

**Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.****Buildings, Infrastructure &
Maritime**Stieltjesweg 1
2628 CK Delft
Postbus 155
2600 AD Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 20 00

TNO-rapport**TNO 2022 R10320 | Eindrapport****Bewezen sterkte breedplaatvloeren****Analyse resultaten experimentele
onderzoeken**

Datum	11 april 2022
Auteur(s)	Ir. G.G.A. Dieteren (TNO) Prof.Ir. S.N.M. Wijte (Adviesbureau Hageman)
Exemplaarnummer	
Oplage	
Aantal pagina's	74 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties
Projectnaam	Onderzoek bewezen sterkte breedplaatvloeren
Projectnummer	060.44415

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2022 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
1.1	Opdracht	3
1.2	Korte inleiding onderzoek	3
1.3	Doel van de uitgevoerde analyses	4
1.4	Leeswijzer	4
2	T- en R-proefstukken met variërende effectieve lengten.....	5
2.1	Inleiding.....	5
2.2	Bepaling van de kracht in en de weerstand van de koppelwapening	5
2.3	Eerste vergelijking proeven met faalmechanisme 2 en 3	7
2.4	Eerste observaties bij aanvullende proeven	10
2.5	Aanpassing mechanisme 3.....	13
2.6	Toepassing faalmechanisme 2 bij kleine waarden van l_{eff}	14
3	T-proefstukken met niet door de tralieligger stekende koppelstaven.....	16
3.1	Afleiding vergelijking voor mechanisme 1 – Aanhechting	16
3.2	Vergelijking met proeven	18
3.3	Toepassing faalmechanisme 1 bij beoordeling bestaande breedplaatvloeren	20
4	Vergelijking weerstand verschillende mechanismen	21
5	Bilinearisatie moment-krommingsrelaties	25
5.1	Inleiding.....	25
5.2	Moment-krommingsrelaties faalmechanisme 3	26
5.3	Moment-krommingsrelaties faalmechanisme 2	37
6	Kopvoeg-proefstukken.....	41
6.1	Algemeen	41
6.2	Samenvatting en uitwerking proefresultaten.....	42
7	Korte beschouwing proeven KU Leuven.....	45
7.1	Inleiding.....	45
7.2	Belgische experimentele resultaten	45
7.3	Conclusie	47
8	Bibliografie	48
9	Ondertekening.....	49
	Bijlage(n)	
	A Uitwerking proefstuk T28	
	B Uitwerking proefstuk KV2	
	C Samenvatting variabelen experimenten	
	D Grafische fit moment-krommingsgedrag proefstukken faalmechanisme 3	

1 Inleiding

1.1 Opdracht

Door TNO en Hageman wordt samengewerkt bij het project 'Bewezen sterkte van bestaande breedplaatvloeren'. In het voorliggende rapport wordt als deel van dat onderzoek een analyse uitgevoerd van de resultaten verkregen uit het experimentele onderzoek dat in het kader van het TNO onderzoek is uitgevoerd op de TU/e [1] en de resultaten van reeds eerder in [2] beschreven, bekende experimenten.

1.2 Korte inleiding onderzoek

Zoals ook in [2] aangegeven trad in de experimenten twee soorten bezwijken op: het vloeien van de koppelwapening werd bereikt of het aansluitvlak tussen de breedplaten en de druklaag bezwijkt alvorens vloeien van de koppelwapening kan optreden. Voor het bezwijken van het aansluitvlak kan onderscheid worden gemaakt in de volgende faalmechanismen:

1. Bezwijken ongewapend aansluitingsvlak op aanhechting;
2. Bezwijken gewapend aansluitingsvlak op afschuiving;
3. Bezwijken gewapend aansluitvlak door uittrekken van de tralieligger.

Hierbij geldt dat voor faalmechanisme 2 en 3 de koppelwapening moet doorsteken tot achter de tralieligger voordat van een gewapend aansluitvlak kan worden gesproken. Voor faalmechanisme 1 geldt dat tijdens opvoeren van de belasting op een proefstuk/constructie met een ongewapend aansluitvlak dit mechanisme meestal maatgevend is. In geval van een gewapend aansluitvlak, waarbij de koppelwapening doorsteekt tot achter de tralieligger, is faalmechanisme 1 in het algemeen niet het maatgevende mechanisme.

Afhankelijk van de effectieve lengte van de koppelstaven achter de tralieligger c.q. de positie van de tralie en de ruwheid van het aansluitvlak zijn dus vier bezwijkvormen (inclusief vloeien van de wapening) mogelijk.

In de uitwerking van de beschouwde proeven zal een analyse voor de verschillende waargenomen faalmechanismen uitgevoerd worden.

Bij de in [2] beschouwde proeven was er altijd sprake van koppelwapening die minimaal 300 mm doorliep tot voorbij de tralieligger. Faalmechanisme 1 is zodoende niet als maatgevend mechanisme waargenomen in de toen beschouwde proeven. Tevens is in [2] 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 in [1] gerapporteerde onderzoek de koppelwapening stopt ter hoogte van het hart van de tralieligger of beperkt (maximaal 200 mm) doorliep tot voorbij het hart van de tralieligger.

1.3 Doel van de uitgevoerde analyses

Bij de analyse worden in eerste instantie de resultaten van de experimenten vergeleken met de in [2] beschreven mechanismen voor het afschuiven van het aansluitvlak en het uittrekken van de tralieligger, aangevuld met een additioneel mechanisme welke met name maatgevend kan zijn bij breedplaatvloeren met koppelwapening welke stopt voor of maximaal doorloopt tot het hart van de tralieliggers. Aanvullend wordt ingegaan op het moment-krommingsgedrag dat bij de in [2] beschreven faalmechanismen is bepaald en dat als een gegeven bij de beoordeling van bestaande breedplaatvloeren op basis van bewezen sterkte is gebruikt.

Tot slot worden resultaten van experimenten op kopvoegen en een vergelijking tussen experimentele resultaten in België en Nederland beschreven.

1.4 Leeswijzer

In dit rapport is allereerst in hoofdstuk 2 gekeken naar de eerder in [2] beschouwde faalmechanismen 2 en 3. Daarna is in hoofdstuk 3 een analyse uitgevoerd om faalmechanisme 1 op basis van een beperkte proevenserie met een model te kunnen beschrijven. In hoofdstuk 4 zijn de drie beschreven faalmechanismen en het mechanisme vloeit van de koppelwapening, voor verschillende variabelen, kwantitatief met elkaar vergeleken. De beschouwing van het moment-krommingsgedrag van de proefstukken waarbij het falen bepaald is door mechanisme 2 dan wel mechanisme 3 is opgenomen in hoofdstuk 5. Hierbij is het moment-krommingsgedrag uitgewerkt tot gebilineariseerde relaties.

Naast de langsvoegen (tralies evenwijdig aan de naad) kunnen er ook positieve momenten optreden bij zogenaamde kopvoegen, hierbij zijn de tralies loodrecht op de naad tussen de breedplaten geplaatst. In paragraaf 6.3 van [2] is hiervoor een verwijzing naar de rekenregels in NEN-EN 1992-1-1 voor aansluitvlakken gegeven. Er resteerde hierbij een discussie over de invloed van de afstand tussen de tralieliggers. Dit is in [1] onderzocht door een variatie in deze tralieliggers toe te passen. De resultaten van dit onderzoek zijn in hoofdstuk 6 besproken.

Tot slot wordt in hoofdstuk 7 een korte beschouwing gegeven van de verschillen en overeenkomsten tussen het onderzoek dat in België op de KU Leuven is uitgevoerd en het in Nederland uitgevoerde onderzoek.

2 T- en R-proefstukken met variërende effectieve lengten

2.1 Inleiding

De resultaten van de T- en R- proefstukken¹ waarbij de koppelwapening doorsteekt tot achter de tralieliggers zijn geanalyseerd op een wijze zoals ook in [2] is gedaan. Voor proefstuk T28 is dit uitgebreid beschreven in bijlage A van dit rapport.

Hierna is allereerst in 2.2 aangegeven hoe de kracht in en de weerstand van de koppelwapening is bepaald. Vervolgens is in 2.3 een eerste vergelijking met de in [2] afgeleide modellen uitgevoerd met een nadruk op een eventuele invloed van de kortere lengte van de koppelstaven. De in 2.4 gepresenteerde evaluatie maakte duidelijk dat voor faalmechanisme 3 er een aanpassing benodigd was welke in 2.5 is gegeven. Tenslotte is in 2.6 gekeken naar de waargenomen vervormingscapaciteit in de proefstukken, een parameter welke met name benodigd is voor de bewezen sterkte analyse van breedplaatvloeren.

2.2 Bepaling van de kracht in en de weerstand van de koppelwapening

Bij de analyse is eerst de krachtsverdeling in het proefstuk bepaald ten gevolge van het eigen gewicht en de maximale belasting in de vijzels. Hieruit volgt het maximale moment in de doorsnede ter plaatse van de voeg tussen de twee breedplaten. Vervolgens is de weerstand van deze doorsnede bepaald op basis van vloeigrens in de koppelwapening. Daarbij is voorsnog uitgegaan van een gemiddelde waarde van de vloeigrens van 560 MPa.

De kracht in de koppelwapening op het moment van de maximale belasting is bepaald uit de volgende vergelijking:

$$F_{\text{kop,max}} = \frac{M_{\text{proef}}}{M_{\text{Rm}}} A_{\text{s,kop}} f_{\text{ym}} \quad (1)$$

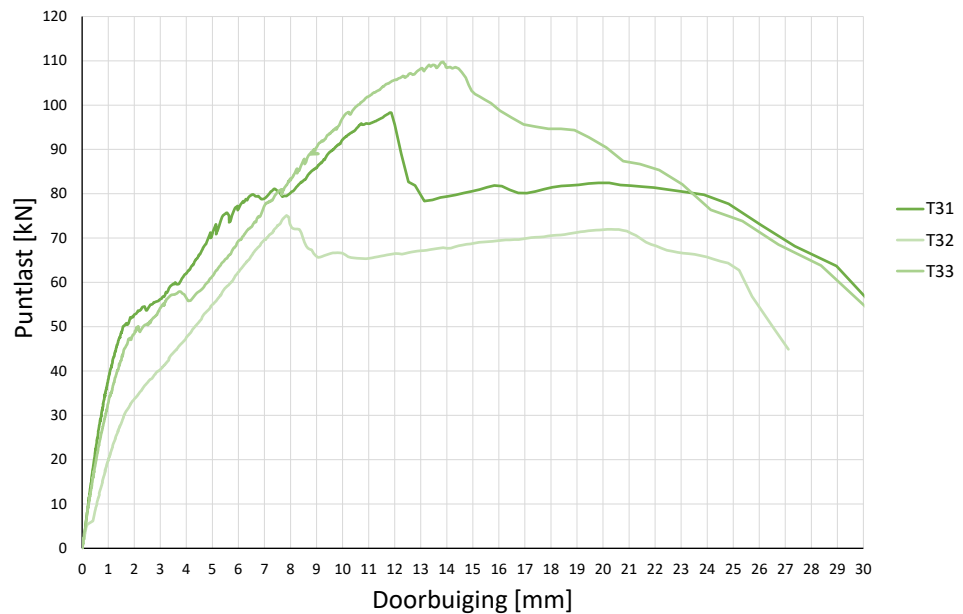
waarin:

- $F_{\text{kop,max}}$ is de maximale kracht in de koppelwapening;
- M_{proef} is het maximale moment in het proefstuk ter plaatse van de doorsnede bij de voeg;
- M_{Rm} is de gemiddelde waarde van de momentweerstand van de doorsnede;
- $A_{\text{s,kop}}$ is het oppervlak van de doorsnede van de koppelwapening in het proefstuk;
- f_{ym} is de gemiddelde waarde van de vloeigrens van de koppelwapening.

Opgemerkt wordt dat de aanname over de gemiddelde waarde van de vloeigrens slechts een zeer beperkte invloed heeft op het resultaat van deze berekening omdat de vloeigrens bij de beschouwde wapeningsverhoudingen ook een nagevoeg evenredige invloed heeft op de grootte van M_{Rm} .

¹ Een toelichting over uitgevoerde proeven en gehanteerde proefstukken is opgenomen in paragraaf 5.2.1.

Een deel van de proeven laat bij het bezwijken twee niveaus zien, zie Figuur 2.1. Nadat de maximale weerstand wordt bereikt valt, zoals bij een bros bezwijkgedrag optreedt, de weerstand snel terug. Daarna wordt een tweede niveau gevonden dat enigszins constant blijft bij een toenemende vervorming totdat daadwerkelijk bezwijken optreedt.



Figuur 2.1 : Last-vervormingsgedrag proefstukken T31 t/m T33

Dit gedrag is ook beschreven in [2] en in [3], waarbij beschreven is dat het maximale niveau met een minder ductiel vervormingsgedrag wordt ontleend aan de afschuifsterkte van het aansluitvlak (faalmechanisme 2) en het tweede, hier lager gelegen niveau aan het mechanisme waarbij de verbinding tussen de druklaag en de tralieligger afhankelijk is van de uittrekweerstand van de tralieligger (faalmechanisme 3). Arbitrair is er hier gekozen om het tweede niveau te beschrijven bij een vervorming van 20 mm. Tabel 2.1 toont de gemiddelde vjzellast bij het tweede niveau.

Tabel 2.1 Gemiddelde vjzellast bij tweede niveau

proefstuk	gemiddelde vjzellast bij tweede niveau [kN]
T28	59,0
T29	66,7
T30	55,6
T31	82,4
T32	71,9
T33	90,4
R4	82,0
R5	79,6
R6	70,0

Voor dit tweede niveau is ook de trekkracht in de koppelwapening afgeleid middels de volgende vergelijking:

$$F_{\text{kop},2} = \frac{M_{\text{proef},2}}{M_{\text{Rm}}} A_{\text{s,kop}} f_{\text{ym}} \quad (2)$$

waarin:

$F_{\text{kop},2}$ is de kracht in de koppelwapening bij het 2^e niveau;
 $M_{\text{proef},2}$ is het moment in het proefstuk ter plaatse van de doorsnede bij de voeg bij het tweede belastingsniveau.

Vervolgens zijn voor de diverse proefstukken de gemiddelde weerstanden van de koppelwapening bepaald voor de twee beschouwde mechanismen, afschuiven van het aansluitvlak en uittrekken van de tralieligger. Dit geheel conform [2]. De bepalingmethode voor de gemiddelde weerstand is hierna samengevat.

2.3 Eerste vergelijking proeven met faalmechanisme 2 en 3

Daar in [2] reeds een model is afgeleid voor faalmechanisme 2 en 3 is hier allereerst gekeken hoe de proefresultaten zich verhouden tot de twee reeds afgeleide modellen.

2.3.1 *mechanisme 2 – afschuiven aansluitvlak:*

Zoals in [2] aangegeven volgt de gemiddelde maximale weerstand van de koppelwapening bij het afschuiven van het aansluitvlak uit:

$$F_{\text{R,afs,m}} = \alpha_2 \left[C_{\text{v1}} \frac{\sqrt{f_{\text{ck}}}}{\gamma_{\text{c}}} + \rho f_{\text{yd}} \mu_{\text{v}} \sin \theta \right] l_{\text{eff}} b (1 - \alpha_{\text{A,red}}) \quad (3)$$

waarin:

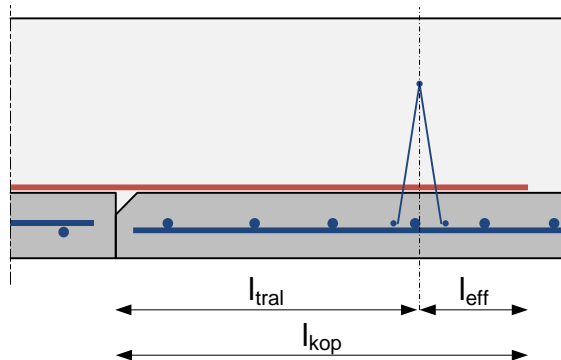
$F_{\text{R,afs,m}}$ is de gemiddelde maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op de schuifsterkte van het aansluitvlak, in N;
 α_2 = 2,0 voor zelfverdichtend beton
 = 2,17 voor traditioneel beton;
 C_{v1} is een factor afhankelijk van het wel of niet bewerkt zijn van het oppervlak van de breedplaat, volgens Tabel 2.2;
 f_{ck} is de kleinste waarde van de karakteristieke cilinder druksterkte van het beton van de breedplaat en de druklaag, in MPa;
 γ_{c} materiaalfactor voor beton gelijk aan 1,5;
 ρ = $A_{\text{s}}/A_{\text{eff}}$
 A_{s} is het oppervlak van de doorsnede van de aansluitvlak doorkruisende wapening, in mm²;
 A_{eff} = $b^* l_{\text{eff}} (1 - \alpha_{\text{A,red}})$
 Is het effectieve oppervlak van het aansluitvlak, waarbij bij aanwezigheid van gewichtsbeparende elementen het deel van het oppervlak wat hierdoor niet effectief kan zijn in mindering gebracht dient te worden, in mm²;
 l_{eff} = $k_{\text{kop}} - l_{\text{tral}}$
 is de effectieve lengte van de aanwezige koppelwapening gemeten vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening tot het einde van de koppelwapening, in mm, zie Figuur 2.2;
 k_{kop} lengte van de koppelwapening gemeten vanaf de rand van de breedplaat;

- l_{tral} afstand van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening tot de rand van de breedplaat;
- b is de breedte van de beschouwde doorsnede, in mm;
- f_{yd} is de rekenwaarde van de vloeigrens van de aansluitvlak doorkruisende wapening, in MPa;
- μ_v is een factor afhankelijk van de ruwheid, volgens Tabel 2.2;
- θ is de kleinste hoek tussen de wapening die het beschouwde aansluitvlak doorkruist en het vlak van het aansluitvlak, waarvoor geldt:
 $\geq 45^\circ$
 $\leq 135^\circ$
- $\alpha_{A,red}$ = $(A_{gewichts,besparend}) / (l_{eff} b)$;
 bij aanwezigheid van gewichtsbesparende elementen moet het deel van het oppervlak dat hierdoor niet effectief kan zijn in mindering worden gebracht.

Tabel 2.2 Coëfficiënten voor de oppervlakte

Oppervlakte ruwheid	C_{v1}	m_v
zeer ruw	0,19	0,9
ruw (bewerkt)	0,15	0,7
glad (niet bewerkt)	0,075	0,6
zeer glad	0,0095	0,5

Als de aansluitvlak doorkruisende wapening uitsluitend wordt gevormd door de diagonalen van de tralieligger is A_s gelijk aan het product van het aantal diagonalen in het beschouwde oppervlak en het oppervlakte van de doorsnede van een enkele diagonaaldraad.



Figuur 2.2 : Effectieve lengte

2.3.2 *mechanisme 3 – uittrekken tralieligger:*

De gemiddelde maximale weerstand van de koppelwapening bij het uittrekken van de tralieligger uit de breedplaat volgt uit:

$$F_{R,uit,m} = \alpha_3 f_{ctm,bp} \alpha_t^{1,5} k_2 k_3 b \tag{4}$$

waarin:

$F_{R,uit,m}$	is de gemiddelde maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger, in kN;
α_3	is een coëfficiënt, = 1,7;
$f_{ctm,bp}$	is de gemiddelde waarde van de treksterkte van het beton van de breedplaat, in MPa;
d_{tr}	is de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat in mm;
k_2	= $\frac{l_{eff}}{600} \leq 1,0$
k_3	= $\frac{56 - \varnothing_k}{40} \geq 0,9$ en $\leq 1,1$
l_{eff}	= $k_{kop} - h_{tral}$ is de effectieve lengte van de aanwezige koppelwapening gemeten vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening tot het einde van de koppelwapening, in [mm], zie Figuur 2.2;
k_{kop}	lengte van de koppelwapening gemeten vanaf de rand van de breedplaat;
h_{tral}	afstand van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening tot de rand van de breedplaat;
\varnothing_k	is de diameter van de koppelwapening die bepalend is voor l_{eff} , in mm;
b	is de beschouwde breedte, in m.

2.3.3 Vergelijking met proeven

De resultaten van de proeven, uitgedrukt in tijdens de proef optredende trekkracht in de koppelwapening, en de weerstand van de koppelwapening volgens de twee hiervoor beschreven mechanismen zijn voor de verschillende relevante proefstukken uit [1] samengevat in Tabel 2.3. In deze tabel is M_{Rm} de momentweerstand op basis van faalmechanisme 4, waarbij vloeï en breuk van de wapening bereikt wordt.

In bijlage A is voor proefstuk T28 aangegeven hoe de weerstand kan worden bepaald voor faalmechanisme 2 en 3. In bijlage C is een overzicht gegeven van de voornaamste parameters van alle proefstukken welke in detail zijn weergegeven in [1].

Tabel 2.3 Resultaten T- en R-proefstukken vergeleken met weerstande volgens mechanismen

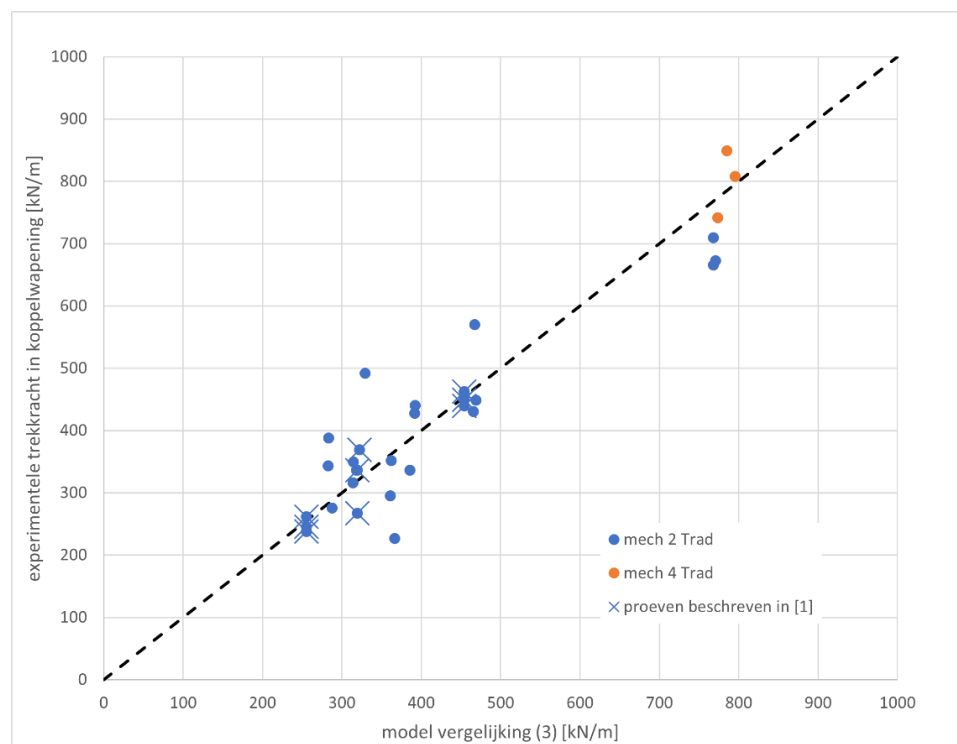
proefstuk	verhouding M_{exp}/M_{Rm}	kracht in koppelwapening		weerstand koppelwapening	
		maximaal [kN]	tweede niveau [kN]	volgens mechanisme 2 [kN]	volgens mechanisme 3 [kN]
T28	0,412	380	351	408	409
T29	0,453	418	387	409	418
T30	0,426	393	335	409	421
T31	0,583	538	463	511	845
T32	0,463	428	413	511	848
T33	0,640	591	498	516	856
R4	0,778	719	458	727	428
R5	0,761	703	449	726	429
R6	0,801	740	403	726	429

2.4 Eerste observaties bij aanvullende proeven

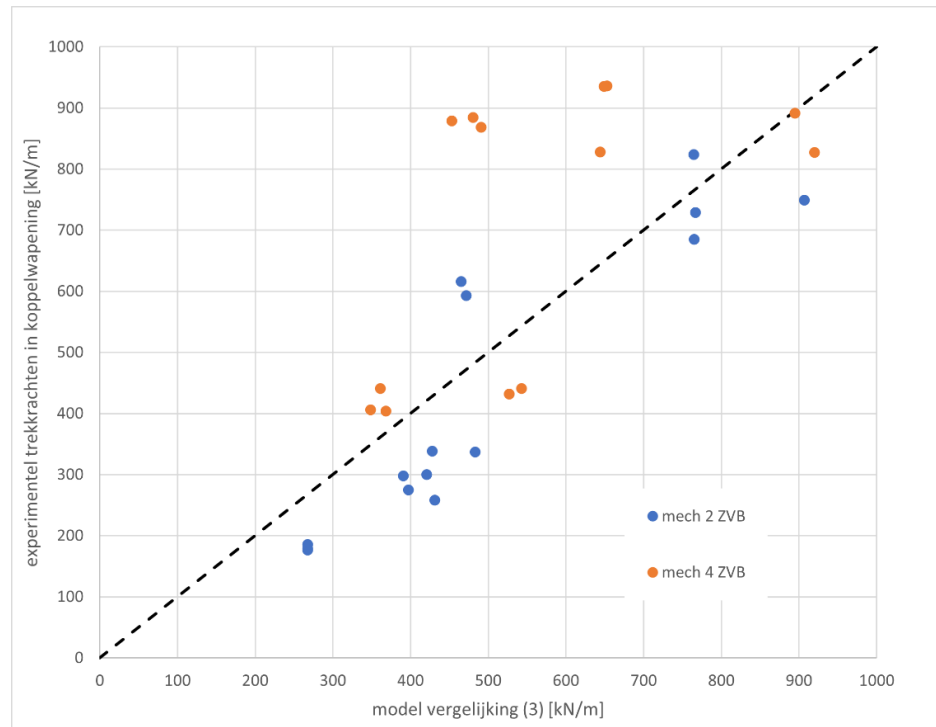
Faalmechanisme 2

Voor dit mechanisme moeten de maximaal in de proef bepaalde optredende krachten in de koppelwapening (kolom 3 in Tabel 2.3) worden vergeleken met de volgens vergelijking [3] bepaalde gemiddelde waarde van de weerstand (kolom 5). Deze vergelijking is tevens opgenomen in Figuur 2.3, voor de volledigheid is in Figuur 2.4 ook voor zelfverdichtend beton de vergelijking met proeven opgenomen, hier zijn n.a.v. het in [1] gerapporteerde onderzoek echter geen nieuwe resultaten aan toegevoegd t.o.v. [2]. Op basis van de verschillende waarden in Tabel 2.3 en Figuur 2.3 kan worden geconcludeerd dat de vergelijking voor mechanisme 2 goed in staat is het gedrag van de beschouwde proefstukken te voorspellen. Als de nieuwe proefresultaten worden toegevoegd aan de dataset van de in [2] gehanteerde proeven blijkt dat de gemiddelde waarde en de variatiecoëfficiënt met de nieuwe proeven nagenoeg gelijk blijven. Daarmee wordt zodoende geconcludeerd dat ook voor korte effectieve lengtes ($100 \text{ mm} < l_{\text{eff}} < 300 \text{ mm}$) van koppelstaven de vergelijking voor faalmecanisme 2 goed toepasbaar is.

Zie paragraaf 2.6 voor een beschouwing hoe om te gaan met waarden van $l_{\text{eff}} < 100 \text{ mm}$.



Figuur 2.3 Verhouding bezwijkwaarden voor experimenten traditioneel beton voor mechanisme 2 en 4, beschreven in [2] en [1] uitgezet tegen het model van vergelijking (3)



Figuur 2.4 Verhouding bezwijkwaarden voor experimenten zelfverdichtend beton voor mechanisme 2 en 4, beschreven in [2] uitgezet tegen het model van vergelijking (3)

Faalmechanisme 3

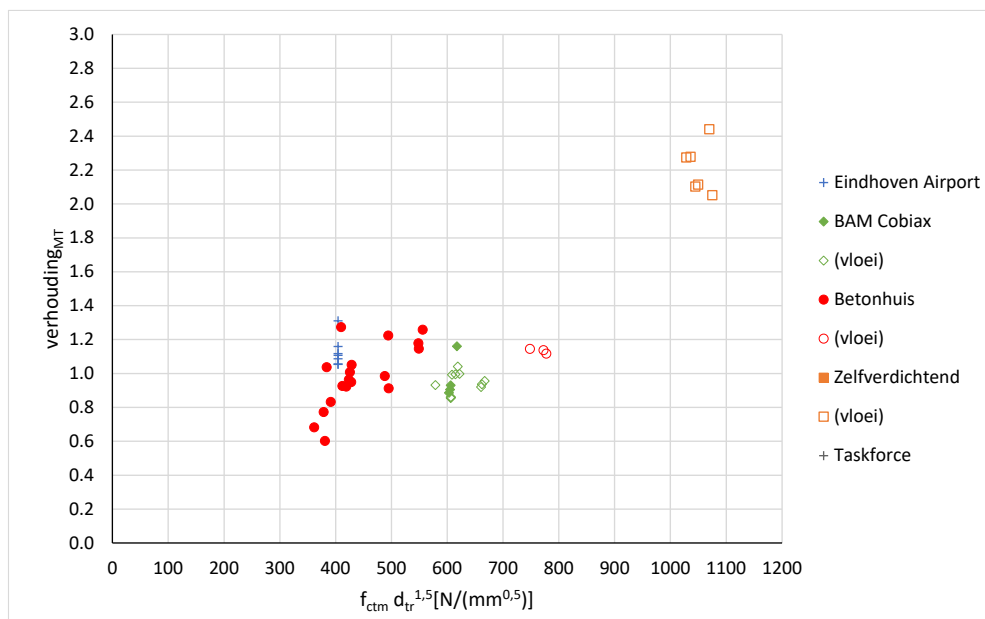
Voor dit mechanisme moeten de bij het tweede niveau in de proef bepaalde optredende krachten in de koppelwapening (kolom 4 in Tabel 2.3) worden vergeleken met de volgens vergelijking [4] bepaalde gemiddelde waarde van de weerstand (kolom 6). Op basis van de verschillende waarden in Tabel 2.3 wordt geconcludeerd dat voor faalmechanisme 3 de voorspelde waarde sterk kan afwijken van de in de proef waargenomen waarde.

Met betrekking tot de vergelijking voor mechanisme 3, die in [2] afgeleid is op basis van een empirische vergelijking, wordt daarom geconcludeerd dat de spreiding van de variabelen in de vergelijking in [2] een andere is dan bij de hier beschouwde experimenten.

Hierbij moet met name gekeken worden naar de effectieve lengte, hier 100 of 200 mm, en in [2] variërend tussen 300 en 800 mm enerzijds, en de diepte van de tralieliggers in de breedplaat en de treksterkte van het beton van de breedplaat anderzijds. De diepte van de tralieliggers van de proefstukken van [2] waarbij uittrekken optrad, varieert tussen 21 en 27 mm. Bij proefstukken in [2] waarbij grotere diepten aanwezig waren, trad vloeï van de koppelwapening op. Bij de in dit rapport beschreven proeven trad bij diepten van 37 mm toch uittrekken op. Om dit verder te illustreren is gekeken naar de waarde van $f_{ctm,bp} d_t^{1,5}$ – een deel van de vergelijking voor mechanisme 3 - bij de diverse proefstukken.

Bij de proefstukken in [2] varieert de waarde van $f_{ctm,bp} d_t^{1,5}$ voor de proefstukken die bezwijken door uittrekken tussen 346 en 617 N/mm^{0,5}, terwijl dit bij de proefstukken waarbij vloeï optreedt, varieert tussen 579 en 1075 N/mm^{0,5}, zie Figuur 2.5. Bij de in dit rapport beschreven proeven, $f_{ctm,bp} = 3,8$ MPa en $d_t = 37$ mm, is $f_{ctm,bp} d_t^{1,5}$ gelijk aan 855 N/mm^{0,5}.

Dit is in de range waarbij voor de empirische afleiding van de vergelijking voor het uittrekken van de tralieligger nog geen data voorhanden was bij [2].



Figuur 2.5 Verhouding tussen $f_{ctm} d_{tr}^{1.5}$ enerzijds en de verhouding tussen de maximale trekkracht in de koppelwapening volgens vergelijking (4) en de trekkracht in de koppelwapening tijdens de proeven beschreven in [2]

De inbeddingsdiepte van de tralieligger en de treksterkte van het beton van de breedplaat zijn eigenschappen die invloed hebben op de weerstand van een betonconus die uit de breedplaat wordt getrokken. Echter de uittreksterkte kan ook worden bepaald door de treksterkte van de tralieliggers. Tijdens enkele in [1] beschreven proeven is geconstateerd dat er sprake was van het breken van diagonalen van de tralieliggers. Hieruit kan worden afgeleid dat er een bovengrens moet zijn voor de wijze waarop de variabelen diepte en treksterkte in de vergelijking worden beschouwd.

Ter illustratie kan de volgende berekening worden gemaakt:

Stel de volgende variabelen:

de breedte van de tralieligger:	$b_t = 50 \text{ mm}$
de inbeddingsdiepte van de tralieligger:	$d_t = 37 \text{ mm}$
diameter van de diagonalen:	$\varnothing_d = 5 \text{ mm}$
hoek tussen de diagonalen en het horizontale vlak:	$\theta = 65^\circ$
aantal aansluitende diagonalen:	$n_d = 4$
de treksterkte van het beton:	$f_{ctm, bp} = 3,8 \text{ MPa}$

Neem aan dat het geprojecteerde horizontale oppervlak van de uit te trekken betonconus gelijk is aan: $A_c = (b_t + 2d_t)2d_t = 9180 \text{ mm}^2$. De trekkracht om dit uit het beton te trekken $F_c = A_c \cdot f_{ctm, bp} = 35 \text{ kN}$. Per diagonaal is dit $F_{dia} = F_c / (n_d \sin \theta) = 9,62 \text{ kN}$. Bij een staafdiameter van 5 mm komt dit overeen met een spanning van 490 MPa hetgeen van een gelijke orde van grootte is als de treksterkte van het materiaal.

Dat diagonalen van de tralieliggers kunnen breken komt overeen met waarnemingen van producenten die de verankering van de tralieliggers met enige regelmaat testen. Dit testen is noodzakelijk omdat tijdens de uitvoering van bouwwerken de breedplaten vaak aan de tralieliggers worden gehesen. Bij dit testen is het breken van de diagonalen het gebruikelijke bezwijkmechanisme.

2.5 Aanpassing mechanisme 3

Op basis van het voorgaande wordt geconcludeerd dat de vergelijking voor mechanisme 3 aangepast moet worden om hem geldig te laten zijn buiten het toepassingsgebied dat in [2] is gebruikt voor de afleiding, $l_{\text{eff}} \geq 300$ mm en $d_t \leq 30$ mm. Ten eerste zal de invloed van de effectieve lengte bij beperkte waarden kleiner moeten zijn. In de huidige versie gaat deze invloed lineair terug naar 0 bij een effectieve lengte gelijk aan 0. Ten tweede moet de invloed van de grootte van $f_{\text{ctm,bp}} d_t^{1,5}$ worden beperkt / begrensd.

Op basis van deze overweging is, op basis van 40 proefstukken waarbij mechanisme 3 is opgetreden, ten behoeve van het project 'Bewezen sterkte breedplaatvloeren' de volgende aanpassing van vergelijking (4) voor mechanisme 3 bepaald:

$$F_{R,\text{uit,m}} = \alpha_3 f_{\text{ctm,bp}} d_{\text{tr}}^{1,5} k_2 k_3 b \quad (5)$$

waarin:

$F_{R,\text{uit,m}}$ is de gemiddelde maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger, in kN;

α_3 is een coëfficiënt,
= 1,7;

$f_{\text{ctm,bp}}$ is de gemiddelde waarde van de treksterkte van het beton van de breedplaat, in MPa;

d_{tr} is de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat in mm,

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

$k_2 = \frac{l_{\text{eff}}}{5000} + 0,16$ bij $100 \text{ mm} \leq l_{\text{eff}} < 200 \text{ mm}$

$= \frac{l_{\text{eff}}}{333} - 0,4$ bij $200 \text{ mm} \leq l_{\text{eff}} < 300 \text{ mm}$

$= \frac{l_{\text{eff}}}{600} \leq 1,2$ bij $l_{\text{eff}} \geq 300 \text{ mm}$

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

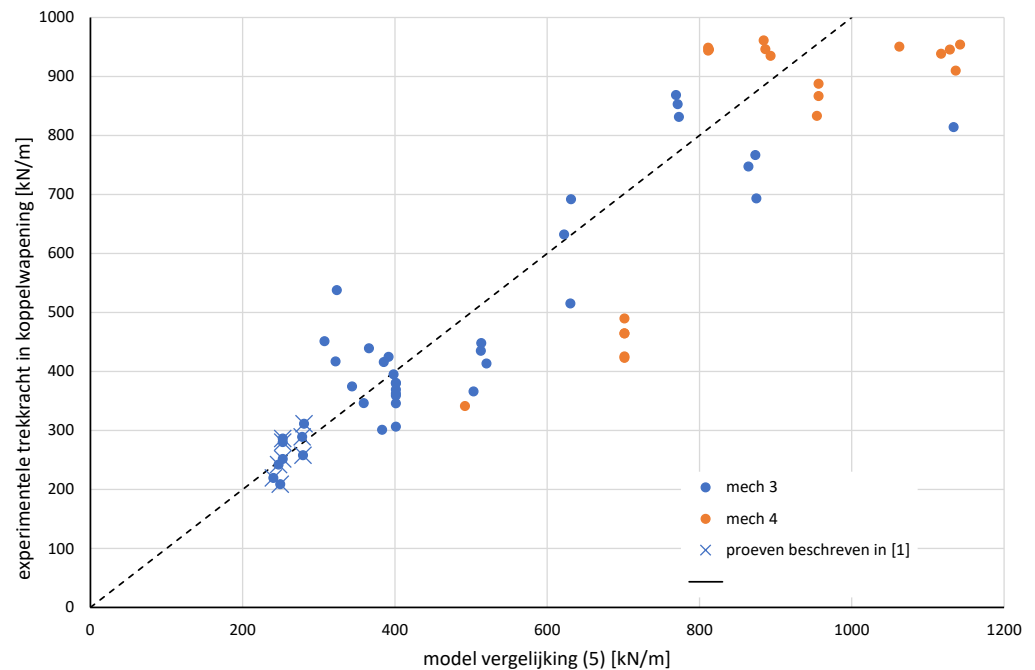
l_{eff} is de grootste lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening, in mm;

\varnothing_k is de diameter van de koppelwapening die bepalend is voor l_{eff} , in mm;

b is de beschouwde breedte, in m.

Het toepassingsgebied van de vergelijking is begrensd door de waarde van $l_{\text{eff}} > 100$ mm. Dit is de kleinste waarde van l_{eff} in de test waarbij het mechanisme uittrekken tralieligger is waargenomen.

Een vergelijking van de experimenteel bepaalde waarden met de waarden volgend uit het met vergelijking (5) beschreven model is weergegeven in Figuur 2.6.



Figuur 2.6 Verhouding bezwijkwaarden voor experimenten bezweken door mechanisme 3 en 4, beschreven in [2] en [1] uitgezet tegen het model van vergelijking (5)

Uit Figuur 2.6 blijkt dat de aangepaste vergelijking voor mechanisme 3 goed in staat is het gedrag van de beschouwde proefstukken te voorspellen. De variatiecoëfficiënt van het model is, uitgaande van een normaalverdeling bepaald op 0,15.

2.6 Toepassing faalmechanisme 2 bij kleine waarden van l_{eff}

Bij de in paragraaf 2.4 gegeven evaluatie van de weerstandsvergelijking voor faalmechanisme 2 is voor de in [2] beschouwde proefstukken aangevuld met de in 2.3.3 beschouwde proefstukken gekeken naar proeven met een minimale effectieve lengte l_{eff} van 100 mm. In [1] zijn echter ook proeven gerapporteerd waarvoor geldt $l_{eff} \approx 0$ mm. In de praktijk is het immers mogelijk dat door plaatsingstoleranties etc. koppelstaven net doorlopen tot voorbij het hart van de tralieligger. De vraag is dan of faalmechanisme 2 zoals nu voorgesteld ook voor deze kleine waarden van l_{eff} een goede voorspelling van de weerstand geeft.

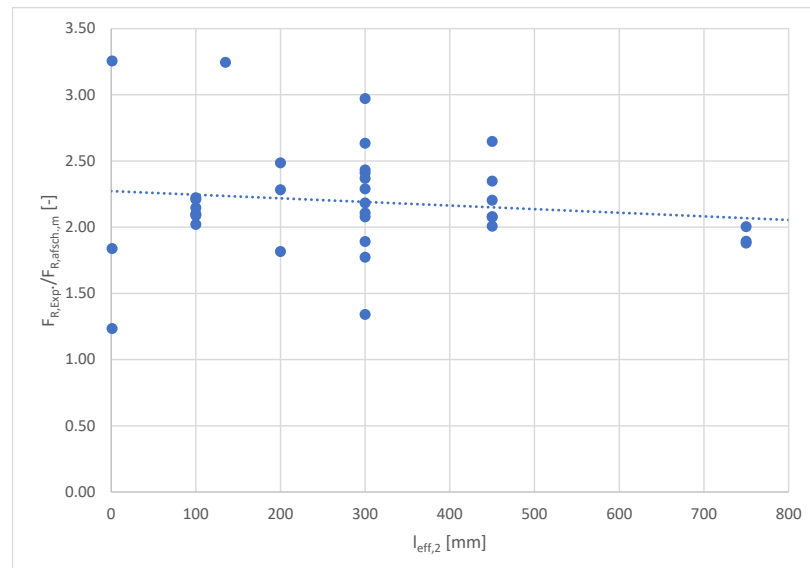
Voor de proefserie T25-T27 met koppelstaven die net niet voorbij de tralieligger lopen, is hiervoor uitgegaan van een effectieve lengte van $l_{eff} = 1$ mm. Dit betekent met name dat bij koppelwapening welke net voorbij de tralieligger loopt een volledige bijdrage van het aansluitvlak doorstekende wapening (de tralieligger) in de aanwezig capaciteit wordt verondersteld. In de praktijk zal het effect van door het aansluitvlak doorlopende wapening al merkbaar zijn bij koppelstaven welke op een bepaalde afstand voor het hart van de tralieligger stoppen. Welke afstand dat precies is en hoe deze bijdrage dan bepaald dient te worden, kan op basis van de beschikbare proeven niet exact worden aangegeven. Daarom is er gekozen voor aanpak waarbij faalmechanisme 2 pas toegepast kan worden als de koppelstaven voorbij het hart van de tralieligger doorlopen.

De hier uitgevoerde vergelijking tussen de proeven en het model voor faalmechanisme 2 maakt duidelijk dat voor faalmechanisme 2 ook bij een beperkte waarde voor l_{eff} het model toepasbaar is. Er is weliswaar een grotere spreiding in de resultaten maar zoals in Figuur 2.7 zichtbaar is, wordt de invloed van de effectieve lengte l_{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_{eff} faalmechanisme 2 toepasbaar is.

Tabel 2.4 Resultaten T -proefstukken vergeleken met weerstand volgens mechanisme 2

proefstuk	verhouding M_{exp}/M_{Rm}	kracht in koppelwapening		weerstand koppelwapening volgens mechanisme 2 [kN]
		maximaal [kN]	tweede niveau [kN]	
T25	0,189	174	--	306 ¹
T26	0,281	260	--	306 ¹
T27	0,497	459	--	306 ¹

¹ Hierbij is om een voorspelling te kunnen doen $l_{eff,2} = 1$ mm aangehouden.



Figuur 2.7 Relatie tussen de effectieve lengte l_{eff} en ratio proef/voorspelling (excl. α_2)

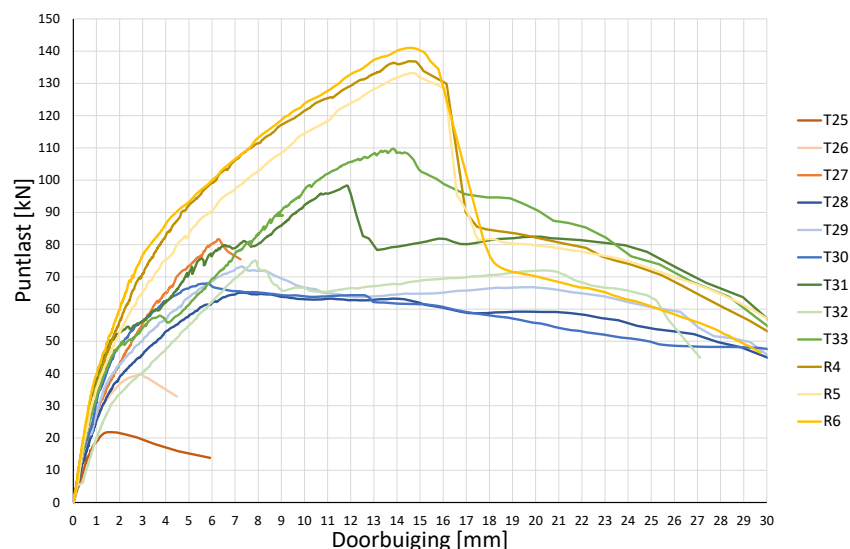
3 T-proefstukken met niet door de tralieligger stekende koppelstaven

3.1 Afleiding vergelijking voor mechanisme 1 – Aanhechting

Dit faalmechanisme is in de eerdere proeven [2] in Nederland niet onderzocht. Dit daar bij de meeste proeven er sprake was van een detailleringwijze met koppelstaven doorstekend door de tralieliggers. Hierdoor zal weliswaar faalmechanisme 1 optreden tijdens de proef, maar dit zal dan niet tot falen van het proefstuk leiden. In de nu beschouwde aanvullende proevenserie [1] zijn een drietal proeven opgenomen (T25-T27) waarbij het optreden van faalmechanisme 1 tot het bezwijken van het proefstuk heeft geleid. Tevens zijn er proeven uit het buitenland bekend waarbij de detaillering nabij de kritische naad zodanig was dat mechanisme 1 hier ook als maatgevend mechanisme kon optreden.

Nadere toelichting op gedrag tijdens de proef:

Bij aanvang van de proef zijn de breedplaat en de druklaag door middel van aanhechting aan elkaar verbonden. Bij het aanbrengen van de belasting ontstaan er evenwijdig aan het aansluitvlak schuifspanningen (omdat bij het veldmoment de verlenging van de onderzijde van de druklaag wordt verhinderd door het deel van de breedplaat direct naast de naad waarin nog geen buigtrekspanningen aanwezig zijn) en in de richting loodrecht op het aansluitvlak trek- en drukspanningen door de ontstane kromming in de druklaag. De weerstand tegen de optredende normaal- en schuifspanning wordt in eerste instantie gevormd door de aanhechtsterkte van breedplaat aan de druklaag. Proefstukken waarbij de koppelwapening niet doorsteekt voorbij de tralieligger en waarbij faalmechanisme 1 dus bepalend is voor het gedrag, kenmerken zich door een gebrek aan ductiel gedrag op het moment van bezwijken en een grote spreiding in de weerstand, zie Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Last-ervormingsgedrag van experimenten beschreven in [1] waarbij proefstukken T25, T26 en T27 bezwijken volgens faalmechanisme 1 en de overige proefstukken door faalmechanisme 2 in combinatie met faalmechanisme 3

Ook in de proeven die uiteindelijk bezwijken door uittrekken van de tralieligger, vloeien van de koppelwapening, etc. wordt in de regel vrij vroeg in de proef, vaak voordat buigtrekscheuren in het beton ontstaan, de aanhechting tussen breedplaat en druklaag lokaal verbroken. Vanwege de detaillering van de wapening en met name de tralieliggers die de druklaag en breedplaat verbinden, is dit echter dan niet het maatgevende faalmechanisme voor die proef.

Om faalmechanisme 1 te voorspellen is, net als bij faalmechanisme 2, gebruik gemaakt van de wijzigingsvoorstellen voor de weerstandbepaling van aansluitvlakken van op verschillende tijdstippen gestort beton zoals voorgesteld in prEN1992-1-1: Sept 2021 [4]. Hierbij wordt op basis van enkele parameters een over het aansluitvlak over te dragen schuifspanning bepaald.

Op basis van de hiervoor voorgestelde modellen is voor de voorspelling van de gelijkmatig verdeelde sterkte van het aansluitvlak zonder doorkruisende wapening onderstaande vergelijking (in MPa) afgeleid:

$$F_{R,aanh,m} = \alpha_1 C_{v1} \sqrt{f_{ck}} / \gamma_C b l_{aanh} (1 - \alpha_{A,red,aanh}) \quad (6)$$

waarin:

$F_{R,aanh,m}$ is de gemiddelde maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op de aanhechtsterkte van het aansluitvlak;

α_1 is een correctiecoëfficiënt te bepalen op basis van de beschikbare proefresultaten;

C_{v1} is een factor afhankelijk van het wel of niet bewerkt zijn van het oppervlak van de breed plaat, volgens Tabel 2.2;

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

γ_C materiaalfactor voor beton gelijk aan 1,5;

b is de breedte van de beschouwde doorsnede

$l_{aanh} = \text{MIN}(l_{kop}, l_{trai})$

is de effectieve lengte van de aanwezige koppelwapening gemeten vanaf de naad tussen de breedplaten, echter niet groter dan de afstand vanaf de naad tot de eerste tralieligger

$\alpha_{A,red,aanh} = (A_{gewichts,besparend}) / (l_{aanh} b)$;

bij aanwezigheid van gewichtsbesparende elementen moet het deel van het oppervlak dat hierdoor niet effectief kan zijn in mindering worden gebracht.

Vergelijking (6) is een vereenvoudiging van de vergelijking zoals die in [4] is voorzien voor de sterktebepaling van het aansluitvlak tussen twee op verschillende tijdstippen gestorte beton. De vereenvoudiging is erin gelegen dat andere bijdragen (wapening, normaalspanning op het oppervlak) niet aanwezig zijn en zodoende uit de vergelijking zijn gehaald. In vergelijking (6) wordt voor aanhechting ervan uitgegaan dat deze afhankelijk is van de treksterkte van beton (bepaald als gerelateerd aan de wortel van de druksterkte) en de oppervlaktecondities van het aansluitvlak. Voor de treksterkte van beton is dan de betonzijde met de laagste sterkte maatgevend (d.w.z. druklaag of breedplaat).

De factor C_{v1} is afhankelijk van de eigenschappen van het aansluitvlak: bij een ruwer aansluitvlak is er meer oppervlak beschikbaar in het aansluitvlak waar druklaag en breedplaat aan elkaar hechten en ontstaat zodoende een hogere gemiddelde aanhechtsterkte per m^2 aansluitvlak. Hiervoor is voor C_{v1} uitgegaan van de waarden zoals die voor [4] zijn afgeleid ter bepaling van de rekenwaarde van τ_{R1} , dit daar gedetailleerde achtergronden over C_{v1} ontbraken. Daar voor C_{v1} uitgegaan is van een waarde behorende bij de rekenwaarde uit de betreffende normen is dit ook voor de treksterkte van beton (bepaald als wortel van de druksterkte) gedaan. Voor de waarde van het gemiddelde en de variatiecoëfficiënt van α_1 zijn zodoende ook variaties in materiaal en de parameter C_{v1} verdisconteerd. Daarbij wordt opgemerkt dat deze met name zijn bepaald voor aansluitvlakken met geen of een geringe invloed van buiging en kromming.

Voor het bepalen van de weerstand dient uitgegaan te worden van het gebied voor de eerste tralieligger. Bij doorlopen van de koppelwapening tot achter de tralie is er immers sprake van een bijdrage door de wapening die het aansluitvlak doorkruist (tralieliggers) en dient faalmechanisme 2 aangehouden te worden. Zie hoofdstuk 4 voor een nadere beschouwing hoe de verschillende faalmechanismen zich tot elkaar verhouden. Tevens gaat het om het effectieve oppervlak waarbij eventueel aanwezige gewichtsbesparende elementen in mindering gebracht moeten worden.

Net als in [2] al voor faalmechanisme 2 is aangegeven, dient voor de ruwheid-parameters bij faalmechanisme 1 onderscheidt gemaakt te worden in nabewerkte en niet nabewerkte oppervlakken. Voor de in Nederland toegepaste breedplaten geldt dat de oppervlakteruwheid (zie Tabel 2.1) “zeer glad” en “zeer ruw niet voorkomen.

3.2 Vergelijking met proeven

De factor α_1 in vergelijking(6) is de modelfactor (ook wel aangeduid als correctiecoëfficiënt of modelcorrectiefactor) bepaald uit:

$$\alpha_1 = \frac{F_{\text{exp}}}{C_{v1} \frac{\sqrt{f_c}}{\gamma_C} b_{\text{aanh}} (1 - \alpha_{A,\text{red,aanh}})} \quad (7)$$

In de bepaling van de gemiddelde waarde en de variatiecoëfficiënt voor α_1 is ook de variatie in de materiaalsterkte (f_c) en de oppervlakte parameter C_{v1} van invloed geweest. De variatiecoëfficiënt beschrijft zodoende de variatie van het gehele model inclusief materiaalspreiding.

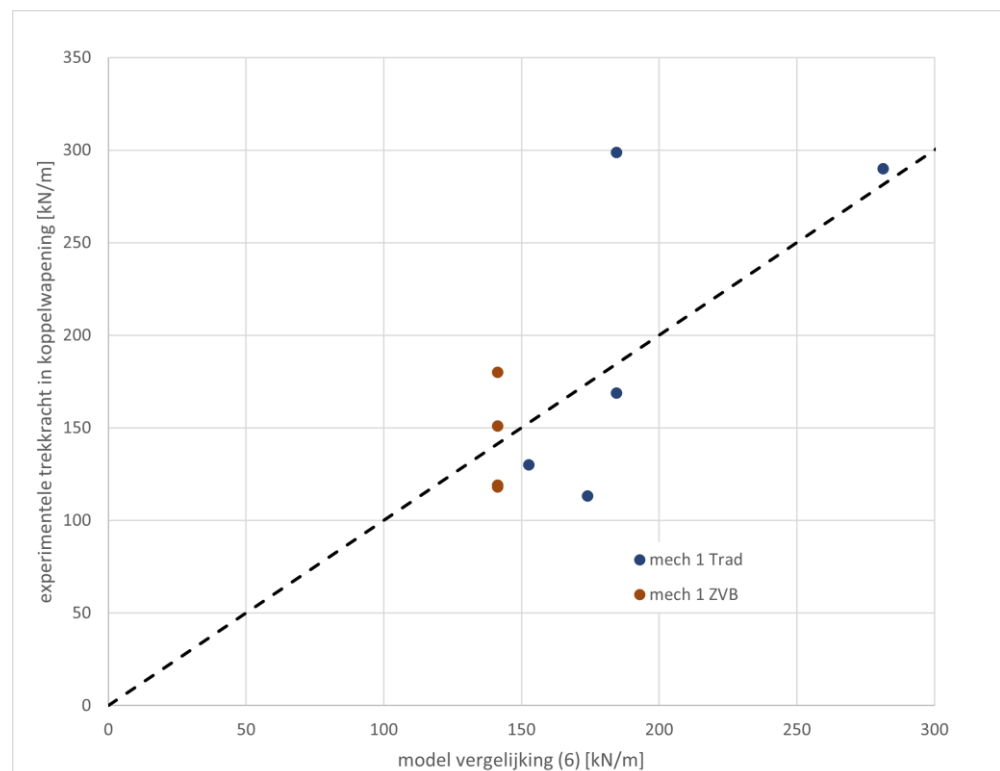
Voor de proefserie T25-T27, aangevuld met enkele uit het buitenland bekende proeven, is in Tabel 3.1 een overzicht gegeven van de maximale kracht in de koppelwapening tijdens de proeven en de voorspelde weerstand volgens vergelijking (6). Zoals in de tabel te zien, is er een relatief grote spreiding in de proefresultaten op de vergelijkbare proefstukken. Toepassen van de vergelijking voor verificatie zal alleen kunnen na een correctie ten opzichte van de nu in [5] voorgestelde rekenwaarde. De grootte van deze correctie is echter op basis van de beperkt beschikbare proeven statistisch niet goed te onderbouwen. Voor verificatie van bestaande breedplaatvloeren is op basis van de beschikbare proeven voor faalmechanisme 1 daarom geen rekenwaarde voor de weerstand te geven.

Tenslotte is in Figuur 3.2 een vergelijking gegeven tussen de in de proef waargenomen trekkracht in de koppelwapening en de met vergelijking 6 voorspelde opneembare trekkracht in de koppelwapening, waarbij voor α_1 de gemiddelde waarden uit Tabel 3.1 zijn aangehouden.

Tabel 3.1 Resultaten proefstukken vergeleken met weerstand volgens mechanisme 1

proefstuk	kracht in koppelwapening	weerstand koppelwapening	α_1	
	F_{exp}	$F_{R,aanh,m}$	proef	gemiddelde
	maximaal [kN] ¹	volgens mechanisme 1 [kN]		
Traditioneel beton				
T25	181	278	0.65	
T26	270	278	0.97	
T27	478	278	1.72	1.06
S-5	145	133	1.09	
W-B3	65	36	0.90	
Zelf verdichtend beton				
GH7	151	98	1.54	
GH8	119	98	1.21	
GH9	180	98	1.83	1.44
GH10	118	98	1.20	

¹ Hierbij is voor faalmechanisme is uitgegaan van elastisch gedrag van het beton.



Figuur 3.2 Verhouding bezwijkwaarden voor experimenten bezweken door mechanisme 1, beschreven in [2] en [1] uitgezet tegen het model van vergelijking (6) met $\alpha_1 = 1,06$ voor traditioneel en 1,44 voor ZVB

3.3 Toepassing faalmechanisme 1 bij beoordeling bestaande breedplaatvloeren

Constructies waar de detaillering van de koppelwapening t.o.v. de tralieligger zo is uitgevoerd dat de koppelwapening voor de tralieligger stopt, zijn zeer kritisch. Dit daar zoals eerder omschreven hier een scheurvlak kan ontstaan waarbij geen wapening wordt doorsneden. Dit leidt tot een bros bezwijkmechanisme welke in het ontwerp vermeden dient te worden.

Voor de in dit onderzoek uit te voeren bewezen sterkte analyse is voor dit faalmechanisme toch, op basis van beperkt beschikbare data, in [12] een weerstandsmodel met bijbehorende verdelingsfunctie afgeleid. Dit daar in de beschouwing anders voor deze gevallen geen analyse uitgevoerd kon worden. Hierbij is uiteraard wel rekening gehouden met het feit dat het faalmechanisme een bros karakter kent en zodoende bijvoorbeeld geen herverdeling van momenten mogelijk is.

Om dit faalmechanisme ook in de ingenieurspraktijk voor het beoordelen van bestaande situaties toe te kunnen passen, zou dit omgezet moeten worden in een rekenmodel waarbij alle onzekerheden op een juiste wijze in rekening gebracht worden. Vraag is dan of dit mogelijk en wenselijk is. Op basis van het beperkte aantal proeven wordt geconcludeerd dat er geen rekenwaarde voor faalmechanisme 1 afgeleid kan worden. Daarnaast dient kritisch te worden overwogen of het wenselijk is voor bestaande breedplaatvloeren dat een dergelijk bros faalmechanisme voor een lange periode wordt geaccepteerd. Dit betekent dat vloeren met een koppelwapening welke niet doorloopt tot voorbij de eerste tralieligger rekenkundig niet beoordeeld kunnen worden met een algemeen geaccepteerd weerstandsmodel.

Noot: Het is bekend dat in bestaande gebouwen in veel gevallen ook situaties voorkomen waar door scheve plaatconfiguraties de afstand van de tralie tot de naad varieert en zodoende eventueel er over een deel van een naad sprake is van koppelwapening welke niet tot voorbij de tralie doorloopt. In die gevallen is een beoordeling wel mogelijk als de weerstand van dit deel van de voeg gelijk aan 0 gesteld wordt. De overige delen kunnen wel beoordeeld worden met de in [2] afgeleide en in dit rapport bijgewerkte modellen voor faalmechanisme 2 en 3.

4 Vergelijking weerstand verschillende mechanismen

In hoofdstukken 2 en 3 zijn voor de drie beschreven faalmechanismen vergelijkingen voor de gemiddelde capaciteit beschreven. De maatgevende capaciteit is de hoogste waarde van de drie faalmechanismen omdat alle drie de faalmechanismen moeten zijn opgetreden voordat daadwerkelijk bezwijken van het kritieke detail op kan treden.

Voor alle drie de faalmechanismen is de capaciteit uitgedrukt als maximale kracht in de toegepaste koppelwapening.

Een bovengrens van de capaciteit wordt bereikt als de koppelwapening gaat vloeien, hierna aangeduid als faalmechanisme 4. Hierna is aangenomen dat het vloeien van de koppelwapening maatgevend is boven het vloeien van de breedplaatwapening. De gemiddelde waarde van de capaciteit van de koppelwapening bij vloeien wordt beschreven door:

$$F_{R,y,m} = f_{ym} A_s \quad (8)$$

waarin:

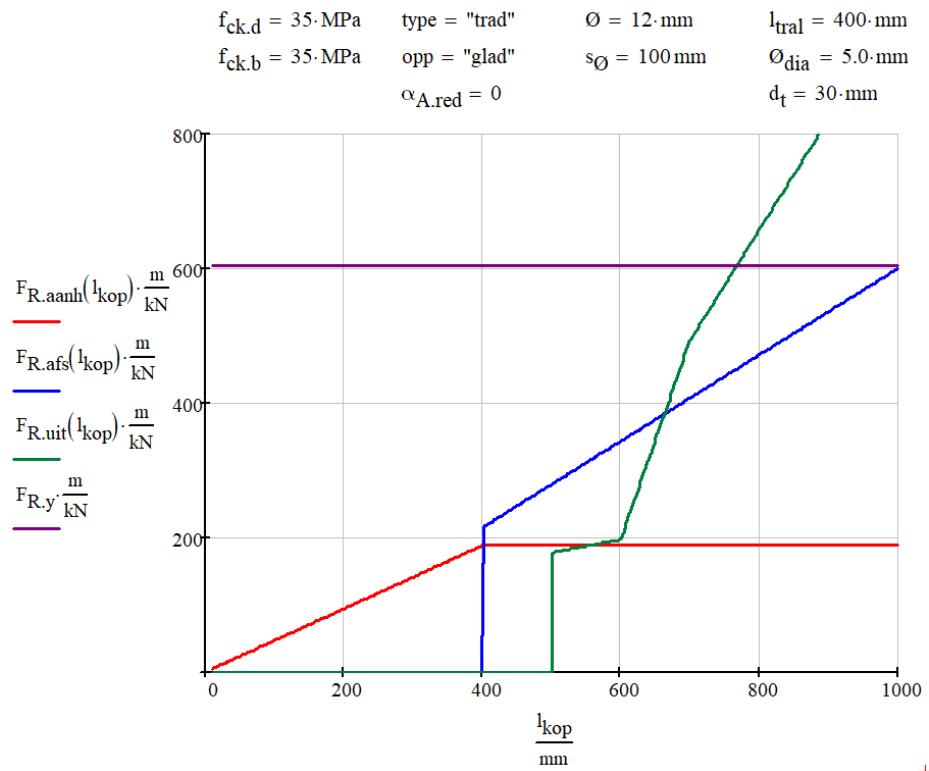
- $F_{R,y,m}$ is de gemiddelde maximale trekkracht in de koppelwapening bij vloeien;
- f_{ym} is de gemiddelde vloeigrens van het wapeningsstaal;
- A_s is het oppervlak van de doorsnede van de koppelwapening.

Hierna wordt overeenkomstig annex A van prEN 1992-1-1 [2021] aangenomen dat voor wapeningsstaal B500 de gemiddelde vloeigrens gelijk is aan 535 MPa.

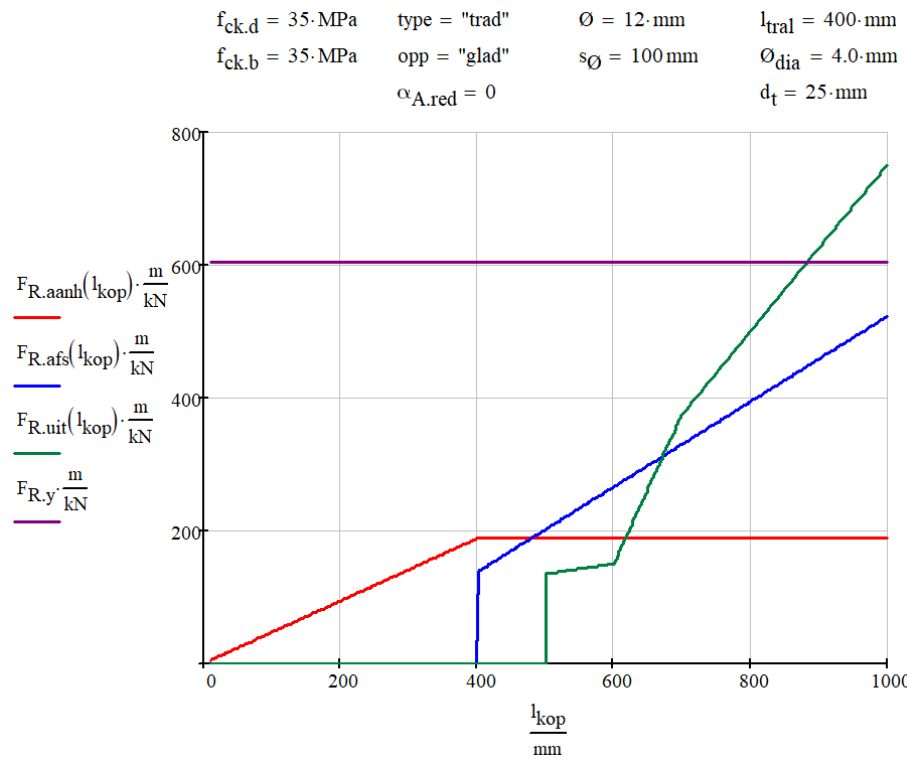
Uit een inventarisatie van de verschillende vergelijkingen voor de maximale gemiddelde kracht in de koppelwapening blijkt dat de volgende variabelen van invloed zijn op de grootte daarvan:

- de betonsterkte van de druklaag en de breedplaat ($f_{ck,d}$, $f_{ck,b}$);
- de nabewerking van de bovenzijde van de breedplaat: glad of ruw (opp);
- het type beton van de breedplaat: traditioneel of zelfverdichtend (type);
- de eventuele reductie van het oppervlak van het aansluitvlak door aanwezige gewichtsbeparende elementen ($\alpha_{A,red}$, $\alpha_{A,red,aanh}$);
- de lengte, diameter en hart-op-hart afstand van de koppelwapening (k_{op} , \emptyset en s_{\emptyset});
- de positie van de tralieligger ten opzichte van de naad (l_{tral});
- de diameter en de hoek van de diagonalen van de tralieligger(s) in het aansluitvlak (\emptyset_{dia} , θ);
- de diepte van de tralieligger in de breedplaat (α).

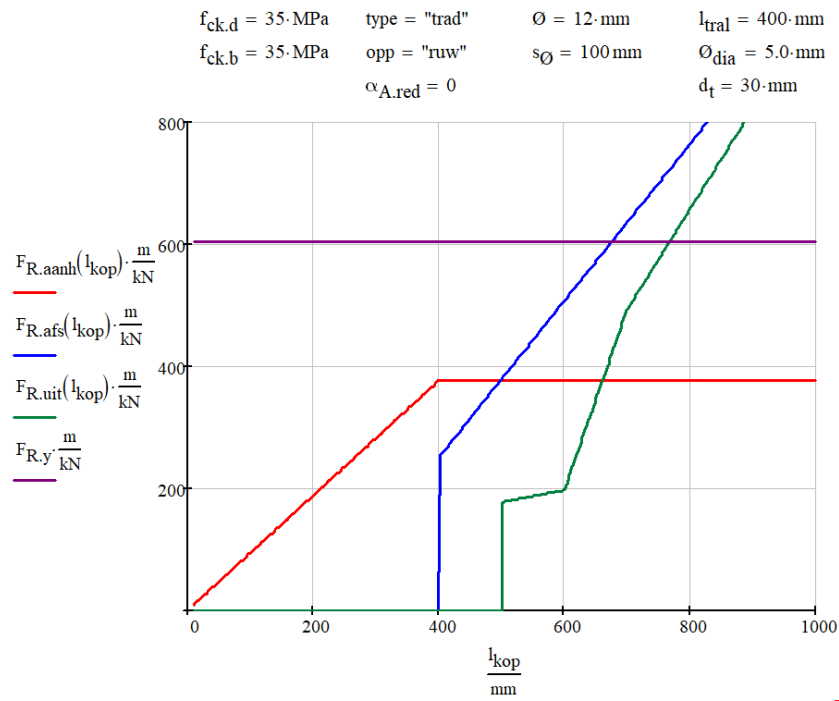
Om een indruk te geven van de invloed van de verschillende variabelen op de capaciteit van het detail is hierna voor verschillende configuraties de maximale kracht in de koppelwapening gegeven als functie van zijn lengte, gemeten vanaf de naad. Hierbij is aangenomen dat één tralieligger aanwezig is in het aansluitvlak, met per meter breedte 20 diagonalen onder een hoek van 70° en dat $\alpha_{A,red}$ en $\alpha_{A,red,aanh}$ dezelfde waarde hebben.



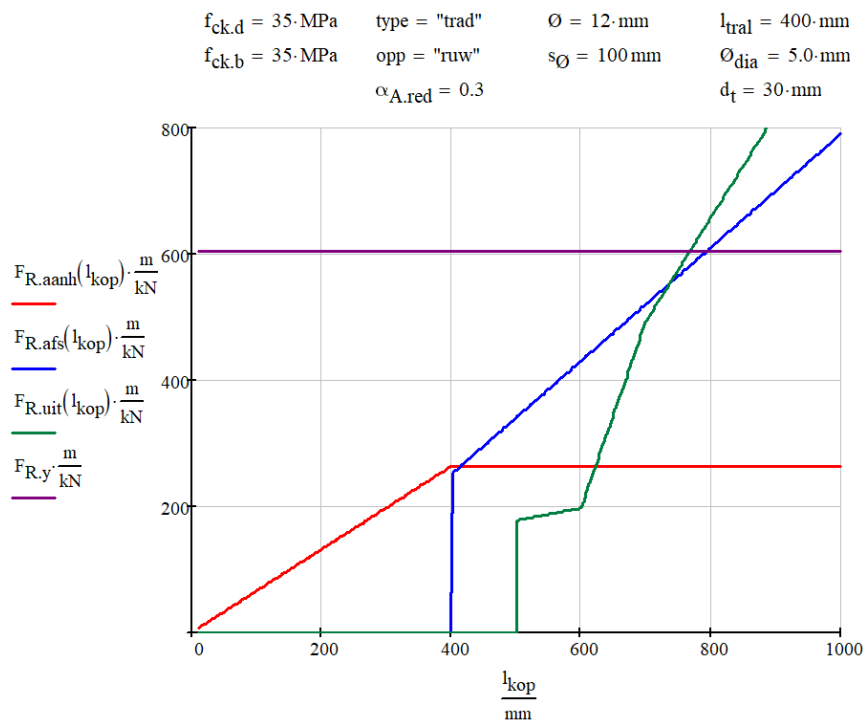
Figuur 4.1 Capaciteit koppelwapening bij aangegeven eigenschappen



Figuur 4.2 Capaciteit koppelwapening bij, ten opzichte van figuur 4.1, kleinere waarde \varnothing_{dia} en d_t



Figuur 4.3 Capaciteit koppelwapening bij, ten opzichte van figuur 4.1, een ruw breedplaatoppervlak



Figuur 4.4 Capaciteit koppelwapening bij, ten opzichte van figuur 4.1, een ruw breedplaatoppervlak en een reductie van 30% door gewichtsbesparende elementen

Uit de bovenstaande figuren 4.1 – 4.4 is af te leiden dat afhankelijk van de lengte van de koppelstaven en de plaatsing van de tralieligger (hier vast op 400mm verondersteld) de faalmechanismen 1 t/m 3 qua capaciteit redelijk in elkaar overlopen, hetgeen ook uit de evaluatie van de afzonderlijke proeven bleek. Al naar gelang de mate waarin koppelstaven doorliepen tot achter de tralieligger werd een ander faalmechanisme maatgevend.

Hierbij wordt opgemerkt dat dit van toepassing is voor de gemiddelde waarde van de capaciteit. Door het verschil in spreiding van faalmechanisme 1 enerzijds en de faalmechanismen 2 en 3 anderzijds zal dit beeld, uitgaande van rekenwaarden, anders zijn. Voor faalmechanisme 1, van toepassing bij koppelstaven die niet doorlopen tot voorbij de tralie, zal de rekenwaarde van de capaciteit naar verhouding meer afnemen. Zoals in paragraaf 3.3 aangegeven, wordt voor een semi-probabilistische analyse zoals voorgeschreven in het stappenplan voor beoordeling van bestaande breedplaten geadviseerd om voor naden met koppelstaven die niet doorlopen tot onder of voorbij de tralie geen rekenmodel te geven, m.a.w. de capaciteit voor faalmechanisme 1 gelijk aan 0 te veronderstellen.

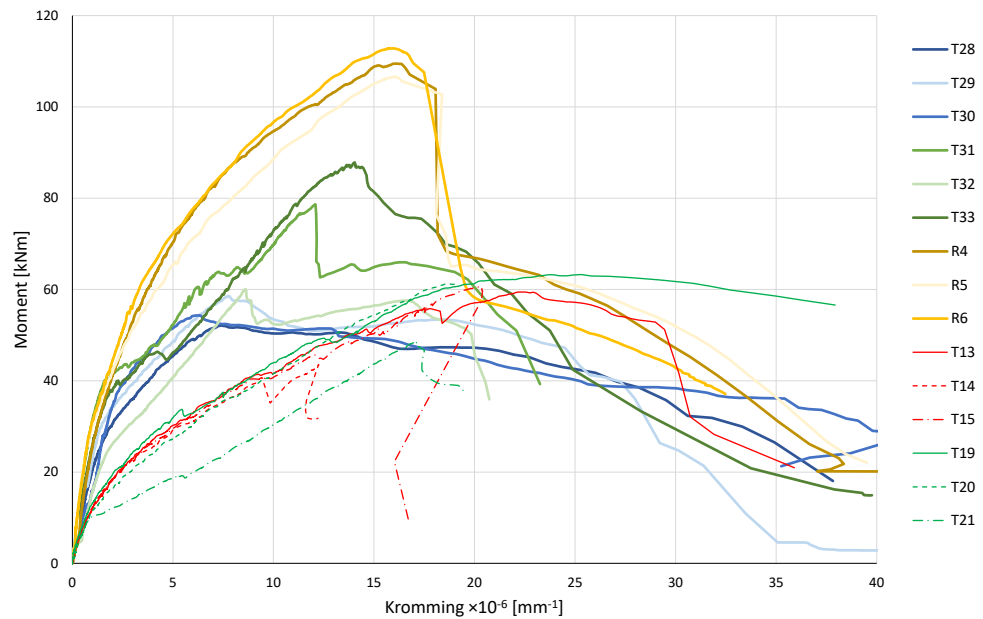
5 Bilinearisatie moment-krommingsrelaties

5.1 Inleiding

Ten behoeve van de bewezen sterkte analyse (zie [12]) is er inzicht gewenst in de kromming en vervormingscapaciteit van breedplaatvloerconstructies, inclusief het effect van de aanwezige kritische voeg tussen twee breedplaten. Daarom is er een analyse uitgevoerd waarbij de vervormingscapaciteit van proefstukken voor de faalmechanismen 2 en 3 zijn beschouwd. In Figuur 5.1 zijn de moment-krommingsrelaties gegeven van diverse proefstukken met een vloerdikte van 250 mm waarbij faalmechanisme 2 of 3 het bepalende bezwijkmechanisme is geweest. De weergegeven kromming is een gemiddelde kromming, bepaald over de lengte tussen de lastpunten van de vierpuntsbuigproeven (1,6 m). Aangenomen is dat de proefstukken waarbij faalmechanisme 1 bepalend is, geen ductiel gedrag vertonen. Deze proefstukken en dit faalmechanisme zijn daarom in dit hoofdstuk niet beschouwd.

De getoonde proeven zijn onder andere de proefstukken T13-T15 en T19-T21 uit [2]. Dit zijn proefstukken met breedplaten met een dikte van 70 mm en een effectieve lengte l_{eff} van de koppelwapening van 300 mm. De gemiddelde kubusdruksterkte van de druklaag van de proefstukken T13-T15 is circa 45 MPa. Voor de proefstukken T19-T21 is dit 18 MPa. In alle gevallen is het oppervlak van de breedplaat niet nabewerkt. De diepte van de tralieligger in de breedplaat d_{tr} is 27 mm. Deze proeven zijn alle bezweken volgens faalmechanisme 3 waarbij de weerstand bij faalmechanisme 2 lager lag dan de bezwijklast.

De andere proeven zijn T28-T30, T31-T33 en R4-R6 uit [1]. Hierbij is de hoogte van de breedplaat ook gelijk aan 70 mm en is de gemiddelde kubusdruksterkte van het beton van de druklaag gelijk aan 45 à 50 MPa. De effectieve lengte l_{eff} van de proefstukken T28-T30 en R4-R6 is gelijk aan 100 mm terwijl dit bij T31-T33 gelijk is aan 200 mm. Bij de proefstukken T28-T30 en T31-T33 is de bovenzijde van de breedplaat niet nabewerkt. De breedplaten van de proefstukken R4-R6 zijn door nabewerking aan de bovenzijde zeer ruw gemaakt. De diepte van de tralieliggers in de breedplaten d_{tr} is 37 mm. Bij deze groep proefstukken is faalmechanisme 2 het mechanisme waarbij de hoogste weerstand wordt gevonden. Na het falen van dit mechanisme wordt bij een toenemende vervorming op een lager niveau nog een weerstand gevonden waarna bezwijken optreedt als de tralieliggers uit het beton worden getrokken of breken. Dit lagere niveau wordt aan faalmechanisme 3 toegekend.



Figuur 5.1 Moment-Kromming relatie van verschillende proefstukken met een vloerdikte van 250 mm beschreven in [1] en [2]

Uit Figuur 5.1 blijkt dat van de van de proefserie T13-T15 en T19-T21 de proefstukken T13 en T19 enige vervormingscapaciteit hebben met behoud van weerstand. De overige 4 proefstukken van deze serie bezwijken minder ductiel, als de maximale weerstand bereikt is.

Bij de in [1] beschreven proeven is meer algemeen een gedrag aanwezig waarbij op het niveau van mechanisme 3, uittrekken van de tralieligger, enige ductiliteit beschikbaar is. Mogelijk is dit te wijten aan het feit dat bij deze proefstukken de tralieligger dieper in de breedplaat is ingebed.

Vooralsnog zijn er geen aanwijzingen om daar waar mechanisme 3 optreedt in combinatie met een relatief kleine effectieve lengte, andere uitgangspunten te hanteren voor de vervormingscapaciteit.

In het voorliggende hoofdstuk wordt voor de proefstukken zoals beschreven in bijlage A van [2], waarbij bezwijken is opgetreden door faalmechanisme 3, het moment-krommingsgedrag van de proefstukken beschreven door een bilineaire relatie. Vervolgens wordt voor de proefstukken zoals beschreven in [1] een bilineaire relatie beschreven voor het bezwijken door faalmechanisme 2.

5.2 Moment-krommingsrelaties faalmechanisme 3

5.2.1 Beschikbare gegevens

De beschikbare gegevens komen van de proeven zoals beschreven in bijlage A van [2]. De gerapporteerde experimenten zijn alle zogenaamde vierpuntsbuigproeven en maken deel uit van verschillende series van onderzoeken:

Proefstukken 1 t/m 7

Dit betreft een serie experimenten op BubbleDeck vloeren. Deze experimenten zijn uitgevoerd in het kader van het onderzoek naar de oorzaak van het bezwijken van de parkeergarage bij Eindhoven Airport. De hoogte van de beproefde vloerdelen was bij al deze proefstukken gelijk aan 450 mm. De proefstukken kenmerken zich door een geringe verankeringsdiepte van de tralieliggers in de prefab platen. Met uitzonderingen van de proefstukken 6 en 7 (KL34a en KL34b) zijn de proefstukken enigszins verschillend van elkaar, doch allen hebben een gelijke positionering van de tralieligger en een gelijke maximale diameter en lengte van de koppelwapening. Een uitgebreide beschrijving van de experimenten is opgenomen in bijlage X bij [4].

Proefstukken 8 t/m 22

Dit betreft een serie experimenten uitgevoerd op Cobiax vloeren (BC proefstukken). Deze experimenten zijn uitgevoerd met een tweeledig doel. Ten eerste om inzicht te krijgen in het gedrag van deze vloeren met een kritisch detail zoals dat in de laatste decennia door Cobiax is gebruikt. Ten tweede is de detaillering zoals uiteindelijk bij de herbouw van de parkeergarage is toegepast, beproeft bij de proefstukken serie BC5. De proefstukken 8 t/m 22 bestaat uit 5 series van 3 nagenoeg identieke proefstukken. De vloerdikte van de proefstukken is gelijk aan 450 mm, de koppelwapening heeft een maximale diameter van 20 mm en een variërende lengte. Ook de positie van de tralieligger is bij de diverse proefstukken gevarieerd. Een uitgebreide omschrijving van de experimenten is opgenomen in [5]. In deze beschrijving zijn ook proefstukken BC6 beschreven. Dit is een proefstuk met een 'kopvoeg' detaillering, waarbij het proefstuk asymmetrisch is belast in een 3 puntsbuigproef, zodat ter plaatse van het kritische detail ook een dwarskracht aanwezig was.

Proefstukken 23 t/m 43

Deze serie betreft experimenten uitgevoerd op massieve breedplaatvloeren, waarbij de breedplaten zijn vervaardigd met traditioneel beton (T1 t/m T24 en R1 t/m R3). Op voorstel van de bij het Betonhuis aangesloten breedplaatfabrikanten zijn een aantal variaties beschouwd, waarbij vooral gekeken is naar de grootste hoeveelheden koppelwapening die regelmatig in de praktijk werden toegepast: Ø16-150 en Ø12-150. In het algemeen zijn de tralieliggers op 400 mm vanaf de rand geplaatst. De dikte van de vloeren varieert tussen 300 en 250 mm. De proefstukken van de T-serie zijn vervaardigd met breedplaten die niet zijn nabewerkt aan de bovenzijde. De proefstukken van de R-serie (R1 t/m R3) zijn vervaardigd met nabewerkte breedplaten en hebben ook een grotere verankeringsdiepte van de tralieliggers. Deze proefstukken betreffen 7 series van ieder 3 identieke proefstukken. Een uitgebreide omschrijving van de proeven is opgenomen in [6].

Proefstukken 44 t/m 49

Experimenten uitgevoerd op massieve breedplaatvloeren, waarbij de breedplaten zijn vervaardigd met zelfverdichtend beton (ZG1 t/m ZG3 en ZR1 t/m ZR3). De proefstukken zijn grotendeels identiek aan proefstukken van de T-serie. Een uitzondering hierop is de druksterkte van het beton van de breedplaten. Al deze proefstukken zijn bezwaken door vloeit van de koppelwapening. Meer informatie over de proefstukken is opgenomen in [7].

5.2.2 Opzet van de uitwerking

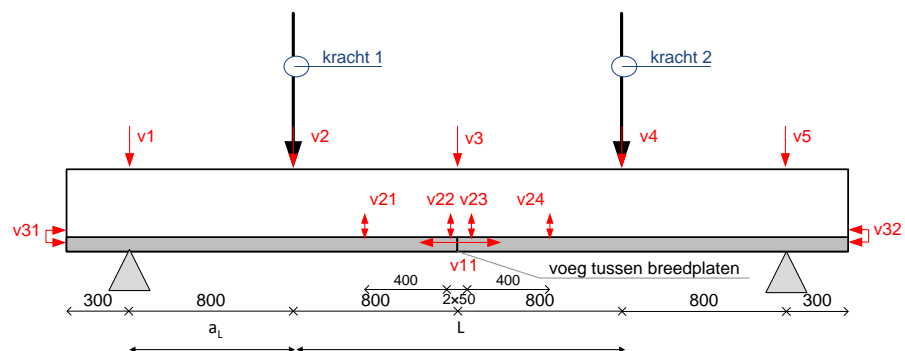
Een overzicht van de proefopstelling en meetpunten is gegeven in Figuur 5.2. De verhouding tussen moment en kromming is beschreven in de uitwerking van de meetresultaten van de diverse proefstukken en is bepaald op basis van de doorbuiging van de proefstukken midden tussen de twee lastpunten ten opzichte van de twee lastpunten (δ) en de aanname dat de kromming over de lengte tussen de twee lastpunten (L) die bij de beschouwde proeven op een onderlinge afstand van 1,6 meter zijn geplaatste constant is:

$$\kappa = \frac{8\delta}{L^2} \quad (9)$$

De belastingen waarbij de vervorming van de proefstukken is bepaald, zijn de gerapporteerde vijzelkrachten. Het moment ten gevolge van deze krachten is gelijk aan:

$$M = F_{\text{vijzel}} a_L \quad (10)$$

waarbij a_L gelijk is aan de afstand tussen de actiekracht en de reactiekracht. Deze is bij de experimenten 1 t/m 7 gelijk aan 0,816 m en bij de overige experimenten gelijk aan 0,8 m.



Figuur 5.2: Overzicht proefopstelling en meetpunten

Als eerste stap in het onderzoek wordt de M - κ -verhouding, die is bepaald voor de proefstukken die zijn bezweken door het bezwijken van het aansluitvlak, benaderd middels twee lineaire vergelijkingen, waarvan het knikpunt wordt beschreven door $M1$ en $\kappa1$ voor het knikpunt.

Vervolgens worden de gevonden vergelijkingen, gecorrigeerd voor het effect van het eigen gewicht van het proefstuk en de breedte van het proefstuk. Daarbij worden voor de proefstukken naast de vergelijkingen ook de gewijzigde karakteristieke punten ($M1$, $\kappa1$) en ($M2$, $\kappa2$) voor respectievelijk het knikpunt en het eindpunt van de relatie beschreven.

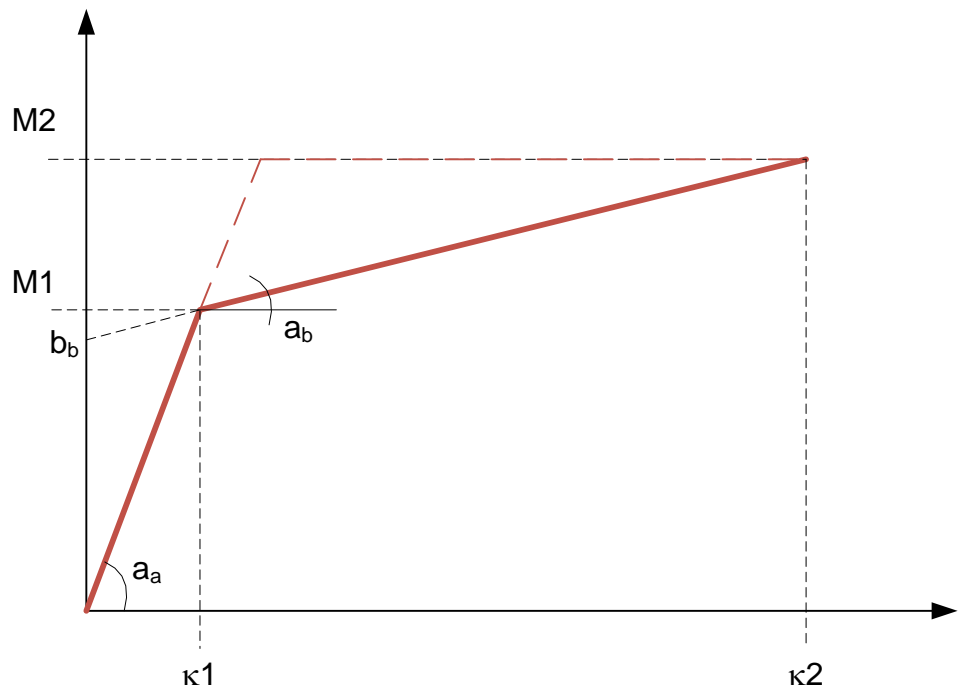
Vervolgens worden op basis van de verschillende variaties tussen de eigenschappen van de verschillende proefstukken, de waarden voor $M2$ en de a_a beschreven als functie van de proefstukeigenschappen.

5.2.3 Bepaling van de lineaire functies

5.2.3.1 Inleiding

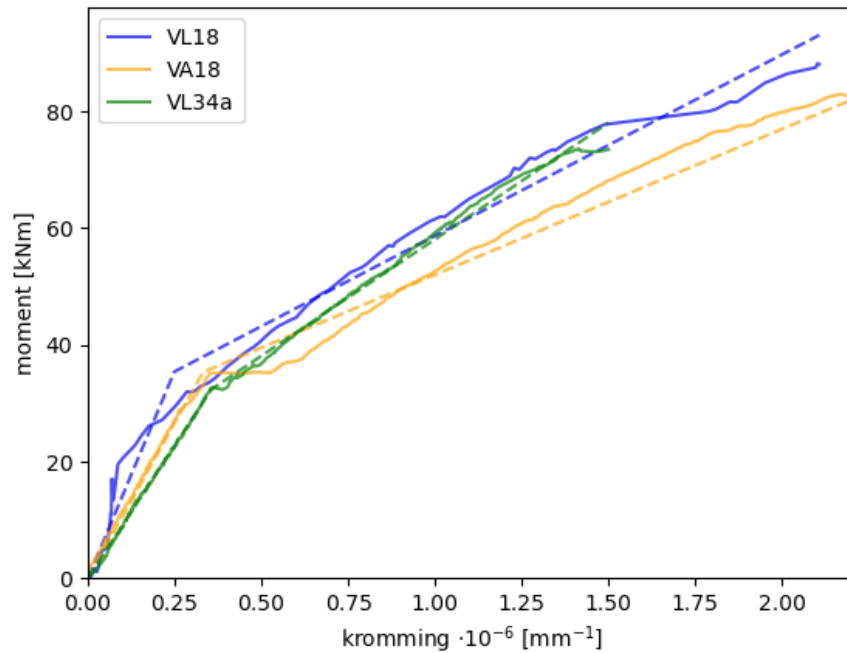
Hierna zijn, per aangegeven groep in bijlage A van [2], voor alle proefstukken de gebilineariseerde M - κ -relatie afgeleid uit de tijdens de onderzoeken vastgelegde meetwaarden. Het M - κ -diagram kan worden benaderd middels twee lineaire vergelijkingen van de vorm (zie tevens Figuur 5.3):

$$M(\kappa) = a_a \kappa \leq a_b \kappa + b_b \quad (11)$$



Figuur 5.3 Wijze van bilineair maken van de moment-krommingsrelatie

In Figuur 5.4 zijn voor de eerste drie proefstukken de gemeten M - κ -relatie en de fit van de M - κ -relatie geschetst. De grafische fit, op basis van de kleinste kwadraten methode, is voor alle proefstukken opgenomen in bijlage D van dit rapport. Tabel 5.1 bevat de relevante variabelen bepaald uit de fits. Hier geven a_a en a_b de stijging van respectievelijk de eerste en tweede fit en b_b is het moment bij afwezigheid van kromming voor de tweede fit (ofwel de kruising van de tweede fit met de verticale as).



Figuur 5.4 M - κ diagram. De meetdata zijn de volle lijnen en de fits zijn de gestreepte lijnen. Het snijpunt tussen de twee lineaire fits is het punt (M_1, κ_1) .

Tabel 5.1 Resultaten bepaling de lineaire fit waardes

Proefstuk	code	a_{a1}	a_{b1}	b_{b1}	M_{11}	κ_{11}
		$\text{kNm}/10^{-6} \text{ mm}^{-1}$	$\text{kNm}/10^{-6} \text{ mm}^{-1}$	kNm	kNm	10^{-3} m^{-1}
1	VL18	142.16	31.03	27.68	35.41	0.25
2	VA18	106.61	24.97	27.05	35.33	0.33
3	VL34a	90.99	39.93	18.17	32.38	0.36
4	KL18	82.62	18.70	42.12	54.45	0.66
5	KA18	105.38	18.54	46.37	56.27	0.53
6	KL34a	112.66	17.30	52.06	61.50	0.55
7	KL34b	106.70	19.38	44.43	54.29	0.51
15	BC 3-2	146.51	21.18	43.93	51.35	0.35
17	BC 4-1	136.41	18.23	46.98	54.23	0.40
18	BC 4-2	104.44	16.78	57.22	68.17	0.65
19	BC 4-3	130.71	17.56	57.87	66.85	0.51
23	T1	37.38	4.05	29.34	32.90	0.88
24	T2	23.57	2.63	41.01	46.16	1.96
25	T3	24.58	3.69	37.24	43.83	1.78
26	T4	30.00	5.43	42.57	51.98	1.73
27	T5	48.65	7.12	34.02	39.85	0.82
28	T6	26.66	6.86	19.00	25.57	0.96
29	T10	19.37	5.24	22.20	30.42	1.57
30	T11	19.79	5.33	32.56	44.58	2.25
31	T12	22.50	6.78	25.16	36.01	1.60
32	T13	8.14	1.74	23.93	30.43	3.74
33	T14	11.77	2.91	13.64	18.13	1.54
34	T15	9.66	2.12	19.16	24.55	2.54

Proefstuk	code	a_{a1}	a_{b1}	b_{b1}	$M1_1$	$\kappa1_1$
		kNm/10 ⁻⁶ mm ⁻¹	kNm/10 ⁻⁶ mm ⁻¹	kNm	kNm	10 ⁻³ m ⁻¹
35	T19	9.31	1.95	22.86	28.90	3.10
36	T20	9.51	2.67	14.15	19.68	2.07
37	T21	15.75	2.44	6.43	7.61	0.48
38	T22	16.53	6.92	28.92	49.76	3.01
39	T23	20.00	6.64	38.39	57.49	2.87
40	T24	18.44	6.55	36.41	56.46	3.06

5.2.3.2 Correctie voor het eigen gewicht

In de vorige paragraaf is vanuit een initieel moment van 0 en kromming van 0 gewerkt. In werkelijkheid is er een initieel moment M_{EG} aanwezig in het proefstuk tezamen met een bijbehorende beginkromming κ_{EG} . De waarden van $M1$ en $\kappa1$ moeten dus worden vergroot met respectievelijk een waarde M_{EG} en κ_{EG} . De waarden voor M_{EG} zijn berekend uit de gegevens van [1]. De waarden voor κ_{EG} zijn bepaald uit de lineaire fits, volgens de vergelijking $\kappa_{EG} = M_{EG}/a_a$. Deze correcties worden uitgevoerd na de eerste fit en bepalen van de hierboven genoemde variabelen. De enige waarde in de twee vergelijkingen gebruikt voor het fitten die verandert is b_b . De correctie hiervoor is van de vorm:

$$M1_2 = M1_1 + M_{EG} \quad (12)$$

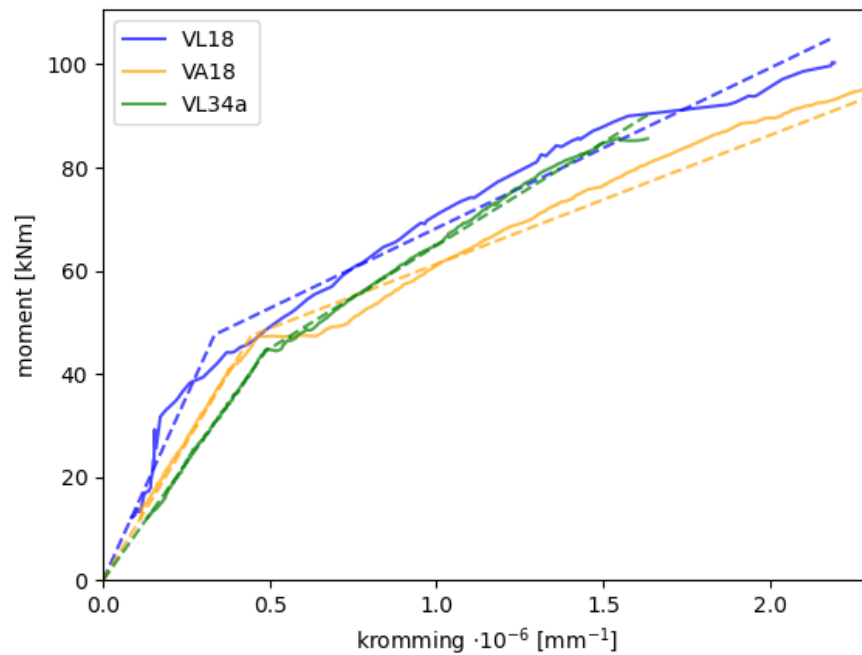
$$\kappa1_2 = \kappa1_1 + \kappa_{EG} \quad (13)$$

$$b_{b2} = b_{b1} + M_{EG} \left(1 - \frac{a_{b1}}{a_{a1}} \right) \quad (14)$$

De correcties voor het moment en de daaruit volgende kromming staan in Tabel 5.2, samen met de variabelen die door deze correctie zijn veranderd. Figuur 5.5 geeft hetzelfde diagram weer als Figuur 5.4 met correcties voor het eigengewicht. De diagrammen voor de overige proeven zijn te vinden in bijlage D.

Tabel 5.2 Moment en kromming ten gevolgen van het eigen gewicht, en de gecorrigeerde variabelen voor de fit vergelijkingen

Proefstuk	code	M_{EG}	κ_{EG}	a_{a2}	a_{b2}	b_{b2}
		kNm	10^{-3} m^{-1}	10^3 kNm	10^3 kNm	kNm
1	VL18	10.9	0.077	142.2	31.0	36.2
2	VA18	10.9	0.102	106.6	25.0	35.4
3	VL34a	10.9	0.120	91.0	39.9	24.3
4	KL18	10.9	0.132	82.6	18.7	50.5
5	KA18	10.9	0.103	105.4	18.5	55.3
6	KL34a	10.9	0.097	112.7	17.3	61.3
7	KL34b	10.9	0.102	106.7	19.4	53.3
15	BC 3-2	10.7	0.073	146.5	21.2	53.1
17	BC 4-1	10.7	0.078	136.4	18.2	56.2
18	BC 4-2	10.7	0.102	104.4	16.8	66.2
19	BC 4-3	10.7	0.082	130.7	17.6	67.1
23	T1	8.9	0.238	37.4	4.1	37.3
24	T2	8.9	0.377	23.6	2.6	48.9
25	T3	8.9	0.362	24.6	3.7	44.8
26	T4	8.9	0.296	30.0	5.4	49.9
27	T5	8.9	0.183	48.7	7.1	41.6
28	T6	8.9	0.334	26.7	6.9	25.6
29	T10	8.9	0.459	19.4	5.2	28.7
30	T11	8.9	0.449	19.8	5.3	39.1
31	T12	8.9	0.395	22.5	6.8	31.4
32	T13	7.4	0.910	8.1	1.7	29.8
33	T14	7.4	0.630	11.8	2.9	19.2
34	T15	7.4	0.767	9.7	2.1	24.9
35	T19	7.4	0.796	9.3	2.0	28.7
36	T20	7.4	0.779	9.5	2.7	19.5
37	T21	7.4	0.470	15.8	2.4	12.7
38	T22	8.9	0.538	16.5	6.9	34.1
39	T23	8.9	0.445	20.0	6.6	44.3
40	T24	8.9	0.482	18.4	6.6	42.1



Figuur 5.5 M - κ diagram, met gefitte lijnen en gecorrigeerd voor het eigen gewicht. De meetdata zijn de volle lijnen en de fits zijn de gestreepte lijnen. Het snijpunt tussen de twee lineaire fits is het punt M_1 , κ_1 .

5.2.3.3 Correctie voor verschillende breedten van de proefstukken

Om de definitieve waarden van de variabelen a_a , a_b en b_b te verkrijgen, is nog een correctie voor de breedte van de proefstukken nodig. De breedte van de proefstukken is verschillend. Hiervoor is een correctie van de factoren aangebracht overeenkomstig de volgende relaties:

$$a_a = a_{a2}/b$$

$$a_b = a_{b2}/b$$

$$b_b = b_{b2}/b$$

waarin b de breedte van het proefstuk is in meters. Door deze correctie is de eenheid van de momenten gelijk aan kNm/m oftewel kN. De resultaten van de correctie zijn gegeven in Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Resultaten bepaling a_a , a_b en b_b na correctie voor proefstukbreedte

Proefstuk	code	b	a_a	a_b	b_b
		m	10^3 kNm	10^3 kNm	kN
1	VL18	0.8	177.7	38.8	45.2
2	VA18	0.8	133.3	31.2	44.2
3	VL34a	0.8	113.7	49.9	30.4
4	KL18	0.8	103.3	23.4	63.2
5	KA18	0.8	131.7	23.2	69.2
6	KL34a	0.8	140.8	21.6	76.6
7	KL34b	0.8	133.4	24.2	66.7
15	BC 3-2	0.8	183.1	26.5	66.3
17	BC 4-1	0.8	170.5	22.8	70.3
18	BC 4-2	0.8	130.6	21.0	82.7
19	BC 4-3	0.8	163.4	22.0	83.9
23	T1	1	37.4	4.1	37.3
24	T2	1	23.6	2.6	48.9
25	T3	1	24.6	3.7	44.8
26	T4	1	30.0	5.4	49.9
27	T5	1	48.7	7.1	41.6
28	T6	1	26.7	6.9	25.6
29	T10	1	19.4	5.2	28.7
30	T11	1	19.8	5.3	39.1
31	T12	1	22.5	6.8	31.4
32	T13	1	8.1	1.7	29.8
33	T14	1	11.8	2.9	19.2
34	T15	1	9.7	2.1	24.9
35	T19	1	9.3	2.0	28.7
36	T20	1	9.5	2.7	19.5
37	T21	1	15.8	2.4	12.7
38	T22	1	16.5	6.9	34.1
39	T23	1	20.0	6.6	44.3
40	T24	1	18.4	6.6	42.1

5.2.3.4 Bepaling waarden voor $M1$, $\kappa1$, $M2$ en $\kappa2$

Hierna zijn op basis van de voorgaande waarden en de bezwijkmomenten van de proefstukken de waarden voor $M1$, $\kappa1$, $M2$ en $\kappa2$ bepaald. Hierbij zijn de volgende relaties gehanteerd:

$$M1 = \frac{a_a b_b}{a_a - a_b} \quad (15)$$

$$\kappa1 = \frac{b_b}{a_a - a_b} \quad (16)$$

$$M2 = \frac{F_{\text{vijzel}} a_L + M_{EG}}{b} \quad (17)$$

$$\kappa2 = a_b M2 + b_b \quad (18)$$

waarin F_{vijzel} de maximale gemiddelde kracht in de vijzels is bij het experiment en a de afstand is tussen de vijzels en de steunpunten.

Tabel 5.4 Resultaten voor $M1$, $\kappa1$, $M2$ en $\kappa2$

Proefstuk	code	F_{vijzel}	a_L	$M1$	$\kappa1$	$M2$	$\kappa2$
		kN	m	kNm/m	10^{-6} mm ⁻¹	kNm/m	10^{-6} mm ⁻¹
1	VL18	110	0.816	57.9	0.33	125.8	2.08
2	VA18	118	0.816	57.8	0.43	134.0	2.88
3	VL34a	120	0.816	54.1	0.48	136.0	2.12
4	KL18	110	0.816	81.7	0.79	125.8	2.68
5	KA18	113	0.816	84.0	0.64	128.9	2.58
6	KL34a	107	0.816	90.5	0.64	122.8	2.13
7	KL34b	94	0.816	81.5	0.61	109.5	1.77
15	BC 3-2	258	0.8	77.5	0.42	271.3	7.74
17	BC 4-1	270	0.8	81.1	0.48	283.3	9.35
18	BC 4-2	263	0.8	98.6	0.75	276.3	9.23
19	BC 4-3	275	0.8	96.9	0.59	288.3	9.31
23	T1	102	0.8	41.8	1.12	90.5	13.14
24	T2	111	0.8	55.1	2.34	97.7	18.55
25	T3	108	0.8	52.7	2.14	95.3	13.68
26	T4	172	0.8	60.9	2.03	146.5	17.80
27	T5	156	0.8	48.7	1.00	133.7	12.93
28	T6	125	0.8	34.5	1.29	108.9	12.14
29	T10	108	0.8	39.3	2.03	95.3	12.71
30	T11	131	0.8	53.5	2.70	113.7	14.00
31	T12	99	0.8	44.9	2.00	88.1	8.37
32	T13	74	0.8	37.8	4.65	66.6	21.18
33	T14	54	0.8	25.5	2.17	50.6	10.79
34	T15	79	0.8	32.0	3.31	70.6	21.54
35	T19	79	0.8	36.3	3.90	70.6	21.48
36	T20	76	0.8	27.1	2.85	68.2	18.25
37	T21	61	0.8	15.0	0.95	56.2	17.84
38	T22	183	0.8	58.6	3.55	155.3	17.51
39	T23	188	0.8	66.4	3.32	159.3	17.31
40	T24	169	0.8	65.4	3.54	144.1	15.56

5.2.3.5 Verificatie $M2$

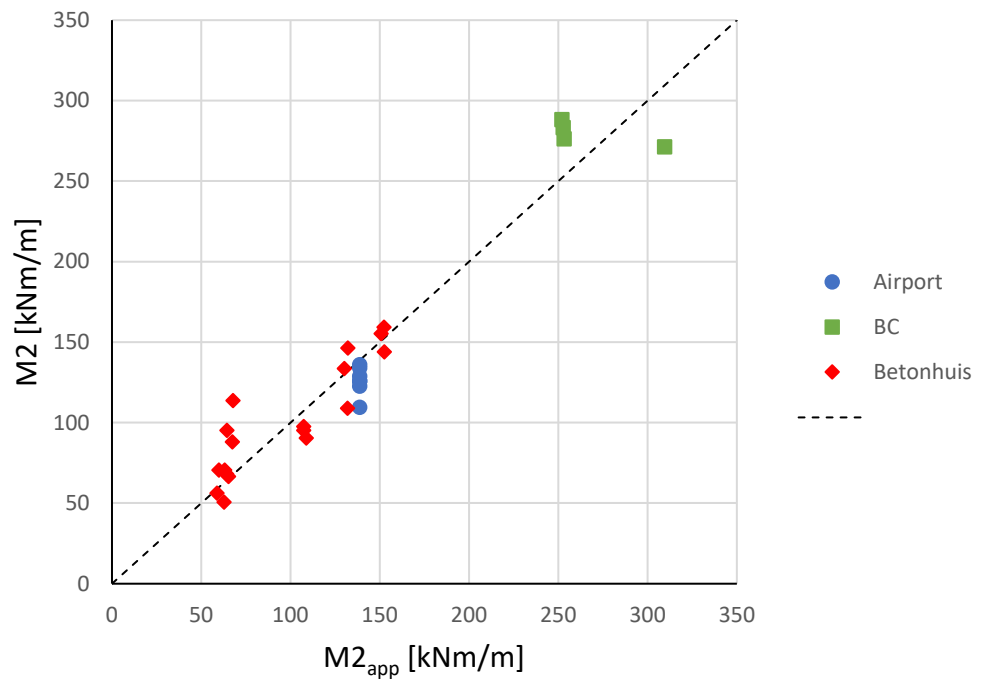
De relatie tussen $M2$ en de diverse variabele eigenschappen van de proefstukken is reeds in 2.3.2 beschreven. Van de hier beschouwde proefstukken, is het uittrekken van de tralieligger steeds maatgevend geweest. De gemiddelde waarde van de maximale trekkracht in de koppelwapening bij uittrekken tralieligger $F_{R,\text{uit},m}$ is beschreven door vergelijking (4).

De momentweerstand die uit deze maximale trekkracht volgt is te benaderen middels:

$$M_{2,\text{app}} = F_{R,\text{uit},m} 0,91 (h - h_b) \quad (19)$$

waarin h_b de dikte van de breedplaat is.

In Figuur 5.6 is voor de beschouwde proeven de experimenteel bepaalde waarde voor $M2$ uitgezet tegen de benadering $M_{2,\text{app}}$. De gemiddelde waarde van de verhouding $M_{2,\text{app}}/M2$ is gelijk aan 1,0. De variatiecoëfficiënt is hierbij gelijk aan 0,16.



Figuur 5.6 Vergelijking benadering $M2_{app}$ met experimenteel bepaalde waarde $M2$

5.2.3.6 Bepaling buigstijfheid

De initiële waarde van de buigstijfheid is te beschrijven als:

$$EI = \frac{M1}{\kappa^1} = a_a \quad (20)$$

Hierna wordt nagegaan of de variabele a_a kan worden beschreven op basis van de bekende eigenschappen van de proefstukken.

Als eerste wordt aangehouden:

$$EI_{app} = \alpha_{aa} E_{cm,druklaag} \frac{b(h-h_b)^3}{12}$$

Als EI_{app} gelijk wordt gesteld aan a_a kan de grootte van α_{aa} voor ieder proefstuk worden berekend. De resultaten zijn beschreven in Tabel 5.5 hierna.

Tabel 5.5 Resultaten voor α_{aa}

Proefstuk	code	a_a	$E_{cm,druk}$	I	α_{aa}
		kNm	kN/m ²	m ³	
1	VL18	1.78E+05	2.54E+07	4.57E-03	1.53
2	VA18	1.33E+05	2.60E+07	4.57E-03	1.12
3	VL34a	1.14E+05	2.88E+07	4.57E-03	0.86
4	KL18	1.03E+05	2.54E+07	4.57E-03	0.89
5	KA18	1.32E+05	2.60E+07	4.57E-03	1.11
6	KL34a	1.41E+05	2.82E+07	4.57E-03	1.09
7	KL34b	1.33E+05	2.92E+07	4.57E-03	1.00
15	BC 3-2	1.83E+05	3.16E+07	3.89E-03	1.49
17	BC 4-1	1.71E+05	3.05E+07	3.89E-03	1.44

Proefstuk	code	a_a	$E_{cm,druk}$	I	α_{aa}
		kNm	kN/m ²	m ³	
18	BC 4-2	1.31E+05	3.06E+07	3.89E-03	1.10
19	BC 4-3	1.63E+05	3.05E+07	3.89E-03	1.38
23	T1	3.74E+04	2.93E+07	1.01E-03	1.26
24	T2	2.36E+04	2.89E+07	1.01E-03	0.80
25	T3	2.46E+04	2.90E+07	1.01E-03	0.84
26	T4	3.00E+04	2.94E+07	1.01E-03	1.01
27	T5	4.87E+04	2.94E+07	1.01E-03	1.63
28	T6	2.67E+04	2.95E+07	1.01E-03	0.89
29	T10	1.94E+04	3.09E+07	1.01E-03	0.62
30	T11	1.98E+04	3.10E+07	1.01E-03	0.63
31	T12	2.25E+04	3.10E+07	1.01E-03	0.72
32	T13	8.14E+03	3.07E+07	4.86E-04	0.55
33	T14	1.18E+04	3.13E+07	4.86E-04	0.77
34	T15	9.66E+03	3.12E+07	4.86E-04	0.64
35	T19	9.31E+03	2.37E+07	4.86E-04	0.81
36	T20	9.51E+03	2.37E+07	4.86E-04	0.83
37	T21	1.58E+04	2.41E+07	4.86E-04	1.35
38	T22	1.65E+04	2.69E+07	1.01E-03	0.61
39	T23	2.00E+04	2.69E+07	1.01E-03	0.73
40	T24	1.84E+04	2.70E+07	1.01E-03	0.67

De gemiddelde waarde van α_{aa} is gelijk aan 0,98 met een variatiecoëfficiënt van 0,31. De buigstijfheid kan derhalve voor het beoogde doel redelijk benaderd worden door de buigstijfheid van de druklaag te beschouwen.

5.3 Moment-krommingsrelaties faalmechanisme 2

5.3.1 Inleiding

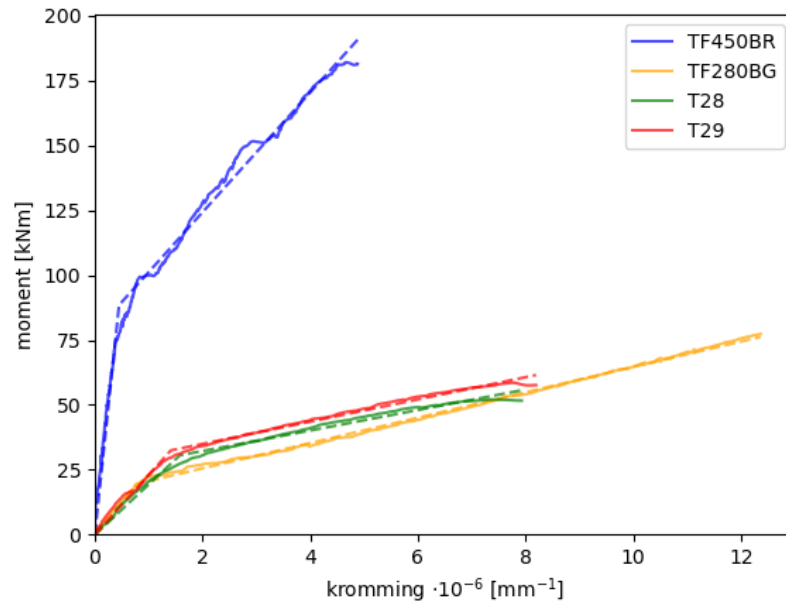
Beschouwd zijn de proefstukken TF450BR, TF280BG-19 [2] en T28 tot en met T33 [1]. Bij deze proefstukken heeft mechanisme 2 de grootste weerstand en is daarmee bepalend voor bezwijken.

5.3.2 Bepaling van de lineaire functies

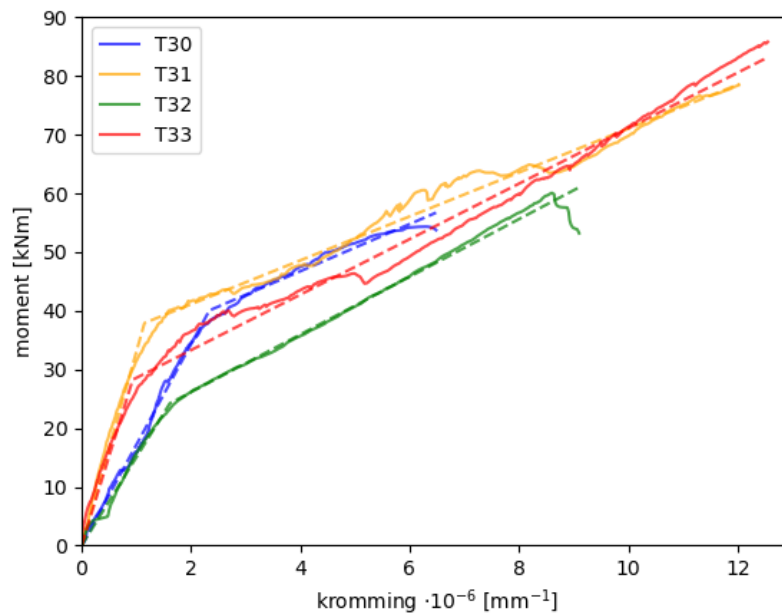
5.3.2.1 Eerste fit

Hierna zijn voor alle proefstukken de gemeten en benaderde bilineaire M - κ -relaties grafisch beschreven. Het M - κ -diagram is benaderd middels twee lineaire vergelijkingen zoals in 5.2.3.1 beschreven.

In Figuur 5.7 en Figuur 5.8 zijn voor de proefstukken de gemeten M - κ -relatie en de fit van de M - κ -relatie geschetst. Tabel 5.6 bevat de relevante variabelen die zijn bepaald uit de fits.



Figuur 5.7 M - κ diagram van TF450BR, TF280BG-19, T28 en T29. De meetdata zijn de volle lijnen en de fits zijn de gestreepte lijnen. Het snijpunt tussen de twee lineaire fits is het punt ($M1$, $\kappa1$).



Figuur 5.8 M - κ diagram van T30 tot en met T33. De meetdata zijn de volle lijnen en de fits zijn de gestreepte lijnen. Het snijpunt tussen de twee lineaire fits is het punt ($M1$, $\kappa1$).

Tabel 5.6 Resultaten bepaling de lineaire fit waardes

Proef- stuk	code	a_{a1}	a_{b1}	b_{b1}	$M1_1$	$\kappa1_1$
		kNm/ 10^{-6} mm^{-1}	kNm/ 10^{-6} mm^{-1}	kNm	kNm	10^{-3} m^{-1}
50	TF450BR	206,1	28,4	69,7	80,8	0,39
51	TF280BG- 19	25,5	4,9	15,8	19,5	0,77
80	T28	19,4	3,9	24,4	30,6	1,58
81	T29	23,1	4,3	26,4	32,5	1,41
82	T30	17,1	4,0	30,7	40,0	2,34
83	T31	33,0	3,7	33,6	37,9	1,15
84	T32	15,0	4,9	16,3	24,2	1,61
85	T33	30,2	4,7	23,8	28,3	0,93

5.3.2.2 Correctie voor het eigen gewicht

De correctie voor het eigen gewicht is uitgevoerd zoals beschreven in 5.2.3.2. De resultaten zijn beschreven in Tabel 5.7 .

Tabel 5.7 Moment en kromming ten gevolgen van het eigen gewicht, en de gecorrigeerde variabelen voor de fit vergelijkingen

Proef- stuk	code	M_{EG}	κ_{EG}	a_{a2}	a_{b2}	b_{b2}
		kNm	10^{-3} m^{-1}	10^3 kNm	10^3 kNm	kNm
50	TF450BR	10,7	0,052	206,1	28,4	78,9
51	TF280BG-19	6,6	0,259	25,5	4,9	21,1
80	T28	11,9	0,613	19,4	3,9	33,9
81	T29	11,9	0,516	23,1	4,3	36,1
82	T30	11,9	0,694	17,1	4,0	39,8
83	T31	11,9	0,361	33,0	3,7	44,2
84	T32	11,9	0,793	15,0	4,9	24,3
85	T33	11,9	0,394	30,2	4,7	33,9

5.3.2.3 Correctie voor verschillende breedten van de proefstukken

De correctie voor verschillende breedten is uitgevoerd zoals beschreven in 5.2.3.3. De resultaten van de correctie zijn gegeven in Tabel 5.8.

Tabel 5.8 Resultaten bepaling a_a , a_b en b_b na correctie voor proefstukbreedte

Proef- stuk	code	b	a_a	a_b	b_b
		m	10^3 kNm	10^3 kNm	kN
50	TF450BR	0,8	257,7	35,5	98,6
51	TF280BG-19	0,8	31,9	6,1	26,4
80	T28	1,6	12,1	2,5	21,2
81	T29	1,6	14,4	2,7	22,6
82	T30	1,6	10,7	2,5	24,9
83	T31	1,6	20,6	2,3	27,6
84	T32	1,6	9,4	3,1	15,2
85	T33	1,6	18,9	3,0	21,2

5.3.2.4 Bepaling waarden voor $M1$, $\kappa1$, $M2$ en $\kappa2$

De definitieve waarden van $M1$, $\kappa1$, $M2$ en $\kappa2$ zijn bepaald zoals in 5.2.3.4 is beschreven en zijn samengevat in Tabel 5.9.

Tabel 5.9 Resultaten voor $M1$, $\kappa1$, $M2$ en $\kappa2$

Proef stuk	code	F_{vijzel} kN	a_L m	$M1$ kNm/ m	$\kappa1$ 10^{-3} m^{-1}	$M2$ kNm/m	$\kappa2$ $10^{-3} m^{-1}$
50	TF450BR	191,5	0,8	114,4	0,44	205	2,99
51	TF280BG-19	97,9	0,8	32,7	1,02	106	13,07
80	T28	65,1	0,8	26,6	2,19	40	7,65
81	T29	73,2	0,8	27,7	1,92	44	8,02
82	T30	67,9	0,8	32,5	3,03	41	6,59
83	T31	98,3	0,8	31,1	1,51	57	12,40
84	T32	75,1	0,8	22,6	2,41	45	9,71
85	T33	109,8	0,8	25,1	1,33	62	13,93

6 Kopvoeg-proefstukken

6.1 Algemeen

De voorgaande hoofdstukken betreffen doorsneden met een positief moment ter plaatse van langsvoeegen tussen breedplaten. Echter, ook in doorsneden bij een naad aan het einde van een breedplaat (korte zijde) kan een positief moment optreden. Bij de naden aan het einde van een breedplaat, hierna aangeduid als kopvoegen, zijn tralieliggers aanwezig in de richting loodrecht op de naad welke 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. In paragraaf 6.3 van [2] is ingegaan op de weerstand van het aansluitvlak bij kopvoegen. Vooralnog is hiervoor aangehaakt bij de reguliere rekenregels uit NEN-EN 1992-1-1. Tijdens de discussie over rekenregels voor deze detaillering is gesproken over de eventuele invloed van de afstand tussen de tralieliggers, in het algemeen gelijk aan 800 mm, 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. Het is vooralnog niet aangetoond dat het gemiddelde gedrag van het aansluitvlak overeenkomt met de waarden die volgen uit een beschouwing volgens NEN-EN 1992-1-1.

In het kader van het vanaf 2020 uitgevoerde onderzoek zijn daarom ook experimenten uitgevoerd 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 stuks beproefd. De proefstukken KV1-KV3 zijn proefstukken met een breedte van 1,6 meter waarbij de tralieliggers op een hart-op-hart-afstand van 800 mm zijn geplaatst. De hoeveelheid koppelwapening is zo gekozen dat op basis van de rekenregels in NEN-EN 1992-1-1 bezwijken van het aansluitvlak mag worden verwacht voordat de koppelwapening gaat vloeien. De proefstukken KV4-KV6 zijn identiek aan de proefstukken KV1-KV3 behoudens dat de tralieliggers met een hart-op-hart-afstand van 400 mm zijn aangebracht bij een gelijkblijvende totale hoeveelheid wapeningsdoorsnede van de diagonalen in het aansluitvlak. Dit is verkregen door bij de proefstukken KV4-KV6 de helft van de diagonalen van de toegepaste tralieliggers weg te knippen.

Een uitgebreide beschrijving van de proefstukken, de opstelling en de resultaten van de proeven is opgenomen in hoofdstuk 4 van [1].

Tot slot wordt opgemerkt dat het aantal van zes uitgevoerde proeven onvoldoende is om statistisch te onderbouwen dat de rekenregels voor aansluitvlakken in NEN-EN 1992-1-1 geschikt zijn om in het geval van kopvoegen de afschuifweerstand van aansluitvlakken te bepalen. Echter met de proeven kan wel worden nagegaan of er een invloed is van de onderlinge afstand van de tralieliggers. Zoals hiervoor aangegeven is hierbij uitgegaan van de in de praktijk gebruikelijke maximale afstand van 800 en een afstand van 400mm.

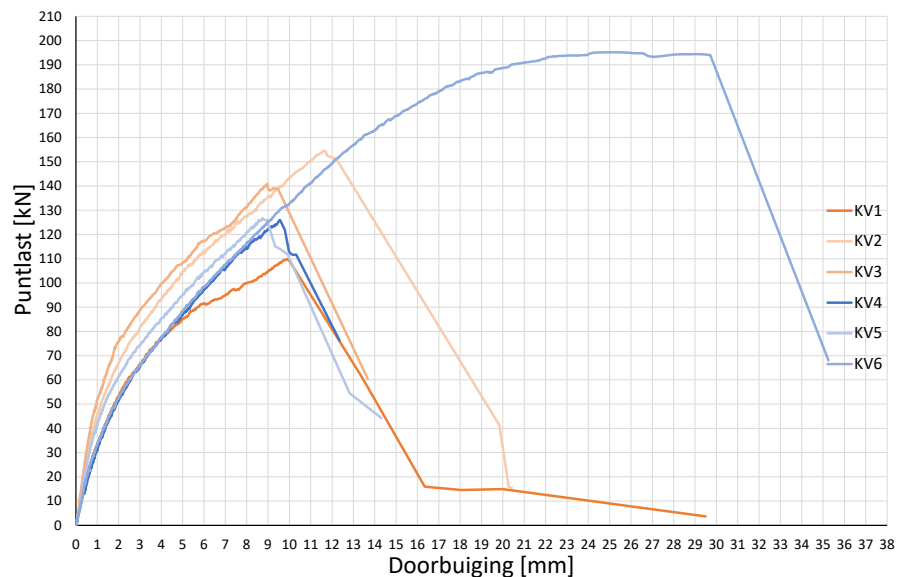


Foto 6.1 Proefstuk KV2 (links) en KV4 (rechts) voor het storten van de druklaag

6.2 Samenvatting en uitwerking proefresultaten

De resultaten van de KV- proefstukken zijn geanalyseerd op een wijze zoals ook in [2] is gedaan. Voor proefstuk KV2 is dit uitgebreid beschreven in bijlage B van dit rapport.

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 6.2 zichtbaar. Uit de figuur blijkt dat de proefstukken KV1 tot en met KV5 zich redelijk gelijk gedragen. Bij proefstuk KV6 kon de belasting significant hoger opgevoerd worden en bereikt deze het niveau waarbij de wapening gaat vloeien. Toch is ook dit proefstuk bezweken door het bezwijken van het aansluitvlak.



Figuur 6.2 Relatie tussen gemiddelde puntlast en doorbuiging van de KV-proefstukken

In Tabel 6.1 zijn naast de variërende betoneigenschappen en de maximale vijzelkracht, de maximale trekkracht in de koppelwapening (bepaald conform [2] en paragraaf 2.2 van dit rapport) en de gemiddelde schuifspanning in het effectieve aansluitvlak beschreven. Het effectieve oppervlak wordt bepaald door de breedte

van het proefstuk en de afstand tussen daar waar de tralieligger start, nabij het einde van de breedplaat, en het einde van de koppelwapening.

Tabel 6.1 Samenvatting en uitwerking van de proefresultaten

Proefstuk- code:	gemiddelde kubusdruksterkte breedplaat	gemiddelde kubusdruksterkte druklaag	maximale puntlast per vijzel:	maximale trekkracht in de koppel- wapening	gemiddelde schuifspanning in het effectieve aansluitvlak
	[MPa]	[MPa]	[kN]	[kN]	[MPa]
KV1	50,4	52,3	109,8	594	0,682
KV2	50,4	49,0	154,7	810	0,932
KV3	50,4	49,0	140,9	744	0,856
KV4	51,1	50,9	125,9	671	0,772
KV5	51,1	50,9	126,7	675	0,776
KV6	51,1	52,3	195,2	1000	1,157

Om te verifiëren of de rekenregel in artikel 6.2.5 van NEN-EN 1992-1-1 gebruikt kan worden, wordt voor de proefstukken ook de rekenwaarde van de afschuifsterkte v_{Rd} bepaald volgens het betreffende artikel. De rekenwaarde van de afschuifsterkte is als volgt bepaald.

Gelijk aan [2] is uitgegaan van de volgende relatie tussen de gemiddelde kubusdruksterkte en de gemiddelde betondruksterkte f_{cm} :

$$f_{cm} = 0,851 f_{cm,cube} + 3 \text{ MPa} \quad (21)$$

Vervolgens is de waarde van de rekenwaarde van de treksterkte als volgt bepaald:

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (22)$$

$$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad \text{als } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (23)$$

$$= 2,12 \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10} \right)^{2/3} \quad \text{als } f_{ck} > 50 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 0,7 \frac{f_{ctm}}{1,5} \quad (24)$$

De waarde van de afschuifsterkte volgt dan uit:

$$v_{Rd} = c f_{ctd} + \rho f_{yd} \mu \sin \alpha \quad (25)$$

waarin c en μ volgen uit Tabel 6.2. De afwerking van het aansluitvlak van alle proefstukken is beoordeeld als glad. De variabelen ρ en α worden bepaald door de geometrie van de toegepaste tralieliggers. Deze geometrie is voor alle proefstukken gelijk, behoudens dat voor de proefstukken KV4-KV6 het aantal tralieliggers verdubbeld is en het aantal diagonalen per tralieligger gehalveerd is.

Tabel 6.2 variabelen c en μ volgens 6.2.5 van NEN-EN 1992-1-1

afwerking	c	μ
zeer glad	0,025	0,5
glad	0,20	0,6
ruw	0,40	0,7
zeer ruw	0,50	0,9

Uitgaande van een diagonaaldiameter van 5 mm, een tralieliggersysteemplengte van 200 mm, 4 diagonalen per systeemplengte en een effectieve lengte gelijk aan 475 mm is de hoeveelheid aansluitvlak doorkruisende wapening in het proefstuk gelijk aan 373 mm². De hoek α tussen de normaal van de diagonalen en het aansluitvlak is 60°. Bij het bepalen van de afschuifsterkte is aangenomen dat f_{yd} gelijk is aan 435 MPa. Op basis van deze waarden en de in Tabel 6.1 gegeven materiaaleigenschappen is de afschuifsterkte v_{Rd} van de betreffende aansluitvlakken bepaald. Het resultaat is opgenomen in Tabel 6.3, samen met de gemiddelde schuifspanning in het aansluitvlak en de verhouding tussen beide.

Tabel 6.3 Vergelijking maximaal optredende schuifspanning met rekenwaarde afschuifsterkte

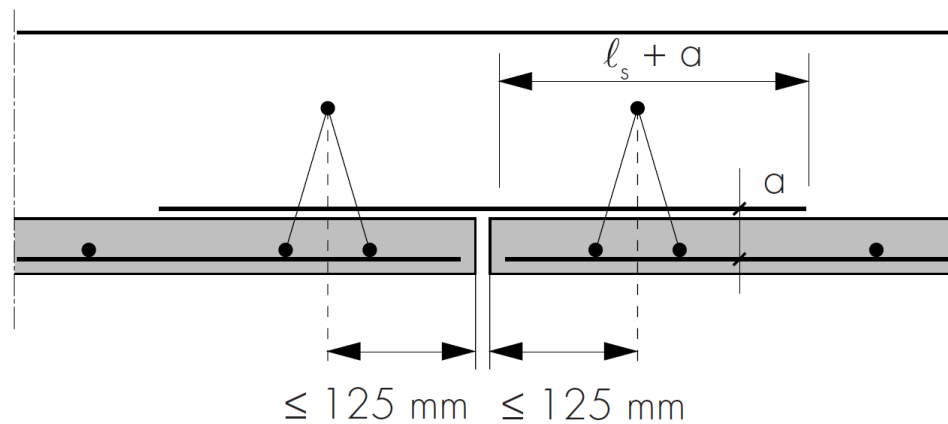
Proefstuk- code:	maatgevende waarde f_{ctd} [MPa]	v_{Rd} [MPa]	gemiddelde schuifspanning in het effectieve aansluitvlak tijdens proef [MPa]	verhouding gemiddelde schuifspanning tijdens proef en v_{Rd} [-]	gemiddelde
KV1	1,58	0,427	0,682	1,60	
KV2	1,55	0,420	0,932	2,22	1,95
KV3	1,55	0,420	0,856	2,04	
KV4	1,59	0,429	0,772	1,80	
KV5	1,59	0,429	0,776	1,81	2,10
KV6	1,60	0,430	1,157	2,69	

De verhouding tussen de voorspelling van de rekenwaarde van de opneembare schuifspanning en de gemiddelde schuifspanning in de proeven, is orde grootte gelijk aan die in [2] voor langsvogen werd gevonden. Er is ook geen significant verschil tussen de proeven met 2 tralieliggers en de proeven met 4 tralieliggers. Er wordt daarom geconcludeerd dat de resultaten van de uitgevoerde proeven geen aanwijzing geven dat hetgeen in paragraaf 6.3 van [2] over de bepaling van de afschuifsterkte van het aansluitvlak bij kopvoegen is gesteld, niet juist is. Of dit ook van toepassing is bij een grotere h.o.h. afstand van de tralieliggers dan 800 mm kan op basis van deze proeven niet aangetoond worden.

7 Korte beschouwing proeven KU Leuven

7.1 Inleiding

Reeds voor het gedeeltelijk bezwijken van de constructie van de parkeergarage bij Eindhoven Airport werd aan de KU Leuven onderzoek uitgevoerd op breedplaten met de focus op de eigenschappen van het zogenaamde kritische detail. Daarnaast waren er via de Belgische richtlijn TV223, uitgegeven door WTCB [6], sinds 2002 reeds aanwijzingen over de wijze waarop het kritische detail bij essentiële afdracht over de langsvoeg uitgevoerd moet worden. Daarbij is aangegeven dat de tralieliggers op een niet grotere afstand dan 125 mm vanaf de langsvoeg moeten zijn geplaatst (Figuur 7.1). In hetzelfde document vereist men ook een minimale nominale betondekking van 10 mm van de koppelwapening ten opzichte van het bovenvlak van de breedplaat. Dit is wezenlijk afwijkend van wat in Nederland tot in 2017 gebruikelijk was, namelijk een tralieligger op 400 mm vanaf de naad en koppelwapening direct op de breedplaat geplaatst.



Figuur 7.1 Afbeelding kritische detail uit TV223 [6]

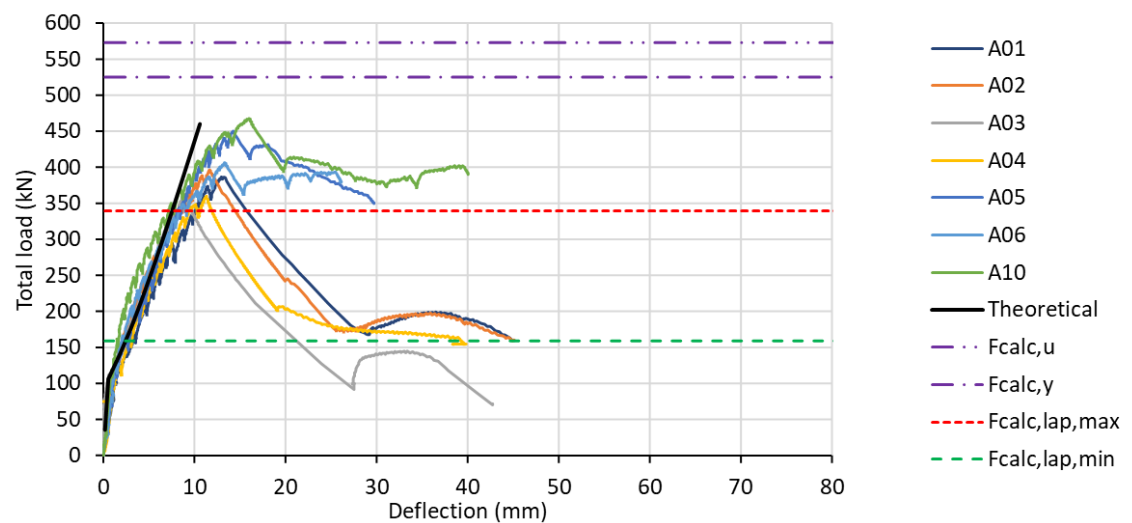
7.2 Belgische experimentele resultaten

De resultaten van de proeven staan vermeld in een publicatie van Molkens en Van Gijssel in Applied Science [7]. In dit artikel worden de resultaten van vier series van proeven beschreven. Het betreffen de series A t/m D, waarbij onder andere variaties in hoogte, breedte, hoeveelheid koppelwapening, het wel of niet toepassen van gewichtsbesparende elementen, het wel of niet nabewerken van de bovenzijde van de breedplaten en de positie van de tralieligger zijn aangebracht. De proeven van serie A, C en D zijn uitgevoerd met een 4-puntsbuigproef zoals dat ook in het in [8] beschreven onderzoek is gedaan. De proefstukken van serie B, die een kleinere lengte hebben, zijn beproefd met een 3-puntsbuigproef. Hierna wordt in detail ingegaan op serie A, C en D.

Bij de proefstukken van serie A is relatief gezien de grootste hoeveelheid koppelwapening aangebracht, 6Ø16 over een breedte van 900 mm. De lengte van deze koppelstaven is redelijk overeenkomstig de lengte die voorheen in Nederland gebruikelijk was.

Volgens de Belgische regelgeving is voor deze wapening echter slechts een staafkracht tot ongeveer 75 % van de vloekracht toegelaten. De proefstukken vertonen zowel wat betreft geometrie als wat betreft bezwijklast een redelijke overeenkomst met de proefstukken T4 t/m T12, T22 t/m T24 en R1 t/m T3 die in [3] zijn beschreven.

Als het last-ervormingsgedrag van de proefstukken in serie A wordt beschouwd (zie Figuur 7.2), dan blijkt dat de proefstukken het belastingsniveau waarbij vloeit van de koppelwapening op zou gaan optreden niet halen. De bezwijkwaarde ligt lager dan de waarde die bij vloeit bereikt zou worden $F_{calc,y}$. Deze proefstukken bezwijken volgens de onderzoekers door slip van de wapening bij een lagere waarde dan dat in Nederland tot voor kort bij het ontwerp van het kritische detail werd aangenomen.



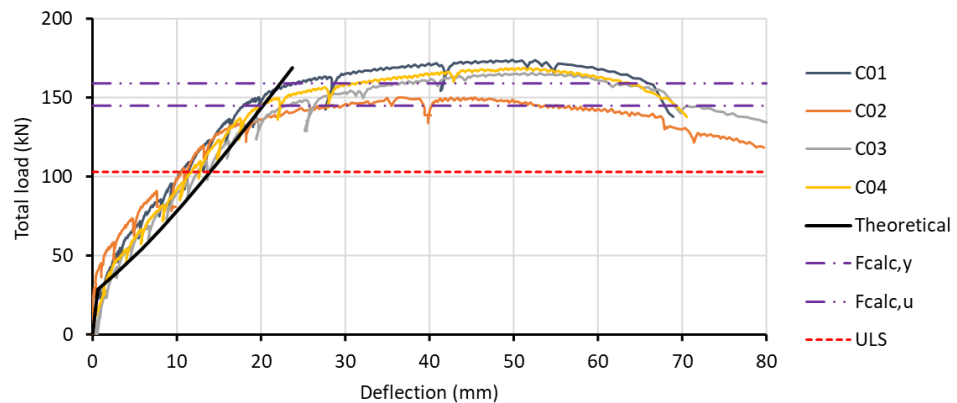
Figuur 7.2 Last-ervormingsgedrag A-serie proefstukken

Door Molken is de draagkracht van de proefstukken van de serie A ook beschouwd door de aanwezige verankering van de koppelwapening te beschouwen. Hierbij wordt, afwijkend van zoals in Nederland gebruikelijk was, de verankeringslengte beschouwd vanaf de eerste tralieligger. Als met dit aspect rekening wordt gehouden, presteren de proefstukken zoals verwacht en ook in lijn met de Belgische regelgeving waar de kracht in de wapening ten gevolge van de beperkte verankering gereduceerd moet worden. Meer achtergrond met de betekenis van $F_{calc,lap,max}$ en $F_{calc,lap,min}$ is terug te vinden in [7] en [8].

Als de resultaten van proefserie A worden vergeleken met de voorspellingen in paragraaf 5.5 van [2] en paragraaf 2.3 van dit rapport, dan blijkt dat de voorspellingen (rekening houdend met tekortkomingen in het kritische detail) van een gelijke orde van grootte zijn als de resultaten van proevenserie A. Met andere woorden de in België uitgevoerde experimenten onderschrijven de tekortkomingen in het kritische detail zoals dat in het verleden in Nederland ontworpen werd.

Uit het last-ervormingsgedrag van de proefstukken van de series C en D blijkt dat bij deze proefstukken in alle gevallen vloeit van de koppelwapening wordt bereikt (voor serie C zie Figuur 7.3). Bij de meeste van deze proeven is de tralieligger op 95 mm van de naad geplaatst. Bij één proefstuk (C04) is deze afstand groter.

Bij het betreffende proefstuk staat een equivalente tralieligger (draadstangen met gelijke doorsnede per sectie) op 400 mm vanaf de naad en is de koppelwapening $\text{Ø}16$ over een lengte van 520 mm voorbij deze tralieligger doorgezet waarna deze nog zijn voorzien van een haak. De andere zijde van de voeg werd voorzien van twee achter elkaar geplaatste tralieliggers met de eerste op 95 mm van de voeg om aan die zijde delaminatie te vermijden. De lengte van de koppelwapening $\text{Ø}16$ is 920 mm vanaf de naad. Dit is beduidend groter dan in Nederland gebruikelijk was.



Figuur 7.3 Last-ervormingsgedrag C-serie proefstukken

Als de proefstukken uit de series C en D, dus ook proefstuk C04, analytisch worden beschouwd volgens de in [2] en 2.3 beschreven mechanismen, dan wordt ook gevonden dat het optreden van vloeien van de koppelwapening het bepalende bezwijkmechanisme is. De belangrijkste reden hiervoor is dat bij de betreffende proefstukken de hoeveelheid koppelwapening relatief beperkt is en dat deze koppelwapening over een voldoende lengte voorbij de tralieligger is doorgezet en/of bijkomend voorzien werd van haken.

7.3 Conclusie

Vanuit een Belgisch perspectief, waarbij al gedurende meerdere jaren rekening wordt gehouden met de effecten van een beperkte verankering, presteren de proefstukken van de KU Leuven naar verwachting. Vanuit een 'oud' Nederlands perspectief, waarbij de verankeringslengte van de koppelwapening vanaf de naad tussen de breedplaten werd bedacht en bij aanwezigheid van voldoende lengte vanaf de naad, vloeien van de wapening gewaarborgd werd geacht, presteren deze proefstukken niet naar verwachting en bevestigen de proefstukken dat wat in [2] en [3] reeds is beschreven.

Bij het in België uitgevoerde onderzoek wordt vooral gekeken naar de verankering van de koppelwapening en de bijdrage van de wapening van de tralieligger, terwijl in Nederland met name de weerstand van het aansluitvlak wordt beschouwd. Uit een vergelijking van beide methoden op basis van de in [7] en [2] beschreven proefstukken blijkt dat de verschillen in resultaten tussen beide benaderingen niet groot zijn en dat er daarom geen reden is om op basis van de Belgische experimentele resultaten, de in dit rapport beschreven modellen aan te passen.

8 Bibliografie

- [1] TU/e Bouwkunde - Structures Laboratory Eindhoven, „Meetrapport betreffende 4-puntbuigproeven TNO,” Eindhoven, 2021.
- [2] Adviesbureau Hageman, „Rapport 9780-1-0, Voorstellen voor en achtergronden bij rekenregels voor beoordeling van bestaande bouw,” Rijswijk, 2019.
- [3] S. Wijte en G. Dieteren, „Rekenregels beoordeling bestaande breedplaatvloeren,” *Cement*, nr. 4, pp. 30-39, 2019.
- [4] Adviesbureau Hageman, Rapport 9663-1-0, Bezwijken parkeergarage Eindhoven Airport - Analyse naar de oorzaak, Rijswijk: Adviesbureau Hageman, 2017.
- [5] TU/e Bouwkunde - Structures Laboratory Eindhoven, „Meetrapport betreffende 4-puntsbuigproeven van BAM-Cobiax breedplaatproefstukken,” Eindhoven, 2018.
- [6] TU/e Bouwkunde - Structures Laboratory Eindhoven, „Meetrapport 4-puntsbuigproeven voor het Betonhuis - Test breedplaatproefstukken,” Eindhoven, 2018.
- [7] Adviesbureau Hageman, „Rapport 9780-2-0, Onderzoek constructieve breedplaatvloeren - Meetrapport 4-puntsbuigproeven op proefstukken met breedplaten van zelfverdichtend beton,” Rijswijk, 2018.
- [8] CEN (Comite Europeen de Normalisation), prEN1992-1-1: 2021-09 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1, Brussels: CEN, 2021.
- [9] WTCB, TC 223: Draagvloeren in niet-industriële gebouwen, Brussel: WTCB, 2002.
- [10] T. Molkens and A. v. Gysel, “Behaviour of joints in lattice plank profiles with voiding elements,” in *Proceeding fib symposium - Krakau*, Krakau, 2019.
- [11] T. Molkens en A. v. Gysel, „Structural behaviour of floor systems made by floor plates,” *Applied Science*, vol. Vol 11, nr. (2), 2021.
- [12] TNO, „TNO-2022-R10122: Probabilistische kwantificering van de veiligheid van bestaande breedplaatvloeren,” TNO, Delft, 2022.

9 Ondertekening

Delft, April 2022

TNO

J.M.A. van Kilsdonk MSc.
Projectleider

Ir. A.D. Pikaart
Research Manager
Structural Reliability

A Uitwerking proefstuk T28

Analyse Onderzoeksresultaten 4-punstuigproeven

versie 21-08-27

Proefstuk T28

Experimentele resultaten

$F_{\text{bezwijk.2}} := 65.1\text{kN}$ maximale last 4 punstuigproef bij mechanisme 2 (per lastpunt)

$F_{\text{bezwijk.34}} := 59.0\text{kN}$ last 4 punstuigproef bij mechanisme 3 of 4 (per lastpunt)

Materiaaleigenschappen

$f_{\text{cm.cube.d}} := 47.4\text{MPa}$ gemiddelde kubusdruksterkte druklaag

$f_{\text{cm.cube.b}} := 46.2\text{MPa}$ gemiddelde kubusdruksterkte breedplaat

$f_{\text{ym}} := 550\text{MPa}$ gemiddelde vloeigrens wapening - aanname

$f_{\text{tm}} := 550\text{MPa}$ gemiddelde treksterkte wapening - aanname

$f_{\text{yd}} := 435\text{MPa}$ rekenwaarde vloeigrens

Geometrie

$h := 250\text{mm}$ hoogte proefstuk

$b := 1600\text{mm}$ breedte proefstuk

$l := 3800\text{mm}$ lengte proefstuk

$h_b := 70\text{mm}$ hoogte breedplaat

$\text{opp} := \text{"glad"}$ bovenzijde breedplaat "zeer glad", "glad", "ruw" of "zeer ruw"

$\text{type} := \text{"trad"}$ soort beton "trad" of "zvb"

$\alpha_{\text{A.red}} := 0$ reductie oppervlak door gewichtsbeparende elementen

$\varnothing_k := 10\text{mm}$ diameter koppelwapening

$n_k := 21$ aantal koppelstaven

$l_k := 500\text{mm}$	lengte koppelpapening vanaf de voeg
$\varnothing_b := 10\text{mm}$	diameter wapening in breedplaat
$n_b := 21$	aantal wapeningsstaven in breedplaat
$d_k := h - h_b - \frac{\varnothing_k}{2} = 175 \cdot \text{mm}$	effectieve hoogte koppelpapening
$d_b := h - 25\text{mm} - \frac{\varnothing_b}{2} = 220 \cdot \text{mm}$	effectieve hoogte wapening in de breedplaat
$l_t := 400\text{mm}$	afstand 1e tralieligger tot de voeg
$A_{sv} := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (5\text{mm})^2 \cdot 4 \cdot \frac{b}{200\text{mm}} = 628 \cdot \text{mm}^2$	hoeveelheid aansluitvlak doorkruisende wapening
$\alpha := 59\text{deg}$	hoek tussen as diagonalen en vlak breedplaat
$d_{tr} := 37\text{mm}$	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat

Randvoorwaarden proefopstelling

$$l_{\text{span}} := 3.2\text{m}$$

$$l_a := 0.8\text{m}$$

$$l_{\text{over}} := \frac{l - l_{\text{span}}}{2} = 0.3\text{m}$$

Uitwerking

Afgeleide materiaaleigenschappen

$$f_{\text{cm.d}} := 3\text{MPa} + 0.851 \cdot f_{\text{cm.cube.d}} = 43.3 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{\text{cm.b}} := 3\text{MPa} + 0.851 \cdot f_{\text{cm.cube.b}} = 42.3 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{\text{ctm.b}} := \begin{cases} \left[0.30\text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{\text{cm.b}} - 8\text{MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] & \text{if } f_{\text{cm.b}} \leq 58\text{MPa} \\ \left[2.12\text{MPa} \cdot \left(\ln \left(1 + \frac{f_{\text{cm.b}}}{10\text{MPa}} \right) \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases} = 3.2 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ck.d} := f_{cm.d} - 8\text{MPa} = 35.3 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ck.b} := f_{cm.b} - 8\text{MPa} = 34.3 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 22000\text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{cm.d}}{10\text{MPa}} \right)^{0.3} = 34157 \cdot \text{MPa}$$

$$E_s := 2 \cdot 10^5 \text{MPa}$$

$$n_E := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.9$$

Krachtenverdeling in proefstuk

$$q_{eg} := b \cdot h \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 9.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

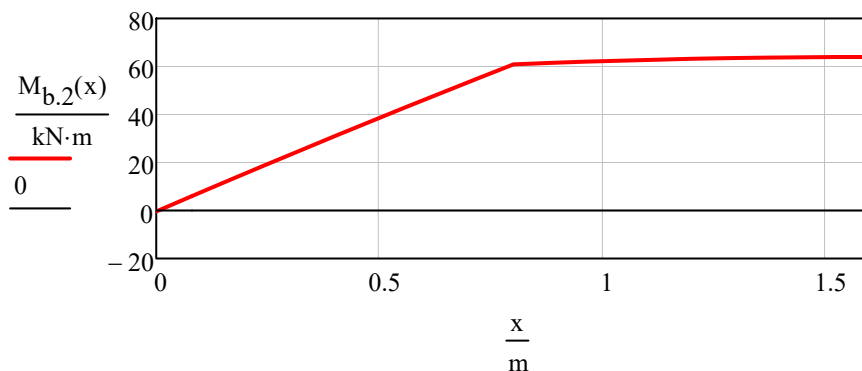
$$M_{eg} := \frac{1}{8} \cdot q_{eg} \cdot l_{span}^2 - \frac{1}{2} \cdot q_{eg} \cdot l_{over}^2 = 11.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{bezwijk.2} := M_{eg} + F_{bezwijk.2} \cdot l_a = 63.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$R_{bezwijk.2} := \frac{1}{2} \cdot q_{eg} \cdot l + F_{bezwijk.2} = 83 \cdot \text{kN}$$

$$M_{b.2}(x) := \frac{-1}{2} \cdot q_{eg} \cdot (l_{over} + x)^2 + R_{bezwijk.2} \cdot x - F_{bezwijk.2} \cdot \max(0, x - l_a)$$

$$x := 0, \frac{l_{span}}{40} \dots \frac{l_{span}}{2}$$



$$M_{bezwijk.34} := M_{eg} + F_{bezwijk.34} \cdot l_a = 59.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$R_{\text{bezwijk.34}} := \frac{1}{2} \cdot q_{\text{eg}} \cdot l + F_{\text{bezwijk.34}} = 77 \cdot \text{kN}$$

$$M_{\text{b.34}}(x) := \frac{-1}{2} \cdot q_{\text{eg}} \cdot (l_{\text{over}} + x)^2 + R_{\text{bezwijk.34}} \cdot x - F_{\text{bezwijk.34}} \cdot \max(0, x - l_a)$$

Momentweerstand op basis van vloekoppelwapening

$$A_{\text{sk}} := n_k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \varnothing_k^2 = 1649 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{\text{syk}} := f_{\text{ym}} \cdot A_{\text{sk}} = 907 \cdot \text{kN}$$

$$x_{\text{Rc}} := \frac{4}{3} \cdot \frac{F_{\text{syk}}}{b \cdot f_{\text{cm.d}}} = 17.4 \cdot \text{mm}$$

$$z_k := d_k - \frac{7}{18} \cdot x_{\text{Rc}} = 168 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{z_k}{d_k} = 0.961$$

$$M_{\text{Rk}} := F_{\text{syk}} \cdot z_k = 152.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{ratio}_{\text{k.2}} := \frac{M_{\text{bezwijk.2}}}{M_{\text{Rk}}} = 0.419$$

$$\text{ratio}_{\text{k.34}} := \frac{M_{\text{bezwijk.34}}}{M_{\text{Rk}}} = 0.387$$

Moment waarbij vloegrens koppelwapening wordt bereikt

$$\rho_k := \frac{A_{\text{sk}}}{b \cdot d_k} = 5.89 \times 10^{-3}$$

$$k_{\text{x.k}} := \sqrt{(n_E \cdot \rho_k)^2 + 2 \cdot n_E \cdot \rho_k - n_E \cdot \rho_k} = 0.23$$

$$z_{\text{ek}} := d_k \cdot \left(1 - \frac{k_{\text{x.k}}}{3} \right) = 162 \cdot \text{mm}$$

$$M_{\text{Ek}} := F_{\text{syk}} \cdot z_{\text{ek}} = 146.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentweerstand op basis van vloeibreedplaatwapening

$$A_{\text{sb}} := n_b \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \varnothing_b^2 = 1649 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{\text{syb}} := f_{\text{ym}} \cdot A_{\text{sb}} = 907 \cdot \text{kN}$$

$$x_{Rc} := \frac{4}{3} \cdot \frac{F_{syb}}{b \cdot f_{cm,d}} = 17.4 \cdot \text{mm}$$

$$z_b := d_b - \frac{7}{18} \cdot x_{Rc} = 213 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rb} := F_{syb} \cdot z_b = 193.4 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{ratio}_{b,2} := \frac{M_{\text{bezwijk.2}}}{M_{Rb}} = 0.331$$

Kracht en spanning in breedplaatwapening onder lastpunt bij

F_{bezwijk.3}

$$\rho_b := \frac{A_{sb}}{b \cdot d_b} = 4.69 \times 10^{-3}$$

$$k_x := \sqrt{(n_E \cdot \rho_b)^2 + 2 \cdot n_E \cdot \rho_b} - n_E \cdot \rho_b = 0.208$$

$$z_{eb} := d_b \cdot \left(1 - \frac{k_x}{3}\right) = 205 \cdot \text{mm}$$

$$F_{sb} := \frac{M_{b,34} \left(\frac{l_{\text{span}}}{2} - l_k\right)}{z_{eb}} = 283 \cdot \text{kN}$$

$$\sigma_{sb} := \frac{F_{sb}}{A_{sb}} = 171 \cdot \text{MPa}$$

schuifspanning in volledig

aansluitvlak

$$\tau_{\text{gem.v}} := \frac{F_{sb}}{b \cdot l_k} = 0.35 \cdot \text{MPa}$$

schuifspanning in aansluitvlak achter

trekligging

$$\tau_{\text{gem.a}} := \frac{F_{sb}}{b \cdot (l_k - l_t)} = 1.77 \cdot \text{MPa}$$

Bepaling maximale trekkracht in koppelwapening op basis van stuijk beton (als in 9780-1-0):

$$F_{\text{kop.bezwijk.2}} := F_{\text{syk}} \cdot \frac{M_{\text{bezwijk.2}}}{M_{Rk}} = 380.1 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{kop.bezwijk.34}} := F_{\text{syk}} \cdot \frac{M_{\text{bezwijk.34}}}{M_{Rk}} = 351.1 \cdot \text{kN}$$

Bepaling trekkacht in koppelwapening op basis van elastisch gedrag beton

$$F_{\text{kop.bezwijk.e.2}} := F_{\text{kop.bezwijk.2}} \cdot \frac{z_k}{z_{ek}} = 395.7 \cdot \text{kN}$$

$$F_{\text{kop.bezwijk.e.34}} := F_{\text{kop.bezwijk.34}} \cdot \frac{z_k}{z_{ek}} = 365.5 \cdot \text{kN}$$

Bepaling de maximale weerstand van de koppelwapening door de in 9780-1-0 beschreven mechanismen

Mechanisme 2 - Afschuiven van het aansluitvlak

$$l_{\text{eff}} := l_k - l_t = 100 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff}} = 100 \cdot \text{mm}$$

$$c_{v1} := \begin{cases} 0.0095 & \text{if opp} = \text{"zeer glad"} \\ 0.075 & \text{if opp} = \text{"glad"} \\ 0.15 & \text{if opp} = \text{"ruw"} \\ 0.19 & \text{if opp} = \text{"zeer ruw"} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$c_{v1} = 0.075$$

$$\mu_v := \begin{cases} 0.5 & \text{if opp} = \text{"zeer glad"} \\ 0.6 & \text{if opp} = \text{"glad"} \\ 0.7 & \text{if opp} = \text{"ruw"} \\ 0.9 & \text{if opp} = \text{"zeer ruw"} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\mu_v = 0.6$$

$$\alpha_i := \begin{cases} 2 & \text{if type} = \text{"zvb"} \\ 2.17 & \text{if type} = \text{"trad"} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\alpha_i = 2.17$$

$$A_{\text{eff}} := b \cdot l_{\text{eff}} \cdot (1 - \alpha_{A,\text{red}})$$

$$A_{\text{eff}} = 0.16 \text{ m}^2$$

$$\rho := \frac{A_{sv}}{A_{\text{eff}}}$$

$$\rho = 0.0039$$

$$f_{ck} := \min(f_{ck,b}, f_{ck,d})$$

$$f_{ck} = 34.3 \cdot \text{MPa}$$

$$v_{Rm.i} := \alpha_i \cdot \left(c_{v1} \cdot \frac{\sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}}}{1.5} \cdot \text{MPa} + \rho \cdot f_{yd} \cdot \mu_v \cdot \sin(\alpha) \right)$$

$$v_{Rm.i} = 2.542 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{R.kop.m.2} := v_{Rm.i} \cdot A_{eff}$$

$$F_{R.kop.m.2} = 407 \cdot \text{kN}$$

Mechanisme 3 Weerstand op basis van uittrekken van tralielegger

$$k_2 := \min\left(\frac{l_{eff}}{600\text{mm}}, 1\right)$$

$$k_2 = 0.167$$

$$k_3 := \min\left(\max\left(\frac{56\text{mm} - \emptyset_k}{40\text{mm}}, 0.9\right), 1.1\right)$$

$$k_3 = 1.1$$

$$F_{R.kop.m.3} := 1.7 \cdot \frac{f_{ctm.b}}{\text{MPa}} \cdot \left(\frac{d_{tr}}{\text{mm}}\right)^{1.5} \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot b \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$F_{R.kop.m.3} = 356 \cdot \text{kN}$$

Samenvatting van resultaten, vertaald naar de trekkracht in de koppelwapening

Momentweerstand koppelwapening	$M_{Rk} = 152.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Bezwijkmoment bij mech 3 of 4	$M_{\text{bezwijk.34}} = 59.056 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
verhouding bezwijk/vloei	$\text{ratio}_{k.2} = 0.419$
	$\text{ratio}_{k.34} = 0.387$
bezwijklast op basis stuik	$F_{\text{kop.bezwijk.2}} = 380.1 \cdot \text{kN}$
	$F_{\text{kop.bezwijk.34}} = 351.1 \cdot \text{kN}$
bezwijklast op basis elastisch gedrag	$F_{\text{kop.bezwijk.e.2}} = 395.7 \cdot \text{kN}$
	$F_{\text{kop.bezwijk.e.34}} = \blacksquare \cdot \text{kN}$
schuifspanning in aansluitvlak	$\tau_{\text{gem.v}} = 0.353 \cdot \text{MPa}$
	$\tau_{\text{gem.a}} = 1.766 \cdot \text{MPa}$
mechanisme 2	$F_{R.kop.m.2} = 406.7 \cdot \text{kN}$
mechanisme 3	$F_{R.kop.m.3} = 355.5 \cdot \text{kN}$
verhouding $M_{eg}/M_{\text{bezwijk.2}}$	$\text{verhouding} := \frac{M_{eg}}{F_{\text{bezwijk.34}} \cdot l_a} = 0.251$
verhouding mech2 / mech34	$\text{verhouding} := \frac{F_{\text{bezwijk.2}}}{F_{\text{bezwijk.34}}} = 1.103$

B Uitwerking proefstuk KV2

Analyse Onderzoeksresultaten 4-puntsbuigproeven kopvoegen

versie 220107

Proefstuk KV2

Experimentele resultaten

$F_{\text{bezwijk}} := 154.7\text{kN}$ maximale puntlast 4 puntsbuigproef bij bezwijken

Materiaaleigenschappen

$f_{\text{cm.cube.d}} := 49.0\text{MPa}$ gemiddelde kubusdruksterkte druklaag
 $f_{\text{cm.cube.b}} := 50.4\text{MPa}$ gemiddelde kubusdruksterkte breedplaat
 $f_{\text{ym}} := 550\text{MPa}$ gemiddelde vloeigrens wapening - aanname
 $f_{\text{tm}} := 550\text{MPa}$ gemiddelde treksterkte wapening - aanname
 $f_{\text{yd}} := 435\text{MPa}$ rekenwaarde vloeigrens

Geometrie

$h := 250\text{mm}$ hoogte proefstuk
 $b := 1600\text{mm}$ breedte proefstuk
 $l := 3800\text{mm}$ lengte proefstuk
 $h_b := 70\text{mm}$ hoogte breedplaat
 $\text{opp} := \text{"glad"}$ bovenzijde breedplaat "zeer glad", "glad", "ruw" of "zeer ruw"
 $\text{type} := \text{"trad"}$ soort beton "trad" of "zvb"
 $\alpha_{\text{A.red}} := 0$ reductie oppervlak door gewichtsbesparende elementen
 $\varnothing_k := 10\text{mm}$ diameter koppelwapening
 $n_k := 24$ aantal koppelstaven
 $l_k := 575\text{mm}$ lengte koppelwapening vanaf de voeg
 $\varnothing_b := 11.8\text{mm}$ gemiddelde diameter wapening in breedplaat

$n_b := 21$	aantal wapeningsstaven in breedplaat
$d_k := h - h_b - \frac{\varnothing_k}{2} = 175 \cdot \text{mm}$	effectieve hoogte koppelwapening
$d_b := h - 38\text{mm} - \frac{\varnothing_b}{2} = 206.1 \cdot \text{mm}$	effectieve hoogte wapening in de breedplaat
$n_t := 4$	aantal tralieliggers
$l_t := 100\text{mm}$	afstand 1e tralieligger tot de voeg
$L_{\text{tralie}} := 200\text{mm}$	systeemplengte tralieligger
$n_k := 2$	aantal diagonalen per systeemplengte
$\varnothing_{\text{dia}} := 5\text{mm}$	diameter van diagonaalstaven in tralieligger
$\alpha := 60\text{deg}$	hoek tussen as diagonalen en vlak breedplaat

Randvoorwaarden proefopstelling

$$l_{\text{span}} := 3.2\text{m}$$

$$l_a := 0.8\text{m}$$

$$l_{\text{over}} := \frac{1 - l_{\text{span}}}{2} = 0.3 \text{ m}$$

Uitwerking

Afgeleide materiaaleigenschappen

$$f_{\text{cm.d}} := 3\text{MPa} + 0.851 \cdot f_{\text{cm.cube.d}} = 44.7 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{\text{cm.b}} := 3\text{MPa} + 0.851 \cdot f_{\text{cm.cube.b}} = 45.9 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{\text{ctm.b}} := \begin{cases} \left[0.30\text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{\text{cm.b}} - 8\text{MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] & \text{if } f_{\text{cm.b}} \leq 58\text{MPa} \\ \left[2.12\text{MPa} \cdot \left(\ln \left(1 + \frac{f_{\text{cm.b}}}{10\text{MPa}} \right) \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases} = 3.4 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctm.d} := \begin{cases} \left[0.30 \text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{cm.d} - 8 \text{MPa}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] & \text{if } f_{cm.d} \leq 58 \text{MPa} = 3.31 \cdot \text{MPa} \\ \left[2.12 \text{MPa} \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{cm.d}}{10 \text{MPa}} \right) \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{ctd.b} := \frac{0.7 \cdot f_{ctm.b}}{1.5} = 1.58 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctd.d} := \frac{0.7 \cdot f_{ctm.d}}{1.5} = 1.55 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ck.d} := f_{cm.d} - 8 \text{MPa} = 36.7 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ck.b} := f_{cm.b} - 8 \text{MPa} = 37.9 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 22000 \text{MPa} \cdot \left(\frac{f_{cm.d}}{10 \text{MPa}} \right)^{0.3} = 34476 \cdot \text{MPa}$$

$$E_s := 2 \cdot 10^5 \text{MPa}$$

$$n_E := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.8$$

Krachtenverdeling in proefstuk

$$q_{eg} := b \cdot h \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 9.6 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

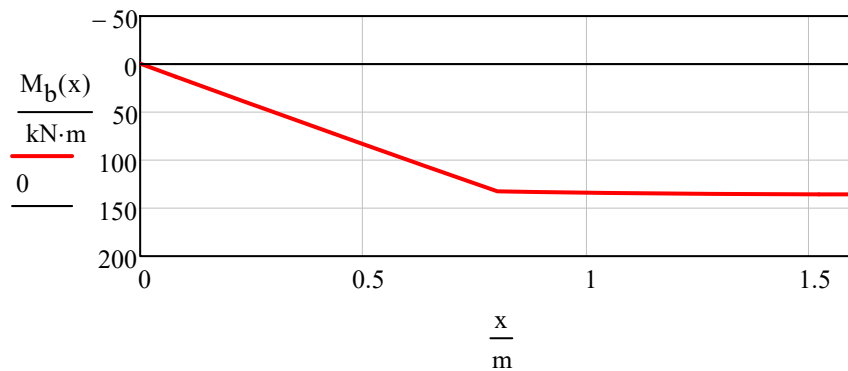
$$M_{eg} := \frac{1}{8} \cdot q_{eg} \cdot l_{span}^2 - \frac{1}{2} \cdot q_{eg} \cdot l_{over}^2 = 11.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{bezwijk} := M_{eg} + F_{bezwijk} \cdot l_a = 135.6 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$R_{bezwijk} := \frac{1}{2} \cdot q_{eg} \cdot l + F_{bezwijk} = 173 \cdot \text{kN}$$

$$M_b(x) := \frac{-1}{2} \cdot q_{eg} \cdot (l_{over} + x)^2 + R_{bezwijk} \cdot x - F_{bezwijk} \cdot \max(0, x - l_a)$$

$$x := 0, \frac{l_{span}}{40} \dots \frac{l_{span}}{2}$$



Momentweerstand op basis van vloeikoppelwapening en stuik beton

$$A_{sk} := n_k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \varnothing_k^2 = 157 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{syk} := f_{ym} \cdot A_{sk} = 86 \cdot \text{kN}$$

$$x_{Rc} := \frac{4}{3} \cdot \frac{F_{syk}}{b \cdot f_{cm,d}} = 1.6 \cdot \text{mm}$$

$$z_k := d_k - \frac{7}{18} \cdot x_{Rc} = 174 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rk} := F_{syk} \cdot z_k = 15.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{ratio}_k := \frac{M_{\text{bezwijk}}}{M_{Rk}} = 9.002$$

Moment waarbij vloeigrens koppelwapening wordt bereikt

$$\rho_k := \frac{A_{sk}}{b \cdot d_k} = 561 \times 10^{-6}$$

$$k_{x,k} := \sqrt{(n_E \cdot \rho_k)^2 + 2 \cdot n_E \cdot \rho_k} - n_E \cdot \rho_k = 0.077$$

$$z_{ek} := d_k \cdot \left(1 - \frac{k_{x,k}}{3} \right) = 170 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Ek} := F_{syk} \cdot z_{ek} = 14.7 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Momentweerstand op basis van vloeibreedplaatwapening en stuik beton

$$A_{sb} := n_b \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_b^2 = 2297 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{syb} := f_{ym} \cdot A_{sb} = 1263 \cdot \text{kN}$$

$$x_{Rc} := \frac{4}{3} \cdot \frac{F_{syb}}{b \cdot f_{cm,d}} = 23.5 \cdot \text{mm}$$

$$z_b := d_b - \frac{7}{18} \cdot x_{Rc} = 197 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rb} := F_{syb} \cdot z_b = 248.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{ratio}_b := \frac{M_{\text{bezwijk}}}{M_{Rb}} = 0.545$$

Kracht en spanning in breedplaatwapening onder lastpunt bij F_{bezwijk}

$$\rho_b := \frac{A_{sb}}{b \cdot d_b} = 6.96 \times 10^{-3}$$

$$k_x := \sqrt{(n_E \cdot \rho_b)^2 + 2 \cdot n_E \cdot \rho_b} - n_E \cdot \rho_b = 0.247$$

$$z_{eb} := d_b \cdot \left(1 - \frac{k_x}{3}\right) = 189 \cdot \text{mm}$$

$$F_{sb} := \frac{M_b \left(\frac{l_{\text{span}}}{2} - l_k\right)}{z_{eb}} = 709 \cdot \text{kN}$$

$$\sigma_{sb} := \frac{F_{sb}}{A_{sb}} = 309 \cdot \text{MPa}$$

gemiddelde schuifspanning in effectief aansluitvlak gemeten vanaf begin tralieleger

$$l_{\text{eff}} := l_k - l_t = 475 \cdot \text{mm}$$

$$l_{\text{eff}} = 475 \cdot \text{mm}$$

$$\tau_{\text{gem}} := \frac{F_{sb}}{b \cdot l_{\text{eff}}} = 0.93 \cdot \text{MPa}$$

Bepaling maximale trekkracht in koppelwapening op basis van stuik beton (als in 9780-1-0):

$$F_{\text{kop.bezwijk}} := F_{\text{syk}} \cdot \frac{M_{\text{bezwijk}}}{M_{\text{Rk}}} = 777.7 \cdot \text{kN}$$

Bepaling trekkracht in koppelwapening op basis van elastisch gedrag beton

$$F_{\text{kop.bezwijk.e}} := F_{\text{kop.bezwijk}} \cdot \frac{z_k}{z_{\text{ek}}} = 795.5 \cdot \text{kN}$$

Bepaling de maximale weerstand van de koppelwapening door het in paragraaf 6.3 van rapport 9780-1-0 beschreven mechanisme

Mechanisme - Afschuiven van het aansluitvlak volgens 6.2.5 van NEN-EN 1992-1-1

$$c := \begin{cases} 0.025 & \text{if opp} = \text{"zeer glad"} \\ 0.20 & \text{if opp} = \text{"glad"} \\ 0.40 & \text{if opp} = \text{"ruw"} \\ 0.50 & \text{if opp} = \text{"zeer ruw"} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad c = 0.2$$

$$\mu := \begin{cases} 0.5 & \text{if opp} = \text{"zeer glad"} \\ 0.6 & \text{if opp} = \text{"glad"} \\ 0.7 & \text{if opp} = \text{"ruw"} \\ 0.9 & \text{if opp} = \text{"zeer ruw"} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \mu = 0.6$$

$$A_{\text{eff}} := b \cdot l_{\text{eff}} \cdot (1 - \alpha_{\text{A.red}}) \quad A_{\text{eff}} = 0.76 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{sv}} := n_t \cdot \frac{l_{\text{eff}}}{L_{\text{tralie}}} \cdot n_k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \varnothing_{\text{dia}}^2 \quad A_{\text{sv}} = 373 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho := \frac{A_{\text{sv}}}{A_{\text{eff}}} \quad \rho = 0.000491$$

$$f_{\text{ctd}} := \min(f_{\text{ctd.b}}, f_{\text{ctd.d}}) \quad f_{\text{ctd}} = 1.5 \cdot \text{MPa}$$

$$v_{\text{Rd}} := c \cdot f_{\text{ctd}} + \rho \cdot f_{\text{yd}} \cdot \mu \cdot \sin(\alpha) \quad v_{\text{Rd}} = 0.42 \cdot \text{MPa}$$

$$F_{R.kop.d} := v_{Rd} \cdot A_{eff}$$

$$F_{R.kop.d} = 319 \cdot \text{kN}$$

$$\text{ratio} := \frac{F_{kop.bezwijk}}{F_{R.kop.d}}$$

$$\text{ratio} = 2.436$$

Samenvatting van resultaten, vertaald naar de trekkracht in de koppelwapening

verhouding moment bij bezwijken / uiterst moment

$$\text{ratio}_k = 9.002$$

kracht in koppelwapening bij bezwijken op basis van stuik

$$F_{kop.bezwijk} = 777.7 \cdot \text{kN}$$

kracht in koppelwapening bij bezwijken op basis elastisch gedrag

$$F_{kop.bezwijk.e} = 795.5 \cdot \text{kN}$$

gemiddelde schuifspanning in effectieve aansluitvlak

$$\tau_{gem} = 0.932 \cdot \text{MPa}$$

rekenwaarde van de treksterkte van het beton

$$f_{ctd} = 1.55 \cdot \text{MPa}$$

rekenwaarde van de afschuifsterkte van effectieve aansluitvlak

$$v_{Rd} = 0.420 \cdot \text{MPa}$$

verhouding tussen gemiddelde schuifspanning en afschuifsterkte

$$\frac{\tau_{gem}}{v_{Rd}} = 2.22$$

C Samenvatting variabelen experimenten

proefstuk	code	$f_{c,cube}$		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			vijzelkracht per mechanisme [kN]				
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A_s	ϕ_{max}	$d_{koppelwapening}$	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	$\phi_{onderstaaf}$	mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3	mechanisme 4	mechanisme onbekend
		MPa	MPa	mm	mm	mm	%	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm					
1	VL18	70.0	22.7	450	70	800	81	1364	16	372	775	425	21	6			110		
2	VA18	70.0	24.6	450	70	800	81	1364	16	372	775	425	21	6			118		
3	VL34a	70.0	36.3	450	70	800	81	1364	16	372	775	425	21	6		103	120		
4	KL18	70.0	22.6	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6		89	110		
5	KA18	70.0	24.7	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6		82	113		
6	KL34a	70.0	33.3	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6		90	107		
7	KL34b	70.0	37.8	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6		76	94		
8	BC 1-1	81.4	44.8	450	70	800	69	1256	20	362	900	375	28	6					320
9	BC 1-2	80.9	40.6	450	70	800	69	1256	20	362	900	375	28	6		298			324
10	BC 1-3	83.0	31.6	450	70	800	69	1256	20	362	900	375	28	6		293			312
11	BC 2-1	86.2	45.9	450	90	800	69	1256	20	342	900	375	26	6					302
12	BC 2-2	86.5	41.1	450	90	800	69	1256	20	342	900	375	26	6					300
13	BC 2-3	86.2	44.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	375	26	6		276			300
14	BC 3-1	87.1	47.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	100	26	6		284			299
15	BC 3-2	90.4	50.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	100	26	6		227	258		
16	BC 3-3	76.8	53.9	450	90	800	69	1256	20	342	900	100	26	6		264			304
17	BC 4-1	85.8	44.5	450	90	800	69	1256	20	342	600	100	26	6		208	270		
18	BC 4-2	86.3	45.1	450	90	800	69	1256	20	342	600	100	26	6		221	263		
19	BC 4-3	85.2	44.4	450	90	800	69	1256	20	342	600	100	26	6		250	275		

proefstuk	code	f _{c,cube}		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			vijzelkracht per mechanisme [kN]				
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A _s	Ø _{max}	d _{koppelwapening}	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	Ø _{onderstaaf}	mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3	mechanisme 4	mechanisme onbekend
20	BC 5-1	91.0	50.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	50	26	6	264	290			
21	BC 5-2	89.4	52.5	450	90	800	69	1256	20	342	900	50	26	6	299	302			
22	BC 5-3	92.2	51.5	450	90	800	69	1256	20	342	900	50	26	6	299	305			
23	T1	62.2	38.3	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	80	102			
24	T2	61.1	36.7	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	75	111			
25	T3	61.0	36.9	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	83	108			
26	T4	62.1	38.7	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	25	5	103	172			
27	T5	60.9	39.1	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	25	5	136	156			
28	T6	62.0	39.5	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	25	5	105	125			
29	T10	41.0	46.3	300	70	1000	100	1407	16	222	700	400	25	5	78	108			
30	T11	43.8	47.2	300	70	1000	100	1407	16	222	700	400	25	5	103	131			
31	T12	43.5	46.9	300	70	1000	100	1407	16	222	700	400	25	5	98	99			
32	T13	43.6	45.3	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	41	74			
33	T14	41.5	48.6	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	51	54			
34	T15	41.8	48.1	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	64	79			
35	T19	39.1	17.1	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	62	79			
36	T20	42.7	17.2	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	69	76			
37	T21	38.2	18.3	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	48	61			
38	T22	50.4	28.0	300	70	1000	100	1407	16	222	850	100	25	5	170	183			
39	T23	51.1	28.0	300	70	1000	100	1407	16	222	850	100	25	5	160	188			
40	T24	51.2	28.3	300	70	1000	100	1407	16	222	850	100	25	5	161	169			
41	R1	54.9	40.7	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	35	5	187	210			

proefstuk	code	f _{c,cube}		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			vijzelkracht per mechanisme [kN]				
		breedplaat	druklag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A _s	Ø _{max}	d _{koppelwapening}	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	Ø _{onderstaaf}	mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3	mechanisme 4	mechanisme onbekend
42	R2	57.8	43.6	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	35	5		205		225	
43	R3	57.3	42.2	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	35	5		216		220	
44	ZG1	86.1	38.2	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	37	5		100		104	
45	ZG2	87.8	46.8	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	37	5		100		105	
46	ZG3	90.7	43.5	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	37	5		110		116	
47	ZR1	95.3	37.7	300	70	1000	100	791	12	224	700	450	37	5		78		82	
48	ZR2	89.6	36.0	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	37	5		108		116	
49	ZR3	96.5	39.2	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	37	5		111		123	
50	TF450BR	54.6	54.1	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	5		192	122		
51	TF280BG-19	60.5	50.9	280	70	800	64	961	16	202	775	300	21	5		98	64		
52	GH1	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350	250	26			33			
53	GH2	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350	250	26			34			
54	GH3	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350	250	26			32			
55	GH4	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350	250	26						46
56	GH5	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350	250	26			32			
57	GH6	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350								45
58	GH7	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350								27
59	GH8	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350								21
60	GH9	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350								33
61	GH10	36.0	35.9	280	70	1000	74	402	8	206	350								21
62	L-H1	56.7	36	247	50	500	100	151	8	178	365	400	27						19
63	L-H2	56.7	36	247	50	500	100	151	8	184	365	400	27						20

proefstuk	code	f _{c,cube}		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			vijzelkracht per mechanisme [kN]				
		breedplaat	druklag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A _s	Ø _{max}	d _{koppelwapening}	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	Ø _{onderstaaf}	mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3	mechanisme 4	
64	L-H3	56.7	36	247	50	500	100	151	8	180	365	400	27					19	
65	L-A1	48.7	36	247	50	500	100	151	8	187	365	400	27					21	
66	L-A2	48.7	36	247	50	500	100	151	8	184	365	400	27					20	
67	L-A3	48.7	36	247	50	500	100	151	8	185	365	400	27					20	
68	S-3	54.5	32.2	300	75	500	77	236	10	220	500	95	45					80	
69	S-5	67.4	30.7	300	75	500	77	236	10	220	500				64				
70	S-6	67.4	30.7	300	75	500	100	236	10	220	300	95	45					77	
71	W-B1	65.0	29.3	200	50	500	100	198	6	147	670	200		6				22	
72	W-B2	65.0	29.3	200	50	500	100	198	6	147	670	600		6				24	
73	W-B3	65.0	29.3	200	50	500	100	226	6	147	215				6				
74	W-B4	65.0	29.3	200	50	500	100	226	6	147	2000	600		5				12	
75	W-B5	65.0	29.3	200	50	500	100	550	14	144	560	425		5		35			
76	W-B6	65.0	29.3	200	50	500	100	1005	16	142	975	250		5				85	
77	T25	45.6	47.3	250	70	1600	100	1649	10	175	400	399	37	5	22				
78	T26	45.6	47.3	250	70	1600	100	1649	10	175	400	399	37	5	40				
79	T27	45.6	47.4	250	70	1600	100	1649	10	175	400	399	37	5	82				
80	T28	47.5	47.4	250	70	1600	100	1649	10	175	500	400	37	5		65	59		
81	T29	47.5	49.4	250	70	1600	100	1649	10	175	500	400	37	5		73	67		
82	T30	47.5	49.4	250	70	1600	100	1649	10	175	500	400	37	5		68	56		
83	T31	49.1	47.3	250	70	1600	100	1649	10	175	600	400	37	5		98	82		
84	T32	49.1	47.3	250	70	1600	100	1649	10	175	600	400	37	5		75	72		
85	T33	49.1	54.8	250	70	1600	100	1649	10	175	600	400	37	5		110	90		

proefstuk	code	f _{c,cube}		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			vijzelkracht per mechanisme [kN]				
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A _s	∅ _{max}	d _{koppelwapening}	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	∅ _{onderstaaf}	mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3	mechanisme 4	mechanisme onbekend
		MPa	MPa	mm	mm	mm	%	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm					
86	R4	49.9	54.8	250	70	1600	100	1649	10	175	500	400	37	5	137	82			
87	R5	49.9	49.7	250	70	1600	100	1649	10	175	500	400	37	5	133	80			
88	R6	49.9	49.7	250	70	1600	100	1649	10	175	500	400	37	5	141	70			
89	R7	51.1	53.9	250	70	1600	100	2212	16	156	1000	125	37	5				251	
90	R8	51.1	53.9	250	70	1600	100	2212	16	156	500	125	37	5				230	
91	M-A01	45.0	45	340	60	900	?	1206	16	272	750	300	28	8					±194 ¹
92	M-A02	45.0	45	340	60	900	?	1206	16	272	750	300	28	8					±198 ¹
93	M-A03	45.0	45	340	60	900	?	1206	16	256	750	300	28	8					±181 ¹
94	M-A04	45.0	45	340	60	900	?	1206	16	256	750	300	28	8					±180 ¹
95	M-A05	45.0	45	340	60	900	?	1206	16	272	750	70	28	8					?
96	M-A06	45.0	45	340	60	900	?	1206	16	256	750	300	28	8					±203 ¹
97	M-A10	45.0	45	340	60	900	100	1206	16	256	750	300	28	8					±234 ¹
98	M-B01	45.0	44.9	340	60	1200	?	402	8	276	600	250	28	8					?
99	M-B02	45.0	44.9	340	60	66	?	402	8	276	600	250	28	8					?
100	M-B03	45.0	44.9	340	60	1200	?	402	8	260	600	250	28	8					?
101	M-B04	45.0	44.9	340	60	1200	100	402	8	260	600	250	28	8					?
102	M-B05	45.0	44.9	340	60	1200	?	402	8	260	600	250	28	8					?
103	M-C01	71.3	52.4	223	50	450	100	402	16	159	920	95	18	8					82 ¹
104	M-C02	71.3	52.4	223	50	450	100	402	16	159	920	95	28	8					71 ¹
105	M-C03	71.3	52.4	223	50	450	100	402	16	159	920	95	18	8					85 ¹

¹ Inschatting vijzelkracht op basis van gerapporteerd optredend moment, , maatgevend mechanisme niet altijd duidelijk omschreven in [7]+[8]. Onvoldoende gegeven beschikbaar om te gebruiken in de hier uitgevoerde validatie.

proefstuk	code	f _{c,cube}		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			vijzelkracht per mechanisme [kN]				
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A _s	∅ _{max}	d _{koppelwapening}	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	∅ _{onderstaaf}	mechanisme 1	mechanisme 2	mechanisme 3	mechanisme 4	mechanisme onbekend
		MPa	MPa	mm	mm	mm	%	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm					
106	M-C04	71.3	52.4	223	50	450	100	402	16	159	920	400	18	8					81 ¹
107	M-C05	71.3	52.4	223	50	450	100	402	16	159	920	95	18	8					20 ¹
108	M-C06	71.3	52.4	223	50	450	100	402	16	159	920	95	18	8					29 ¹
109	M-D01	55.4	47.3	290	70	2100	58	1809	16	206	1000	95	18	8					151 ¹
110	M-D02	55.4	47.3	290	70	2100	58	1809	16	206	1000	95	18	8					148 ¹

¹ Inschatting vijzelkracht op basis van gerapporteerd optredend moment, maatgevend mechanisme niet altijd duidelijk omschreven in [7]+[8].
Onvoldoende gegeven beschikbaar om te gebruiken in de hier uitgevoerde validatie.

D Grafische fit moment-krommingsgedrag proefstukken faalmechisme 3

