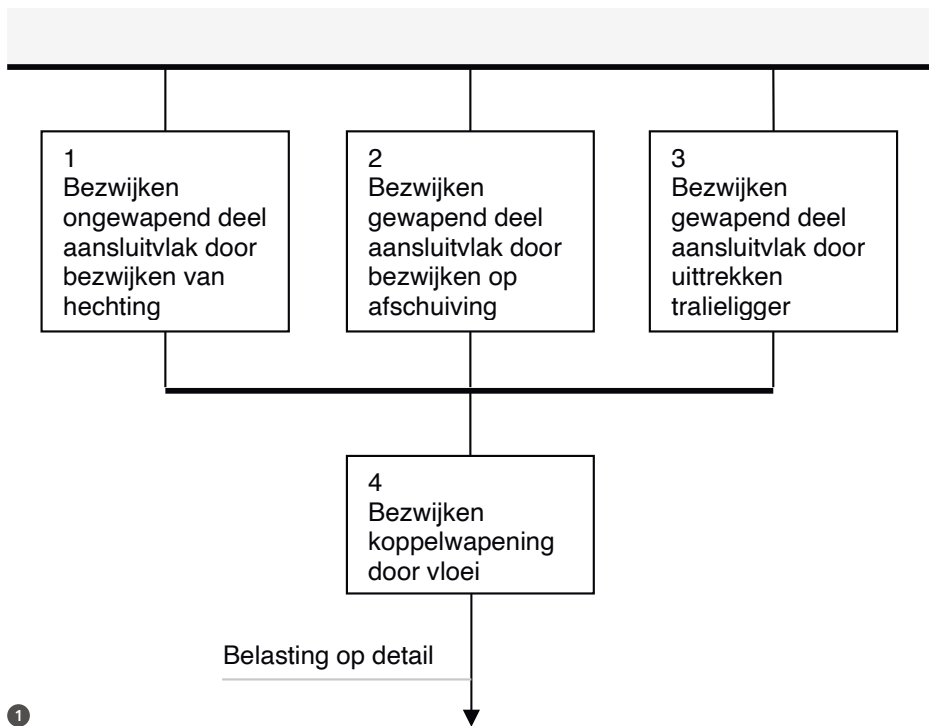
→ Informatie uit een 'mega-experiment' van een groot aantal gebouwen, schaal 1 op 1, in Nederland. Van één van deze gebouwen is een vloer ingestort bij een bepaalde belasting (dakvloer Eindhoven Airport) en bij andere gebouwen hebben de bestaande vloeren een bepaalde (zekere of onzekere) belasting overleefd. 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:

$$P(F) = P(g < 0) \quad (1)$$

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:

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

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  $\theta_r$  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  $|$ -teken in het onderstaande moet weer worden gelezen als 'gegeven' of 'onder de conditie dat' en het  $\cap$ -teken als 'en',  $T$  staat voor belasting door temperatuur):

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

## 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.

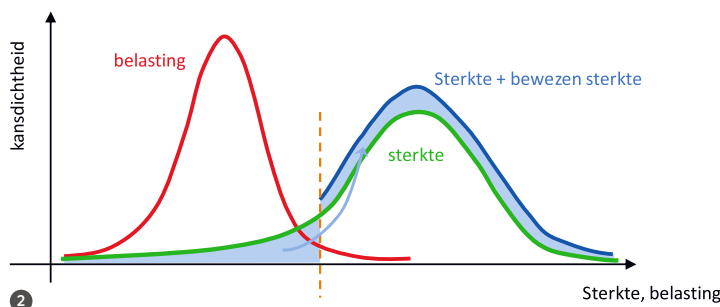
Gegeven de faalkans, is de betrouwbaarheidsindex te vinden via de tabel voor de normale verdeling. Hoe meer gebouwen die goed presteren, hoe hoger de betrouwbaarheid.

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.

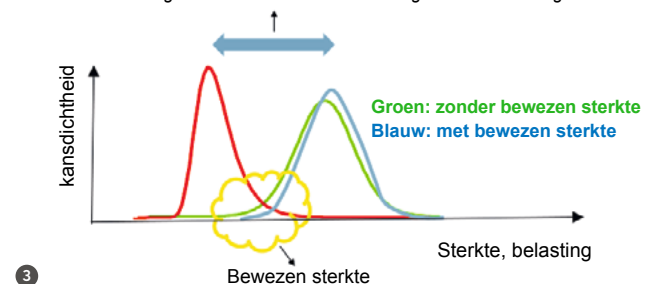
Voor hetzelfde type vloer, maar kijkend naar de periode 5-20 jaar (dus onder voorwaarde dat de beschouwde vloer niet heeft gefaald in de eerste 5 jaar), wordt de kans bepaald als:

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

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.

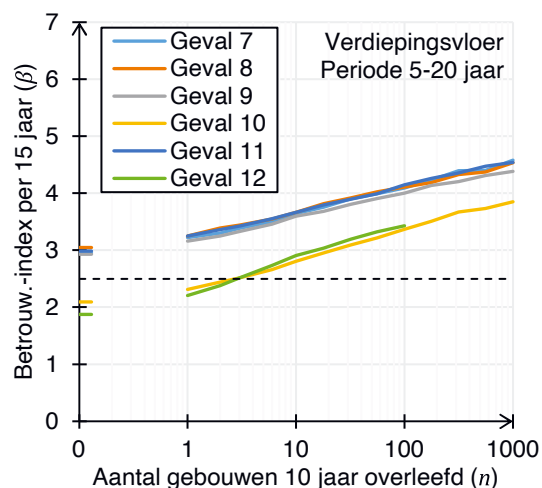
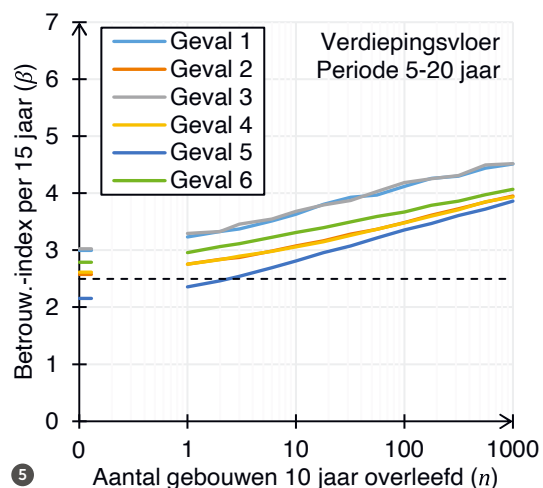
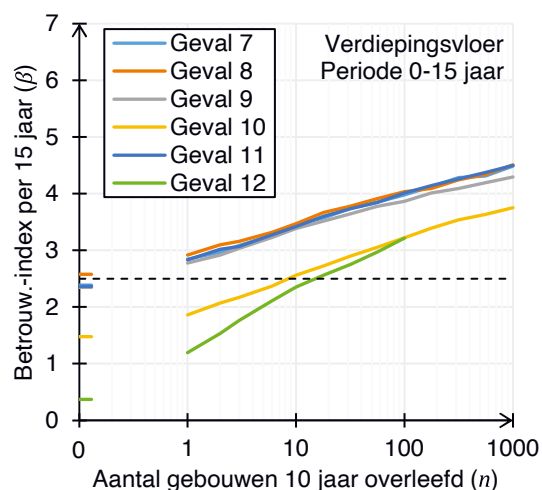
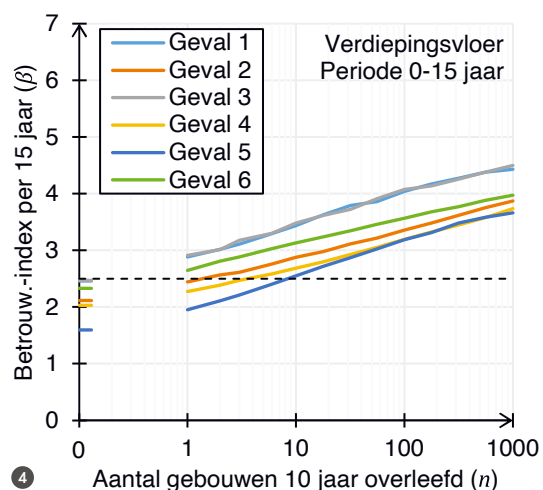
## Berekeningsuitkomsten

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  $\beta$ -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  $\beta$ -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.