



Adviesbureau ir. J.G. Hageman B.V.

Dossier 9780
ONDERZOEK CONSTRUCTIEVE VEILIGHEID
BREEDPLAATVLOEREN IN BESTAANDE
UTILITEITSGEBOUWEN

Rapport 9780-1-0
Voorstellen voor en achtergronden bij rekenregels
voor beoordeling van bestaande bouw

20 mei 2019

Voorwoord

In het voorliggende rapport is verslag gedaan van het onderzoek naar de constructieve veiligheid van bestaande breedplaatvloerconstructies. Het onderzoek is uitgevoerd in nauwe samenwerking met mijn collega's van Adviesbureau Hageman en ir. G. Dieteren van TNO. Ik wil hen allen harte-lijk bedanken voor hun inzet.

Het uitvoeren van het onderzoek was niet mogelijk geweest als door het Betonhuis en andere be-trokkenen, de resultaten van het in hun opdracht uitgevoerde experimentele onderzoek niet met de onderzoekers waren gedeeld. Ik wil deze partijen hiervoor bedanken. Dit geldt eveneens voor de medewerkers van het Structures Laboratory Eindhoven van de TU/e. Dank voor de nauwgezetheid en de flexibiliteit bij het uitvoeren van de vele experimenten.

Tot slot wil ik de leden van de door het ministerie van BZK ingestelde klankbordgroep en de hoog-leraren Vrijling en Vambersky, werkzaam voor Horvat, bedanken voor hun input tijdens het uitvoe-ren van het onderzoek en hun kritische, maar nuttige opmerkingen bij het opstellen van dit rapport.

Rijswijk, 20 mei 2019
prof.ir. Simon N.M. Wijte

INHOUD

Samenvatting.....	5
Abstract	6
Symbolenlijst.....	7
1 Inleiding.....	9
2 Breedplaatvloeren.....	12
2.1 Inleiding.....	12
2.2 Traditionele toepassing.....	13
2.3 Innovaties in de laatste decennia	15
2.3.1 Puntvormig ondersteunde vloeren.....	15
2.3.2 Krachtsafdracht in twee richtingen.....	18
2.3.3 Stokenvloeren	19
2.3.4 Gewichtsbesparende voorzieningen	20
2.3.5 Zelfverdichtend beton.....	21
2.4 In de praktijk gerealiseerde vloerconstructies met breedplaten.....	21
2.4.1 Algemeen	21
2.4.2 Regelgeving.....	22
2.4.3 Gewapende breedplaatvloeren op basis van KIWA richtlijnen en NVN 6725	23
2.4.4 Voorgespannen breedplaatvloeren op basis van KIWA richtlijnen en NVN 6725	25
2.4.5 Bollenplaatvloeren op basis van CUR Aanbeveling 86	25
2.4.6 Breedplaatvloeren op basis van NEN-EN 13747	26
2.4.7 Conclusie.....	28
3 Verkenning van beschikbare literatuur.....	29
3.1 Inleiding.....	29
3.2 Onderzoek van Gudmand-Høyer	29
3.2.1 Analytisch onderzoek naar de momentcapaciteit	29
3.2.2 Experimenteel onderzoek naar de momentcapaciteit van BubbleDeck platen.....	30
3.3 Onderzoek van Lundgren	33
3.3.1 Numeriek onderzoek naar de momentcapaciteit	33
3.3.2 Combinatie van experimenteel en numeriek onderzoek.....	34
3.4 Onderzoek van Stehle e.a.	38
3.5 Onderzoek van Weglarzy	41
3.6 Onderzoek Da Silva	45
3.7 Onderzoek van Molkens e.a.	47
3.8 Samenvatting	49
4 Beschikbare resultaten experimenteel onderzoek	51
4.1 Inleiding.....	51
4.2 ‘Eindhoven Airport onderzoek’	51
4.3 BAM-Cobias	52
4.4 Breedplaten van traditioneel beton	54
4.5 Breedplaten van zelfverdichtend beton.....	56
4.6 Taskforce Versterken.....	57

4.7	Directe afschuifproeven.....	61
4.8	Hechtsterktemeting.....	64
4.9	Uittreksterkte tralieliggers	65
5	Analyse van onderzoeksresultaten	66
5.1	Inleiding.....	66
5.2	Beschrijving van het bezwijken.....	67
5.3	Bezwijken door vloeien van de koppelwapening	73
5.4	Bezwijken door onvoldoende verankering van de koppelwapening	74
5.5	Het bezwijken van het aansluitvlak	77
5.5.1	Inleiding	77
5.5.2	Afschuifsterkte aansluitvlak breedplaat aan ter plaatse gestort beton.....	78
5.5.3	Bezwijken door het uittrekken van de tralieligger.....	87
5.6	Verankering wapening in de breedplaat	91
5.7	Samenvatting	91
6	Enkele andere aspecten bij de constructieve beoordeling.....	94
6.1	Inleiding.....	94
6.2	Invloed van dwarskracht.....	94
6.3	Kopvoegen.....	96
6.4	Omstandigheden bij de belastingssituatie brand.....	97
7	Naden met een relatief geringe over te brengen buigtrekkracht.....	99
7.1	Inleiding.....	99
7.2	Situatie bij koppelwapening met geringe diameter.....	99
7.3	Experimentele resultaten bij koppelwapening met kleine diameters.....	101
7.4	Vergelijking berekeningsmethoden bij koppelwapening met geringe diameter.....	102
7.5	Voorstel voor aanpak van naden met geringe over te brengen trekkracht.....	104
7.6	Mogelijke voortzetting van het experimentele onderzoek.....	107
8	Nuanceringen bij het beoordelen van de constructieve veiligheid	108
8.1	Algemeen.....	108
8.2	Type en functie van het gebouw	109
8.3	Type constructie en zijn gedrag bij het falen van het kritische vloerdetail.....	109
8.3.1	Inleiding	109
8.3.2	Tafelconstructie.....	110
8.3.3	Middenveld van een puntvormig ondersteunde vloer	110
8.3.4	Eindveld van een puntvormig ondersteunde vloer en	113
8.3.5	Eindveld met specifieke breedplaatindeling.....	115
8.4	Samenvatting	117
9	Concept voor aanbevelingen voor rekenregels voor de beoordeling van bestaande constructies	118
9.1	Stappenplan, bepalingsmethoden en rekenregels	118
9.2	Vergelijking met het Stappenplan 2017.....	130
10	Aanbevelingen voor verder onderzoek en over het omgaan met het stappenplan	132

10.1	Aanbevelingen voor verder onderzoek.....	132
10.2	Fasering van de beoordeling van bestaande breedplaatvloerconstructies.....	132
Referenties		134

Bijlagen:

A	Samenvatting variabelen experimenten
B	Resultaten directe afschuifproeven
C	Berekening en overzicht van bezwijkverhouding
D	Invloed variabelen op verhouding _{MT}
E	Invloed dwarskracht op krachten in aansluitvlak
F	Proeven met koppelwapening met kleine diameters
G	Proefbelasten

Samenvatting

Naar aanleiding van de gedeeltelijke instorting van de in aanbouw zijnde parkeergarage bij Eindhoven Airport in 2017, is in opdracht van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, een onderzoek uitgevoerd naar de constructieve veiligheid van bestaande breedplaatvloerconstructies waarbij in de richting haaks op de naden tussen twee breedplaten sprake is van een primaire krachtsoverdracht. Als door de primaire krachtsoverdracht in de doorsnede bij de naad een significant positief moment en een eventuele dwarskracht ontstaan en de weerstand daartegen deels ontleend wordt aan koppelwapening die op de breedplaten is aangebracht en die zijn krachten over moet dragen op in de breedplaten opgenomen wapening, is sprake van een kritisch vloerdetail.

Mede door de eigenschappen van het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag, zijn de koppelwapening die in de druklaag aanwezig is en de in de breedplaat opgenomen wapening niet altijd goed in staat om trekkrachten aan elkaar over te dragen en kan vloeien van de wapening niet bereikt worden. Het bezwijken ontstaat dan nadat in het aansluitvlak, tussen beide wapeningsstaven, een horizontale scheur ontstaat. Het niveau van de bezwijklast kan significant lager zijn dan de weerstand waarbij ten tijde van het ontwerp van de vloer is uitgegaan.

Het onderzoek bestond uit een verkenning van de bouwwijze van breedplaatvloeren in Nederland in de laatste decennia. Hierbij wordt bevestigd dat het kritische detail bij meer constructies in Nederland is toegepast dan de parkeergarage alleen. Constructies waarbij dit aanwezig kan zijn, zijn met name utiliteitsgebouwen die na 1999 zijn opgeleverd.

Uit een verkenning van beschikbare literatuur blijkt dat reeds vanaf 2003 bij experimenteel onderzoek in het buitenland regelmatig het hiervoor beschreven bezwijkmechanisme is gevonden. In Nederland heeft dit niet geleid tot een eerdere aanpassing van de bouwwijze. Het bezwijkmechanisme waarop het ontwerp van bestaande breedplaatvloeren is gebaseerd, het vloeien van de koppelwapening, wordt ook gevonden bij een aantal in de literatuur beschreven experimenten.

Uit ten behoeve van het onderzoek uitgevoerde experimenten op breedplaatvloeren met een detailering die in Nederland weliswaar beperkt extreem doch enigszins gebruikelijk is, blijkt het beschreven bezwijkmechanisme ook te kunnen optreden. Uit de resultaten van de experimenten zijn rekenregels afgeleid voor twee bezwijkvormen van het aansluitvlak. Eén gebaseerd op de schuifsterkte van het aansluitvlak en de daarin aanwezige wapening en een tweede gebaseerd op de uittrekweerstand van de in het aansluitvlak aanwezige tralieligger. Deze rekenregels kunnen worden gebruikt voor een rekenkundige beoordeling van de bestaande breedplaatvloerconstructie volgens NEN 8700 'Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren - Grondslagen'. De rekenregels zijn niet geschikt om te worden toegepast bij het ontwerp van nieuwe constructies.

Voor deze beoordeling is in het rapport een stappenplan opgenomen, waarbij wordt nagegaan of er sprake is van een breedplaatvloerconstructie met het kritische detail. Daarna worden aanwijzingen gegeven hoe bij de aanwezige kritische details de grootte van het positieve moment en de dwarskracht kan worden getoetst aan de weerstand van de constructie in de beschouwde doorsnede. Tot slot worden aanbevelingen gegeven voor verder onderzoek en de fasering van de beoordeling van de bestaande constructies.

Abstract

After the partial collapse of the structure of the parking garage which was under construction at Eindhoven Airport, in 2017, in order of the Ministry of the Interior and Kingdoms Relations a research is performed into the structural reliability of existing structures of composite concrete floors made from precast concrete plates and a topping of in-situ cast concrete, where a primary load transfer is present in a direction perpendicular to the joint between two precast plates. When this load transfer results in a significant sagging moment, likely in combination with a shear force, at the section located above the joint and the resistance against these is partly ensured by coupling reinforcement bars applied in the topping which are lapped to reinforcement bars in the precast plate, a critical detail is present

Due to the properties of the interface between the precast plate and the topping of in-situ concrete the structural quality of the lap of the rebars can be reduced and the resistance can be less than required to achieve yielding of the rebar. Failure occurs after the appearance of a horizontal crack in the interface. Due to this the resistance of the structure can be significant lower than is assumed in the structural design.

The research consisted of an exploration of the construction method of composite concrete floors in the Netherlands in the last decades. From this it is confirmed that the critical detail has been applied in more structures in the Netherlands than the parking garage only. Buildings with structures where this can be present are mainly utility buildings that were completed after 1999.

An exploration of available literature shows that already from 2003 experimental research abroad has found the failure mechanism as described. In the Netherlands this did not lead to changes of the construction method at that time. The collapse mechanism on which the design of existing composite concrete floors is based, which assumes yielding of the lapping reinforcement, is also found in a number of experiments.

Experiments carried out for the purposes of the study on composite concrete floors with a detail that is, although limited extreme still is somehow common in the Netherlands, have shown that the collapse mechanism described can also occur in these structures. Design rules have been derived from the results of the experiments for two failure mechanisms of the interface. One based on the shear strength of the interface and the reinforcement present and a second based on the pull-out resistance of the lattice girder present in the interface. These design rules can be used for an assessment of the existing structures consisting of composite concrete floors in accordance with NEN 8700 'Assessment of existing structures in case of reconstruction and disapproval - Basic Rules'. The design rules are not supposed to be used for the design of a new structure.

For this assessment, a step-by-step plan has been included in the report, in which it is checked whether the existing structure is consisting of the critical details. Next, instructions are given on how the sagging moment and the shear force in the critical details can be checked against the resistance of the structure present. Finally recommendations are given for further research and the phasing of the assessment of existing structures.

Symbolenlijst

Latijnse hoofdletters

A_{eff}	is het effectieve oppervlak van het aansluitvlak tussen de druklaag en de breedplaat
A_s	is het oppervlak van de wapening
$A_{s,\text{aan}}$	is het aanwezige oppervlak van de wapening
$A_{s,\text{ben}}$	is het benodigde oppervlak van de wapening
$F_{R,\text{kop},a,d}$	is de rekenwaarde van de maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op de schuifsterkte van het aansluitvlak per breedte b ,
$F_{R,\text{kop},b,d}$	is de maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger
M_{Ed}	is de rekenwaarde van het moment ten gevolge van het belastingseffect
M_{Rd}	is de rekenwaarde van de momentweerstand
V_{Ed}	is de rekenwaarde van de dwarskracht ten gevolge van het belastingseffect
V_{Rd}	is de rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand

Latijnse kleine letters

b	is de breedte
c	is een coëfficiënt die de invloed van de treksterkte op de schuifsterkte van een aansluitvlak beschrijft, volgens NEN-EN 1992-1-1
c_{v1}	is een coëfficiënt die de invloed van de treksterkte op de schuifsterkte van een aansluitvlak beschrijft
d	is de effectieve hoogte van de beschouwde wapening
diepte	is de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat
f_b	is de aanhechtsterkte van de wapening in het beton
f_{ck}	is de karakteristieke cilinderdruksterkte van het beton
f_{cm}	is de gemiddelde druksterkte van het beton volgens NEN-EN 1992-1-1
$f_{cm,\text{cube}}$	is de gemiddelde kubusdruksterkte van het beton
f_{ctm}	is de gemiddelde treksterkte van het beton
f_{ctd}	is de rekenwaarde van de treksterkte van het beton
f_y	is de vloeigrens van het betonstaal
f_{yd}	is de rekenwaarde van de vloeigrens van het betonstaal
k_1	is een factor voor het afschuifmodel
k_2	is een factor voor het uittrekmodel
k_3	is een factor voor het uittrekmodel
l_b	is de verankeringslengte van een wapeningstaaf
$l_{b,\text{kop}}$	is de verankeringslengte van de koppelwapening volgens NVN 6725
$l_{b,\text{rqd}}$	is de basis verankeringslengte van een wapeningstaaf
l_d	is de laslengte van de overlappingslas
l_{eff}	is de lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening, gezien vanaf de naad

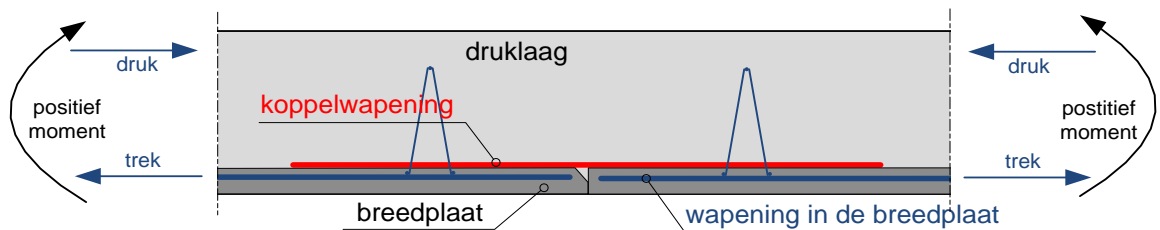
$l_{\text{koppelstaaf}}$	is halve lengte van de gehele koppelstaaf, lengte aan één zijde van de naad
p_d	is de rekenwaarde van de gelijkmatig verdeelde belasting
p_G	is de gelijkmatig verdeelde permanente belasting
p_Q	is de gelijkmatig verdeelde veranderlijke belasting
$v_{R,d,i}$	is de rekenwaarde van de schuifsterkte van het aansluitvlak met een oppervlak A_{eff}

Griekse letters

α	is de hoek tussen de lengte-as van de aansluitvlak doorkruisende wapening en het vlak van het aansluitvlak
α_i	is een correctiefactor volgend uit het statisch beschrijven van de verhouding tussen proefresultaten en een model voor de gemiddelde waarde van de eigenschappen
α_d	is een correctiefactor volgend uit het statisch beschrijven van de verhouding tussen proefresultaten en een model voor de rekenwaarde van de eigenschappen
γ_c	is de partiële factor voor betoneigenschappen
$\varnothing_{\text{koppel}}$	is de diameter van de koppelwapening
η_1	is een coëfficiënt om de aanhectomstandigheden te beschrijven;
η_2	is een coëfficiënt die een mindere aanhecting omschrijft bij staven met een diameter groter dan 32 mm
ρ	is de wapeningsverhouding
σ_n	de kracht uitgeoefend in de richting loodrecht op het aansluitvlak
τ_{bezwijk}	is de schuifsterkte van het aansluitvlak bij een bekende normaaldrukspanning
τ_0	is de initiële schuifsterkte van het aansluitvlak
μ	is een coëfficiënt die de invloed van de normaaldrukspanning op de schuifsterkte van een aansluitvlak beschrijft, volgens NEN-EN 1992-1-1
μ_v	is een coëfficiënt die de invloed van de normaaldrukspanning op de schuifsterkte van een aansluitvlak beschrijft

1 Inleiding

Op 27 mei 2017 is een deel van de in aanbouw zijnde parkeergarage van Eindhoven Airport ingestort. Uit onderzoek naar de oorzaak van die instorting blijkt dat vloeren die zijn uitgevoerd met breedplaten, , in bepaalde gevallen onvoldoende veilig kunnen zijn. Verslagen van de diverse onderzoeken, waarin deze conclusie wordt onderbouwd, zijn opgenomen in [1], [2] en [3]. De vloer van de parkeergarage had ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten, in het geval van een significant positief moment, onvoldoende weerstand om het effect van de belasting te kunnen weerstaan, zie figuur 1 voor het kritische vloerdetail. De oorzaak van onvoldoende weerstand is mede het gevolg van het niet toetsen van de krachtoverdracht tussen de koppelwapening op de breedplaat en de wapening in de breedplaat. De weerstand hiertegen wordt mede bepaald door de eigenschappen van het aansluitvlak van de druklaag op de breedplaat. Deze krachtoverdracht is bij meer soortgelijke breedplaatvloeren niet getoetst. Uit deze bevindingen is de vraag ontstaan of de constructies van bestaande bouwwerken met breedplaatvloeren in een gelijksoortige toepassing bij een significant positief moment, eventueel in combinatie met een dwarskracht, wel voldoende veilig zijn. Daarnaast is het zo dat in Nederland breedplaatvloeren al jarenlang in soortgelijke toepassingen zijn gebruikt en dat daarbij, zover bekend, geen gelijksoortige constructieve problemen zijn opgetreden.



figuur 1 Kritisch vloerdetail over de aansluiting ter plaatse van de langsnaden van een breedplaatvloer met de effecten van een positief buigend moment

Voor het beoordelen van de constructieve veiligheid van bestaande constructies zijn in het Bouwbesluit eisen opgenomen, die verwijzen naar NEN 8700 'Beoordeling van de constructieve veiligheid van een bestaand bouwwerk bij verbouw en afkeuren – Grondslagen'. Gelijk aan het ontwerpen van nieuwe constructies, is het uitgangspunt bij het beoordelen van bestaande constructies dat slechts een zeer kleine kans op bezwijken wordt toegestaan. De geaccepteerde kans op bezwijken bij de beoordeling van bestaande constructies is groter dan diezelfde kans bij nieuwbouw, dit mede omdat bij het opstellen van de eisen een afweging is gemaakt tussen de kosten van versterking en het risico van falen [4]. Als een breedplaatvloer niet geheel aan de eisen volgens NEN 8700 voldoet, wil dit echter niet zeggen dat de beschouwde breedplaatvloer op het punt van bezwijken staat. Net als bij de eisen voor nieuwbouw gaat NEN 8700 namelijk uit van veiligheidsmarges. Ook speelt mee dat, buiten de ingestorte parkeergarage, er tot nu toe geen andere gebouwen met breedplaatvloeren zijn gevonden waarbij sprake is geweest van lokaal bezwijken of grote constructieve problemen. Dit laat onverlet dat breedplaatvloeren die niet voldoen aan het veiligheidsniveau uit NEN 8700 uiteindelijk dienen te worden versterkt of dat het gebruik van de vloeren moet worden aangepast. Uit particuliere overwegingen kan ook als de constructie maar net voldoet aan de eisen voor bestaande constructies, ervoor worden gekozen de constructie te versterken. Het veiligheidsniveau voor bestaande constructies in het Bouwbesluit en NEN 8700 is namelijk slechts een publiekrechtelijk minimum niveau en eigenaren van gebouwen mogen een hoger veiligheidsniveau nastreven.

Als constructies worden versterkt, moet de constructie ten minste voldoen aan het veiligheidsniveau dat in NEN 8700 is beschreven voor de verbouwsituatie.

Om te kunnen bepalen of de constructies van bestaande breedplaatvloeren bij de specifieke toepassing voldoende veilig zijn, is door het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties aan Adviesbureau Hageman opdracht verstrekt om te komen tot rekenregels voor het beoordelen van deze constructies. Meer specifiek betreft het bestaande breedplaatvloerconstructies waarbij in de richting haaks op de naden tussen twee breedplaten sprake is van een primaire krachtsoverdracht die ter plaatse van de doorsnede bij de naad resulteert in een significant positief moment, eventueel in combinatie met een dwarskracht, en die geborgd wordt door koppelwapening die op de breedplaten is aangebracht, en die zijn krachten over moet dragen op in de breedplaten opgenomen wapening.

Een primaire krachtsoverdracht is een krachtsoverdracht die noodzakelijk is voor het bereiken van een evenwichtssituatie. Dit resulteert in een combinatie van moment en dwarskracht in de beschouwde doorsneden.

Voor het opstellen van rekenregels voor de beoordeling van de constructies was aanvullend onderzoek nodig. Dit onderzoek is gezamenlijk met TNO uitgevoerd. Omdat dit onderzoek relatief veel tijd zou vergen, zijn op relatief korte termijn na het bekend worden van de oorzaak van de schade in Eindhoven, in overleg met de Klankbordgroep breedplaatvloeren van het ministerie¹, een Informatiedocument met stappenplan [5] en een Toelichting op het informatiedocument [6] door het ministerie uitgebracht. Op basis van deze documenten kon door eigenaren en constructeurs een eerste risicobeoordeling worden uitgevoerd.

In het Informatiedocument is tevens beschreven dat aanvullend onderzoek benodigd is om na de eerste risicobeoordeling aan de hand van op te stellen rekenregels een beter onderbouwde definitieve beoordeling te kunnen uitvoeren. Dit aanvullende onderzoek is in verschillende fasen opgedeeld:

- Verkenning van beschikbare literatuur;
- Het opstellen van een voorstel voor experimenteel onderzoek waarmee de capaciteit van een breedplaatvloer bij een positief moment bij een plaatnaad wordt bepaald;
- Het uitvoeren van experimenteel onderzoek naar het gedrag van breedplaten;
- Evaluatie van beschikbare resultaten van het experimenteel onderzoek dat is uitgevoerd;
- Opstellen van rekenregels voor bestaande gebouwen met breedplaatvloeren.

Opgemerkt wordt dat het uitvoeren van het experimentele onderzoek geen onderdeel uitmaakt van de werkzaamheden die door Hageman in opdracht van het ministerie zijn uitgevoerd. Bij de opzet van het aanvullende onderzoek is beoogd dat relevant geacht experimenteel onderzoek in opdracht van derden zou worden uitgevoerd en dat de resultaten daarvan beschikbaar zouden worden gesteld aan de onderzoekers. Dit is ook zo uitgevoerd. De resultaten van het relevante experimentele onderzoek zijn beschreven in hoofdstuk 4 van dit rapport.

¹ In de klankbordgroep Breedplaatvloeren van het ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties zijn naast de onderzoekers van TNO en Hageman de volgende organisaties vertegenwoordigd: COBC, TU-Delft, Het Betonhuis, het Rijksvastgoedbedrijf, VNconstructeurs en Bouwend Nederland

Het voorliggende rapport geeft een samenvatting van de ten behoeve van het aanvullende onderzoek uitgevoerde werkzaamheden en resulteert in rekenregels voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van bestaande breedplaatvloeren met een primaire krachtsoverdracht in de vloer ter plaatse van de naden tussen twee breedplaten waarbij in een doorsnede bij de naad een significant positief moment optreedt. De constructieve veiligheid wordt hierbij met name beoordeeld door het toetsen van de optredende momenten en dwarskrachten aan de moment- en dwarskrachtweerstand ter plaatse van de naden tussen de breedplaten. Met het beschikbaar zijn van deze rekenregels is het nut van het toepassen van het stapplan dat in 2017 in [5] en [6] is beschreven, komen te vervallen.

Nadrukkelijk wordt gesteld dat de rekenregels uitsluitend bedoeld zijn voor het beoordelen van bestaande constructies en niet geschikt zijn voor het ontwerpen van nieuwe constructies. Voor het ontwerpen van nieuwe constructies wordt verwezen naar de normen voor nieuwbouw, VARCE 12 (<https://www.cementonline.nl/varce-12-detaillering-aansluitvlak-breedplaatvloeren>) en aanvullende regels die ten tijde van het opstellen van dit rapport nog in ontwikkeling zijn.

2 Breedplaatvloeren

2.1 Inleiding

Breedplaatvloeren zijn betonnen vloeren die bestaan uit een combinatie van een geprefabriceerde onderschil met een daarop ter plaatse gestorte laag beton. De onderschil wordt in het algemeen breedplaat genoemd, zie foto 1. De ter plaatse gestorte laag beton (in-situ beton) wordt in dit rapport aangeduid als druklaag. Breedplaatvloeren worden ook wel aangeduid als schilvloer of bekistingsplaatvloer.

De breedplaat heeft een dikte van ten minste 50 mm, maar kan desgewenst ook dikker worden gemaakt. De breedplaat wordt vervaardigd bij een breedplaatproducent. Bij de vervaardiging wordt de wapening die aan de onderzijde van de totale vloer benodigd is, zo veel als mogelijk is in de breedplaat opgenomen. Dat geldt ook voor installatievoorzieningen zoals centraaldozen en ventilatiekanalen. De breedplaten hebben een variabele lengte en vaak een standaard breedte van 2,4 m tot 3 m. Smallere breedplaten kunnen worden gemaakt als pasplaat.



foto 1 Breedplaten na de productie (bron: <https://www.cementonline.nl/stand-van-zaken-breedplaatvloeren>)

De wapening in de breedplaat kan zowel betonstaal als voorspanstaal zijn. Bij toepassing van voorspanstaal is de wapening voorgerekte zodat in de breedplaat een drukspanning wordt veroorzaakt.

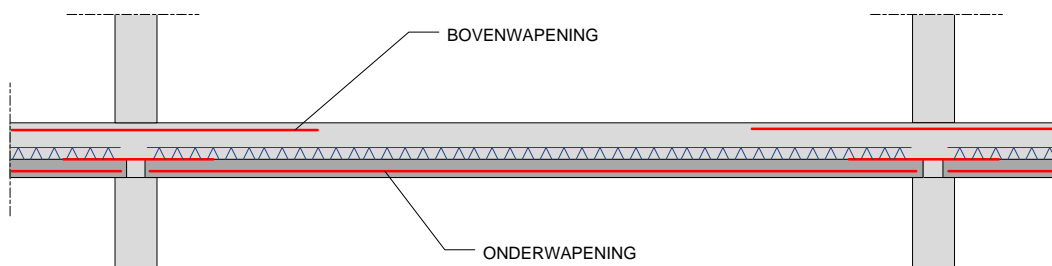
Na de vervaardiging worden de geprefabriceerde breedplaten naar de bouwplaats vervoerd. Daar worden de breedplaten op vooraf gestelde jukken en de definitieve opleggingen zoals wanden en kolommen gelegd, zie foto 2. Vervolgens worden de overige wapening, in te storten installatievoorzieningen en de randkist aangebracht, waarna de druklaag wordt gestort. Als het in-situ beton voldoende is verhard om de op de vloer aangrijpende belastingen te kunnen dragen, kunnen de jukken onder de vloer worden verwijderd en is een vrijdragende breedplaatvloer verkregen.



foto 2 Breedplaten geplaatst op jukkan voor het storten van de druklaag, bron: <https://www.nbd-online.nl/product/132146-breedplaatvloeren-van-olbecon>

2.2 Traditionele toepassing

De traditionele toepassing van de breedplaatvloer is die waarbij de breedplaat overspant van dragende wand naar dragende wand en de onderwapening in de vloer zo continu over de gehele lengte van het vloerveld aanwezig is in de geprefabriceerde breedplaat, zie figuur 2. De vloeren worden daarbij vooral toegepast in woningen en woongebouwen waarbij de verticale draagconstructie vooral uit wanden bestaat.



figuur 2 Toepassing van breedplaatvloeren opgelegd op wanden

Bij deze breedplaatvloeren moeten de volgende onderdelen van de vloer constructief worden getoetst om te waarborgen dat de constructie voldoende capaciteit heeft:

- de onderwapening in breedplaat moet voldoende zijn om bij de aanwezige vloerdikte, in samenwerking met de druklaag, de momentweerstand zo groot te laten zijn dat het veldmoment dat wordt veroorzaakt door de op de vloer aangrijpende belastingen kan worden weerstaan;

- de bovenwapening in de druklaag moet voldoende zijn om bij de aanwezige vloerdikte, eventueel in samenwerking met het beton in de breedplaat de momentweerstand zo groot te laten zijn dat de steunpuntsmomenten kunnen worden weerstaan;
- de samenwerking tussen de breedplaat en de druklaag wordt getoetst door na te gaan of het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag in staat is om de in de vloer optredende dwarskrachten en langsafschuifkrachten te weerstaan.

De afstand tussen het maximum moment en het momentennulpunt is beschikbaar om de maximale trekkracht in de wapening in de breedplaat, via langsafschuiving van de breedplaat over te dragen aan het beton van de druklaag.

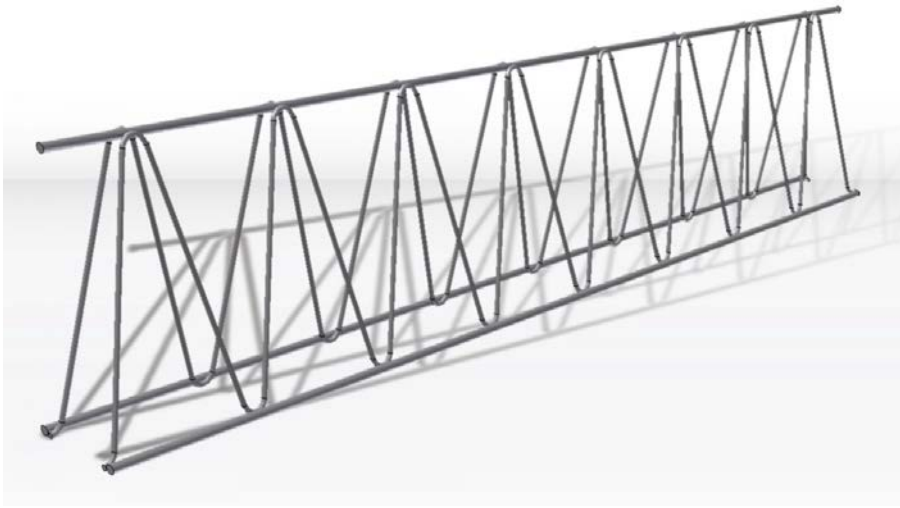


foto 3 Tralieligger, bron: <https://www.ebawe.de/nl/tralieliggerlasmachines-voor-de-productie-van-standaard-tralieliggers-met-vga>

De weerstand van het aansluitvlak wordt bepaald door de ruwheid van de bovenzijde van de breedplaat en de hoeveelheid wapening die het aansluitvlak doorkruist. Wapening die het aansluitvlak doorkruist zijn bijvoorbeeld de door bij de productie van de breedplaten aangebrachte tralieliggers, zie foto 3. Deze tralieliggers worden voor het storten van de breedplaat boven op de in de breedplaat opgenomen wapening geplaatst en steken, na het storten voor het grootste deel boven de bovenzijde van de breedplaat uit.

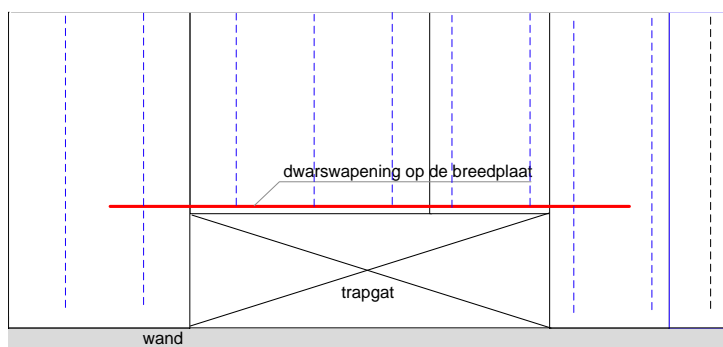
Mede om de breedplaat tijdens het transport en de uitvoering voldoende sterkte te geven lopen de tralieliggers bij met betonstaal gewapende breedplaten door over de volledige lengte van de plaat. Bij voorgespannen breedplaten is dit niet noodzakelijk.

Bij de aanwezigheid van een gelijkmatig verdeelde belasting is in de overspanningsrichting sprake van een primaire krachtafdracht. In de richting haaks op de overspanning treden slechts momenten op van beperkte grootte. De wapening in de richting haaks op de overspanning is daarom ook beperkt in hoeveelheid. De taak van deze wapening is het verdelen van op de vloer aangrijpende puntlasten waarvan het effect over een breedte moet worden gespreid. Deze wapening wordt ook wel verdeelwapening genoemd.

Ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten is, vanwege de naad, geen verdeelwapening aanwezig. Bij vloeren waarop relatief kleine veranderlijke belastingen aangrijpen, zoals bij woningen,

was het niet verplicht hier aanvullende wapening aan te brengen. Bij hogere veranderlijke belastingen is het aanbrengen van dwarswapening over de voeg voorgeschreven. Deze wapening wordt voor het storten van de druklaag over de voeg, op de breedplaten gelegd. In het algemene gebruik worden de staven direct op de breedplaat gelegd.

Bij vloersparingen met een breedte gelijk aan één of anderhalve breedplaatbreedte, zoals een trapgat, is de directe afdracht van belastingen naar de dragende wanden onderbroken. In dat geval wordt in de betonvloer een raveling gemaakt die de krachten in de richting haaks op de feitelijke overspanningsrichting kan afdragen. De raveling wordt gemaakt door het aanbrengen van extra dwarswapening. Deze extra dwarswapening wordt, omdat het over de voegen tussen verschillende breedplaten doorloopt, niet in de breedplaten opgenomen maar op de breedplaten gelegd, zie figuur 3. In deze situatie is sprake van een primaire krachtafdracht in twee richtingen.

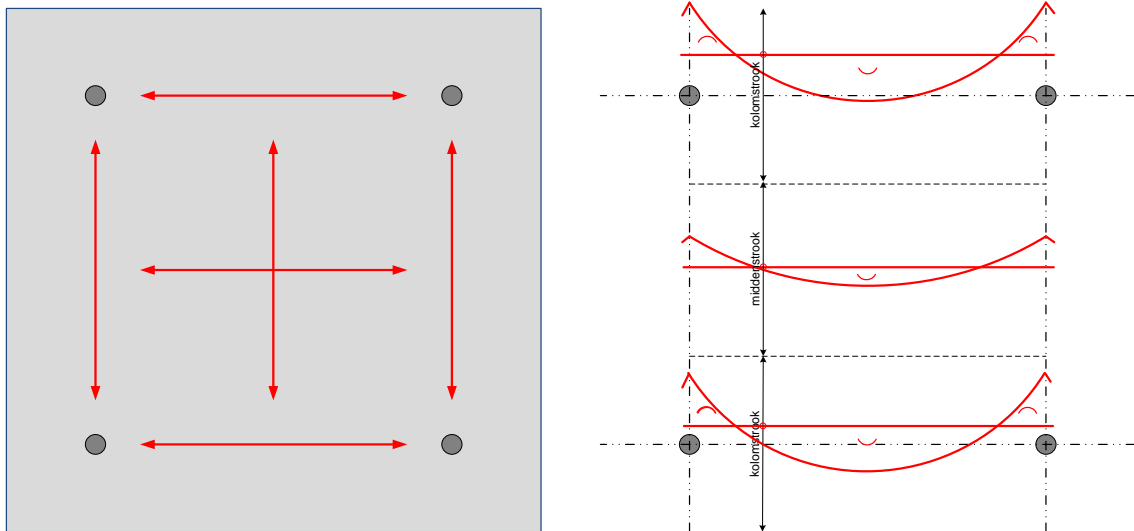


figuur 3 Extra dwarswapening bij een trapgat in een woning

2.3 Innovaties in de laatste decennia

2.3.1 Puntvormig ondersteunde vloeren

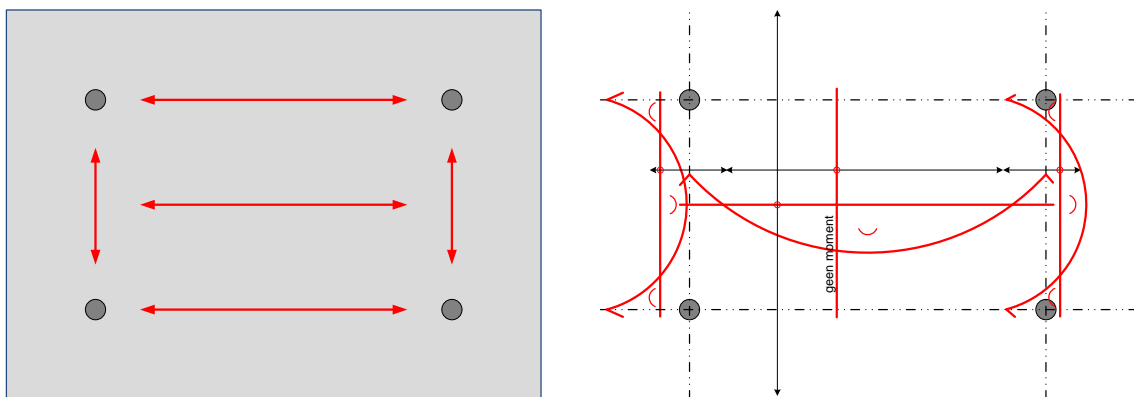
Het toepassingsgebied van de breedplaatvloer is in de laatste dertig jaar uitgebreid van de hiervoor beschreven toepassing naar constructief meer complexe toepassingen zoals vloeren die worden ondersteund door kolommen, ook wel aangeduid als puntvormig ondersteunde vloeren of vlakke plaatvloeren. De krachtdverdeling bij puntvormig ondersteunde vloeren is wezenlijk anders dan die bij lijnvormig ondersteunde vloeren. De belasting op de vloer moet bij puntvormig ondersteunde vloeren in twee richtingen worden afgedragen, zie figuur 4.



figuur 4 Krachtsafdracht bij een puntvormig ondersteunde vloer

De bepaling van de krachtsafdracht in deze vloeren kan op verschillende wijzen worden gedaan. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen methoden gebaseerd op de lineaire elasticiteitstheorie en methoden waarbij gebruik wordt gemaakt van plastisch en niet-lineair elastisch constructiegedrag. Bij toepassing van de lineaire-elasticiteitstheorie zullen de momenten zich enigszins gelijkmatig verdelen over de plaat, waarbij met name de steunpuntsmomenten zich zullen concentreren in de stroken die over de kolommen lopen. Bij platen waarbij de overspanning tussen de kolommen gelijk zijn zal de krachtsverdeling geheel symmetrisch zijn en zijn de veldmomenten in beide richtingen, in het midden van de vloer gelijk.

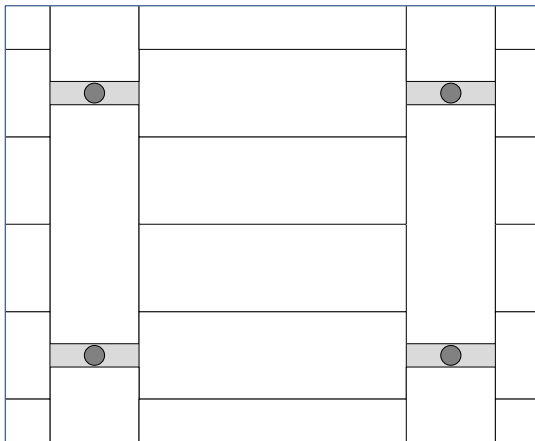
Bij het bepalen van de krachtsverdeling volgens de plasticiteitstheorie kan bijvoorbeeld de vloeilijnen theorie worden toegepast of kan een evenwichtssysteem worden gekozen. Een voorbeeld van een evenwichtssysteem is dat van een kinderbint-moerbintconstructie, waarbij de krachtsafdracht eerst plaatsvindt in de richting van de grootste overspanning en vervolgens via versterkte stroken in de kortste overspanningsrichting naar de kolommen wordt afgedragen, zie figuur 5.



figuur 5 Onderscheid tussen bepalingsmethoden voor de krachtsverdeling

Het lijkt zo dat het toepassen van een evenwichtsmethode gebaseerd op het kinderbint-moerbint principe goed aansluit bij de uitvoering van een puntvormig ondersteunde vloer met breedplaten.

Dit omdat de in de breedplaten opgenomen wapening vaak één oriëntatie hebben en continu is in de richting evenwijdig aan de lengterichting van de breedplaten. Bij een breedplaatverdeling zoals geschetst in figuur 6 komt de positie van onderwapening die evenwijdig aan de langsnaden ligt, dan goed overeen met de volgens de methode bepaalde veldmomenten in de vloer. Bij dit soort vloeren moet de vloer ter plaatse van de naad aan het einde van de kinderbinten worden getoetst op zowel de moment- als de dwarskrachtweerstand. Boven de stroken die over de kolommen doorlopen, moet in beide richtingen bovenwapening aanwezig zijn om de steunpuntsmomenten te kunnen opnemen.



figuur 6 Voorbeeld van breedplaatverdeling bij een puntvormig ondersteunde vloer

Het gebruik van een krachtsverdeling op basis van de kinderbint-moerbint benadering zal pas als zodanig kunnen optreden na het optreden van scheurvorming die ingegeven wordt door de krachtsverdeling volgens de lineaire-elasticiteitstheorie. Naarmate de krachtsverdeling volgens de evenwichtsmethode meer afwijkt van die volgens de lineaire-elasticiteitstheorie zal de scheurvorming meer omvangrijk zijn. Het beperken van de scheurvorming in de betonvloer is noodzakelijk om diverse redenen, het verkrijgen van een duurzame (durability) constructie, vooral van belang bij constructies in een minder mild milieu, zoals bijvoorbeeld bij parkeergarages, en voor het waarborgen van de ponscapaciteit van de vloer ter plaatse van de aansluiting met de kolommen.

Het is vanwege deze redenen dat in de voorschriften is voorgeschreven dat de krachtsverdeling in puntvormig ondersteunde vloeren moet zijn bepaald volgens de lineaire-elasticiteitstheorie en dat herverdeling van momenten daarbij slechts zeer beperkt is toegestaan. In de praktijk wordt voor het bepalen van de krachtsverdeling in deze constructies vaak gebruik gemaakt van eindige elementenmethodeprogramma's, die uitgaan van de lineaire-elasticiteitstheorie, of tabellen, die dezelfde theorieën als grondslag hebben. Dit leidt er toe dat in een puntvormig ondersteunde vloer in twee richtingen veldmomenten optreden, die enigszins gelijkmatig zijn verdeeld over de sneden met de maatgevende momenten. Bij als breedplaatvloer uitgevoerde puntvormig ondersteunde vloeren zullen daarom ter plaatse van de naden tussen de breedplaten significante momenten aanwezig zijn, die moeten kunnen worden weerstaan door de aanwezige wapening. Als het locaties betreft waar het niet de maximaal optredende momenten zijn, treden deze momenten altijd op in combinatie met een dwarskracht. Ten gevolge van de naad tussen de breedplaten kan de benodigde wapening, die in de breedplaat is opgenomen, niet doorlopen. In de praktijk wordt daarom ter plaatse van de naad dwars- of koppelwapening op de breedplaat aangebracht, zie figuur 1.

Deze koppelwapening dient, door het toepassen van afstandhouders of onderliggende dwarsstaven op enige afstand vanaf de bovenzijde van de breedplaat geplaatst, zodat de staven goed omhuld kunnen worden door het beton van de druklaag. In artikel 4.4.1.2(9) van NEN-EN 1992-1-1 is gesteld dat de afstand tussen de prefab plaat en de wapeningsstaaf ten minste gelijk moet zijn aan de diameter van de staaf. In de praktijk worden de staven echter vaak direct (koud) op de breedplaten gelegd, zie foto 4.

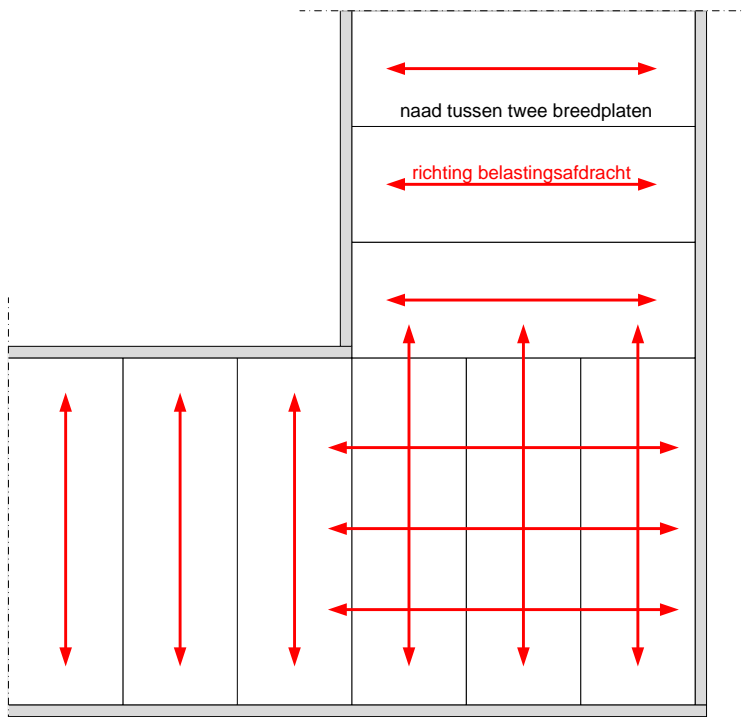


foto 4 Koppelwapening op de breedplaat, bron: <https://predalco.be/wapening-betonnetten-predallen/>

Opgemerkt wordt dat onverlet het voorgaande een relatief groot aantal vloeren is ontworpen op basis van een krachtsverdeling die het kinderbint-moerbint principe volgt. Dit geldt vooral voor zogenaamde strokenvloeren, zie ook 2.3.3.

2.3.2 Krachtsafdracht in twee richtingen

De noodzaak voor primaire krachtsafdracht in twee richtingen is noodzakelijk bij puntvormig ondersteunde vloer, maar kan ook voorkomen bij vloeren die deels of geheel door wanden zijn ondersteund. Een voorbeeld van een dergelijke situatie is geschetst in figuur 7.



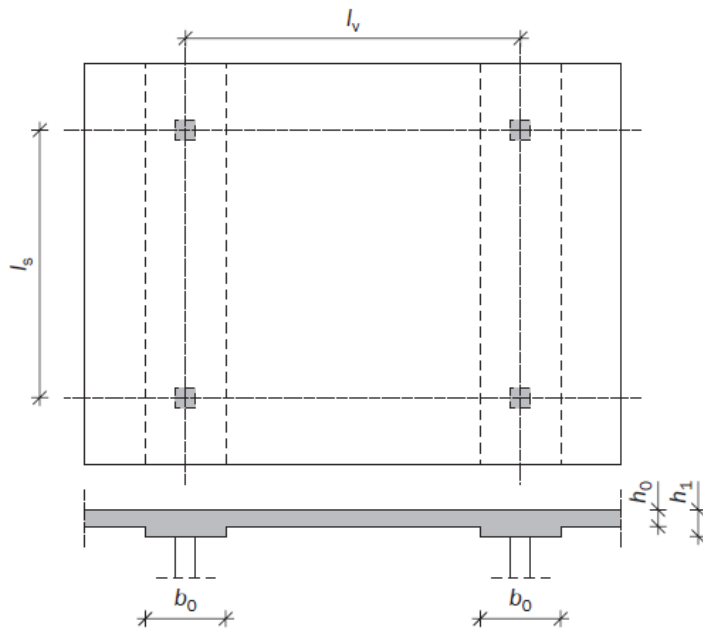
figuur 7 Krachtsverdeling in een breedplaatvloer ter plaatse van een hoek van een gebouw

Opgemerkt wordt dat bij dit type constructie er een minder grote noodzaak is voor het toepassen van de lineaire-elasticiteitstheorie bij het bepalen van de krachtsverdeling. Dit omdat hierbij geen ponsgedrag rondom kolommen aanwezig is. Daarnaast is de duurzaamheid van de constructie, als deze in een binnenmilieu aanwezig is, minder relevant. Wat resteert zijn eventuele esthetische eisen. Wel moet worden opgemerkt dat als een krachtsverdeling wordt bepaald volgens een evenwichtsmodel de constructie over voldoende vervormingscapaciteit moet beschikken om de aangenomen krachtsverdeling te kunnen laten optreden.

Tijdens onderzoeken uitgevoerd naar aanleiding van het uitbrengen van het stappenplan voor de eerste beoordeling van bestaande breedplaatvloeren [5] is ook een extreme situatie aangetroffen waarbij bij een in één-richting overspannende vloer, met een overspanning van circa 14 meter is uitgevoerd met een breedplaat met een lengte van 10 meter. In dat geval bevindt zich op 2 meter van de oplegging toch nog een kritische naad die beoordeeld moet worden.

2.3.3 Strokvloeren

Een strokvloer is een soort puntvormig ondersteunde vloer waarbij in één richting over een rij kolommen doorlopende verzwaarde stroken aanwezig zijn. De hoogte van de verzwaarde stroken is groter dan de hoogte van het overige deel van de vloer. Een overzicht van een strokvloer is geschetst in figuur 8. De breedplaat-indeling bij dit type vloeren is zoals in figuur 6 is geschetst.



figuur 8 Strokvloer

Vanwege het verschil in hoogte tussen de verzwaarde stroken en de vloer wordt dit type vloer uit om de vloer te vervaardigen met breedplaten. De breedplaten die onderdeel uitmaken van de vloer kunnen dan opgelegd worden op de breedplaat van de verzwaarde strook.

Hoewel het vanwege de hogere stijfheid van de verzwaarde strook logisch lijkt om de krachtsverdeling in de vloer te bepalen middels een kinderbint-moerbint principe, wordt dit in CUR-Aanbeveling Strokvloeren [7] uitsluitend toegestaan als de verzwaarde strook voldoende stijf is om krachtsafdracht door de vloer parallel aan de verzwaarde strook niet significant te laten zijn. Om dezelfde reden als bij vlakke plaatvloeren, dient de krachtsverdeling in een strokvloer te zijn gebaseerd op de lineaire elasticiteitstheorie. Dit leidt er toe dat in strokvloeren vaak over de naden tussen de breedplaten sprake is van een significante belastingsafdracht. Er moet dan gelijk aan de situatie bij de vlakke plaatvloer ook koppelpapening over de naden worden aangebracht.

Opgemerkt wordt dat voor het uitbrengen van de CUR-Aanbeveling, het meer gebruikelijk was om de krachtsverdeling in strokvloeren te bepalen via het kinderbint-moerbint principe.

2.3.4 Gewichtsbesparende voorzieningen

In de delen van betonconstructies waarbij momenten de overheersende inwendige krachten zijn en de dwarskracht relatief klein, kan gewicht worden bespaard door in het midden van de doorsnede geen beton aan te brengen. Dit principe is al vaak toegepast. In het begin werd dit gedaan door holle kokers of blokken schuim in het beton in te storten.

Vanaf de jaren negentig van de vorige eeuw zijn meer geïndustrialiseerde alternatieven voor de gewichtsbesparende voorzieningen beschikbaar gekomen. Dit in de vorm van bollen (BubbleDeck (1997) en Cobiax) en meer rechthoekige boxen (Airdeck en U-boot). Deze gewichtsbesparende voorzieningen worden vaak gecombineerd met de geprefabriceerde breedplaat, zie foto 5. Dat wil zeggen dat de voorzieningen in de productielocatie worden aangebracht in of op de breedplaat en zo nodig ten behoeve van het storten van de druklaag middels wapening worden gefixeerd.

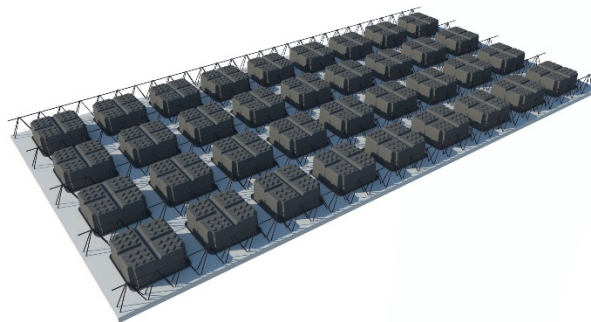


foto 5 Breedplaten met gewichtsbesparende voorzieningen BubbleDeck (links) en U-boot (rechts)

Voor het constructief ontwerp van vloeren met bolvormige gewichtsbesparende voorzieningen is de CUR-Aanbeveling Bollenplaatvloeren [8] opgesteld. Deze Aanbeveling geeft aanvullende maatregelen bij NEN 6720 (VBC1995) [9], de norm die in die periode van toepassing was voor het ontwerp van betonconstructies. Na het vervangen van NEN 6720 door NEN-EN 1992-1-1 is de aanbeveling verouderd.

In de aanbeveling wordt ook het gebruik van de BV-tralieligger beschreven. Dit is een enkelbenige tralieligger die vooral wordt toegepast om de bollen op de breedplaat op zijn plaats te houden.

2.3.5 Zelfverdichtend beton

Bij het storten van traditioneel beton, moet de betonmortel verdicht worden. Dit kan door het gebruik van trilnaalden of door de bekisting in trilling te brengen. Dit gaat gepaard met veel lawaai en leidt ook tot slijtage van de bekisting. Er is daarom lange tijd onderzoek gedaan naar betonmortel die niet verdicht hoeft te worden, het zogenaamde zelfverdichtend beton (ZVB). Dit beton wordt sinds 2000 in Nederland toegepast. Onder andere om de arbeidsomstandigheden te verbeteren wordt dit type vaak in de prefab betonindustrie gebruikt. Daarbij wordt, of werd, het ook door enkele producenten gebruikt bij de productie van geprefabriceerde breedplaten.

Uit onderzoek [10] is bekend dat de aanhechting tussen zelfverdichtend beton en traditioneel beton beperkt kan zijn. Tot nu toe heeft dit echter niet geleid tot aangepaste rekenregels voor het beoordelen van de afschuifcapaciteit van aansluitvlakken tussen zelfverdichtend en traditioneel beton.

2.4 In de praktijk gerealiseerde vloerconstructies met breedplaten

2.4.1 Algemeen

Voor het vervaardigen van breedplaten en breedplaatvloeren en het constructief ontwerp zijn door de tijd diverse normen en richtlijnen van toepassing geweest. In de volgende paragraaf is beschreven welke dat zijn geweest.

In de normen en richtlijnen staan onder andere eisen waaraan de tralieliggers in de breedplaten, met betrekking tot afmetingen en posities, dienen te voldoen. Ook zijn er regels in opgenomen over de

laslengte van in het werk, op de breedplaten aangebrachte wapening. Uit een analyse van de normen en richtlijnen blijkt dat er met betrekking tot tralieliggers en laslengte vier situaties te onderscheiden zijn. In paragraaf 2.4.2 zijn deze vier situaties toegelicht. Voor de vier situaties is in paragrafen 2.4.3 t/m 2.4.6 aangegeven wat de eisen zijn geweest aan de afmetingen en posities van tralieliggers en de laslengte van in het werk op de breedplaat aangebrachte wapening.

Bij de tralieliggers zijn in de regelgeving onder- en/of bovengrenzen aangegeven waaraan moet worden voldaan. Dit geldt bijvoorbeeld voor de diameter van de diagonalen. Met de beschikbare informatie van de fabrikanten is nagegaan wat de meest ongunstige waarden zijn waarvan in de analyse van de sterkte van een breedplaatvloer bij een positief moment ter plaatse van een plaatnaad, kan worden uitgegaan.

2.4.2 Regelgeving

De oudste bekende regelgeving voor breedplaten (en tralieliggers) in Nederland is opgenomen in de KIWA beoordelingsrichtlijnen, die dateren uit 1989. Voor de gewapende en voorgespannen breedplaatvloeren zijn dat respectievelijk BRL-K 211/02 en BRL-K 211/03 [11] en voor de tralieliggers is dat BRL-K 712/03 [12]. Voor het attesteren van breedplaten werd vanaf eind jaren tachtig van de vorige eeuw gebruik gemaakt van deze KIWA Beoordelingsrichtlijnen. Daarna is NVN 6725 – ‘Vrijdragende systeemvloeren van vooraf vervaardigd beton’ verschenen. Deze voornorm is in 1994 eerst als ontwerpversie verschenen en vervolgens in definitieve vorm uitgebracht in 1999 en gereviseerd in 2008. In deze norm is aansluiting gezocht bij de op dat moment geldende norm voor het berekenen van betonconstructies NEN 6720 (VBC 1995). De regels met betrekking tot de afmetingen en posities van de tralieliggers en de laslengte van in werk op de breedplaat aangebrachte wapening in de NVN 6725 zijn gelijk aan de regels die in de KIWA beoordelingsrichtlijnen waren opgenomen. Bij het attesteren van breedplaatvloeren werd vanaf halverwege de jaren negentig van de vorige eeuw gebruik gemaakt van NVN 6725.

In de attesten van de bollenplaatvloeren van fabrikant BubbleDeck [13] [14] [15] zijn vanaf 1999 afwijkende, enkelvoudige tralieliggers beschreven. In 2001 is specifiek voor bollenplaatvloeren CUR Aanbeveling 86 – ‘Bollenplaatvloeren’ 86 [8] uitgebracht. Deze CUR aanbeveling sluit aan bij NEN 6720. In BRL 0203 – ‘Vrijdragende systeemvloeren van vooraf vervaardigd constructief beton’ is over de toepassing van CUR Aanbeveling 86 het volgende aangegeven (citaat): “Voor vloersystemen die niet (volledig) voldoen aan NVN 6725 dienen de aanvullende eisen opgenomen te zijn in een CUR Aanbeveling of deze BRL”. Op basis daarvan kan worden gesteld dat bij het attesteren van bollenplaatvloeren vanaf het begin van deze eeuw gebruik is gemaakt van de NVN 6725, aangevuld met de eisen in CUR-Aanbeveling 86. Dit betekent dat bij bollenplaatvloeren de afmetingen en posities van tralieliggers en de laslengte van in het werk op de breedplaat aangebrachte wapening de eisen in CUR Aanbeveling 86 gebruikt als daarvoor in CUR Aanbeveling 86 aanvullende de eisen ten opzichte van NVN 6725 zijn gegeven.

Op dit moment moeten breedplaatvloeren en bollenplaatvloeren voldoen aan productnorm NEN-EN 13747 [16]. Deze norm moet worden toegepast naast de op dit moment geldende norm voor het ontwerpen van betonconstructies NEN-EN 1992-1-1 (Eurocode 2).

Op basis van de beschouwing van de normen en richtlijnen voor breedplaten kunnen de volgende vier situaties worden onderscheiden:

1. Gewapende breedplaatvloeren ontworpen op basis van KIWA Beoordelingsrichtlijnen en de NVN 6725;
2. Voorgespannen breedplaatvloeren ontworpen op basis van KIWA Beoordelingsrichtlijnen en de NVN 6725;
3. Bollenplaatvloeren ontworpen op basis van de NVN 6725 aangevuld met CUR-Aanbeveling 86;
4. Gewapende en voorgespannen breedplaatvloeren ontworpen op basis van NEN-EN 13747 [16] en NEN-EN 1992-1-1 (Eurocode 2).

Hierna is voor de vier bovenstaande situaties samengevat welke eisen er zijn gesteld aan de afmetingen en posities van de tralieliggers en de laslengte van in het werk op de breedplaten aangebrachte wapening. Ook is daarbij aangegeven wat aangenomen zou kunnen worden voor wat in de praktijk naar verwachting minimaal is toegepast.

2.4.3 Gewapende breedplaatvloeren op basis van KIWA richtlijnen en NVN 6725

Het ontwerp van gewapende breedplaatvloeren is tot ca. 2012 is gebaseerd geweest op de genoemde KIWA richtlijnen en NVN 6725. Er is daarin onderscheid gemaakt tussen twee typen tralieliggers: type 1 en type 2. In NVN 6725 is het onderscheid tussen beide typen beschreven. In het kort komt dit neer op dat de minimale diameter van de staven bij type 1 groter is dan bij type 2. Zo is de minimale diameter van de onderstaaf bij type 1 gelijk aan 5 mm en bij type 2 gelijk aan 4 mm. In tabel 1 is aangegeven welke (constructieve) functies beide typen tralieliggers kunnen vervullen.

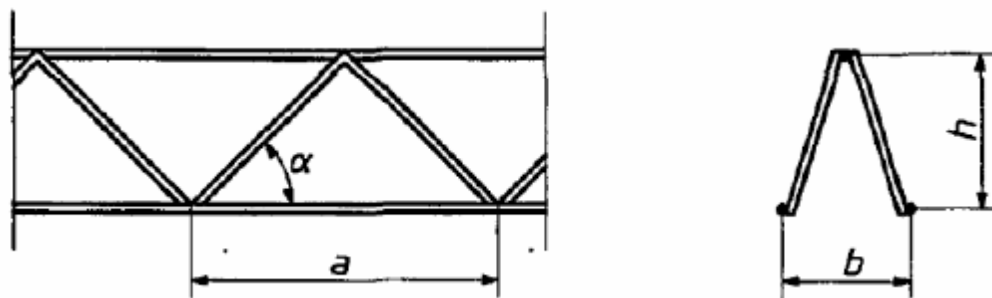
tabel 1 Aspecten bij toepassing van tralieliggers uit [17]

Omschrijving	Type 1	Type 2
Onderstaven mogen in de sterkteberekening worden betrokken	x	–
Bovenstaven mogen in de sterkteberekening worden betrokken	–	–
Tralieligger mag worden toegepast als afschuifwapening zoals bedoeld in 8.2.5 van NEN 6720	x	x
Diagonaalstaven en bovenstaven hebben een functie tijdens transport, hijsen en in de bouwfase	x	–
Tralieligger fungeert als afstandhouder voor het aanbrengen van bovenwapening op de bouwplaats	x	x

De eisen aan de tralieliggers voor gewapende breedplaten volgens de KIWA richtlijnen en NVN 6725 zijn hierna samengevat. Indien van toepassing is daarbij ook aangegeven wat de meest ongunstige situatie is waarvan in de praktijk kan worden uitgegaan:

- De breedplaten moeten over de gehele lengte altijd van tralieliggers zijn voorzien;
- De tralieliggers moeten ten hoogste 400 mm uit de rand van de plaat zijn gepositioneerd. In verband met uitvoeringstoleranties mocht deze maat met 50 mm groter zijn. In de praktijk kan de tralieligger daarmee maximaal 450 mm uit de rand van de plaat liggen;
- De hart-op-hart afstand van de tralieliggers mag maximaal 850 mm zijn. In de praktijk mocht deze maat met 100 mm groter zijn. De hart-op-hart afstand daarmee maximaal 950 mm bedragen;
- Over de diameter van de diagonalen is aangegeven dat deze minimaal 4 mm voor tralietype 1 en 4,5 mm voor type 2 moet zijn. Op basis van een inventarisatie van beschikbare stukken wordt gesteld dat ervan mag worden uitgegaan dat in de praktijk tralieliggers met een diameter van ten minste 5 mm zullen zijn toegepast;

- De afstand tussen de diagonalen van de tralieliggers ter plaatse van de langsdraden (afstand a in figuur 9) is begrensd op 210 mm. In de praktijk is meestal een afstand van 200 mm toegepast;
- Voor de breedte van de talieligger, b in figuur 9, geldt dat deze minimaal 50 mm en maximaal 90 mm mag bedragen. In de praktijk is meestal een breedte van 70 mm of meer gebruikt;
- Voor de hoogte van de tralieligger, h in figuur 9, geldt dat deze bij type 1 tralieliggers minimaal 70 mm en maximaal 250 mm mag bedragen en bij type 2 minimaal 50 mm en maximaal 300 mm. Welke hoogte in de praktijk is toegepast, is onder andere afhankelijk van de dikte van de vloer;
- De helling α (figuur 9) dient minimaal 45 graden te bedragen om de tralieligger mee te mogen nemen als dwarskrachtwapening conform art. 8.2.4 van NEN 6720;
- Voor de verankeringsdiepte van de tralieliggers is geen minimale maat genoemd, maar is aangegeven dat in verband met vervoer van de breedplaten de tralieliggers voldoende diep in de breedplaat moeten zijn verankerd.



figuur 9 Variabelen bij de tralieligger

In de KIWA richtlijn en NVN 6725 (art. 6.7.2.2) is ook een eis opgenomen voor de laslengte van in het werk (op de breedplaat) aangebrachte koppelwapening:

$$l_{di} = 1,2 l_d A_{s,ben}/A_{s,aan} + 150 \text{ mm} \quad (1)$$

waarin:

l_{di} is de lengte waarover de staven in en op de breedplaat elkaar overlappen;

l_d is de laslengte volgens de voor het ontwerp van betonconstructies geldende norm (art. 9.8 van NEN 6720).

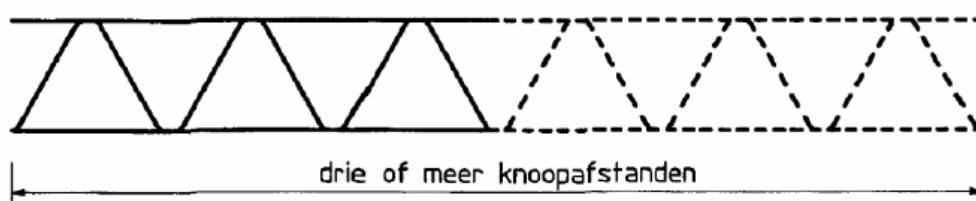
Omdat de koppelwapening aan weerszijde van de voeg tussen twee breedplaten de aanwezige kracht moet overdragen op de wapening in de breedplaat, is de lengte van de koppelwapening op de breedplaten ten minste gelijk aan tweemaal de laslengte.

Opgemerkt wordt dat door toepassing van deze regel enige discrepantie ontstaat met de eisen in NEN 6720 (artikel 9.8.1 – f). Daarin is gesteld dat overlappingslassen moeten verspringen. Dit met uitzondering van situaties waar bij staven met een grote diameter voldoende beugels zijn toegepast en bij het toepassen van wapeningsnetten.

In 6.8.2 van de NVN is gesteld dat de bovenzijde van de breedplaten schoon en ruw moeten zijn. Vanaf 2006 wordt het opruwen van de bovenzijde van de breedplaten minder toegepast. Via de website: <https://betonhuis.nl/constructief-prefab/breedplaat-zelfverdichtend-beton> is voor diverse producenten informatie beschikbaar over de wijze waarop breedplaten zijn vervaardigd.

2.4.4 Voorgespannen breedplaatvloeren op basis van KIWA richtlijnen en NVN 6725

Het ontwerp van voorgespannen breedplaatvloeren zal tot ca. 2012 ook gebaseerd zijn geweest op de genoemde KIWA richtlijnen en NVN 6725. De eisen in de KIWA richtlijnen en NVN 6725 komen met betrekking tot de afmetingen en positie van de tralieliggers en de laslengte voor voorgespannen breedplaten vrijwel overeen met de eisen die aan gewapende breedplaten zijn gesteld. Er is echter wel één groot verschil, namelijk dat de tralieliggers niet over de gehele lengte van de breedplaat hoefden te worden aangebracht. Er kon worden volstaan met het uitsluitend toepassen van tralieliggers aan het eind van de breedplaat. De lengte van deze tralieliggers moest ten minste 600 mm of de lengte van drie knoopafstanden zijn (figuur 10). Dit betekent dat bij gebruik van voorgespannen breedplaten ter plaatse van de langснаad tussen twee breedplaten niet altijd een tralieligger aanwezig hoeft te zijn. In plaats van tralieliggers kon bij de uiteinden ook worden volstaan met dwarskrachtwapening (beugels die in de breedplaat zijn verankerd).



figuur 10 Tralieliggers voor voorgespannen breedplaatvloeren

Het gestelde over de ruwheid in 2.4.3 is ook van toepassing bij voorgespannen breedplaten.

2.4.5 Bollenplaatvloeren op basis van CUR Aanbeveling 86

Het ontwerp van bollenplaatvloeren is ook tot ca. 2012 voornamelijk gebaseerd geweest op NVN 6725. De in de beschikbare informatie van producenten aangetroffen laslengten van koppelstaven komt overeen met hetgeen op basis van NVN 6725 wordt verwacht. Ten aanzien van de tralieliggers zijn er wel belangrijke verschillen.

Uit de KOMO attesten van BubbleDeck wordt geconcludeerd dat vanaf het begin enkelvoudige tralieliggers zijn toegepast als deze als dwarskrachtwapening in rekening werden gebracht. Vanaf 2002 werd in de KOMO attesten van BubbleDeck [14] met betrekking tot tralieliggers verwezen naar CUR Aanbeveling 86. In CUR Aanbeveling 86 worden deze enkelvoudige tralieliggers BV-tralieliggers genoemd. BV-tralieliggers die als dwarskrachtwapening in rekening worden gebracht, moeten volgens art. 9.11.1.7 van CUR Aanbeveling 86 onder andere aan de volgende eisen voldoen:

- De hart-op-hart afstand van de BV-tralieliggers mag ten hoogste gelijk zijn aan twee maal de vloerdikte. Met een maximale vloerdikte van 450 mm is dit gelijk aan 900 mm. Deze eis is minder streng dan de theoretische waarde van 850 mm uit de NVN 6725, maar strenger dan de waarde van 950 mm die in de praktijk mag zijn toegepast;
- De hart-op-hart afstand van twee neergaande of opgaande diagonalen mag ten hoogste gelijk zijn aan $2/3$ maal de plaatdikte. Met een maximale plaatdikte van 450 mm is dit gelijk aan 300 mm. Dit is een minder strenge eis dan in NVN 6725, waarin deze maat begrensd is op 210 mm.

Een eis aan de randafstand van de tralieliggers wordt in CUR Aanbeveling 86 niet gesteld. Hiervoor geldt dan de eis uit NVN 6725. Dit geldt ook voor een eis aan de diameter van de tralieliggers. In KOMO attest K2165/10 [13], dat al was uitgegeven voordat CUR Aanbeveling 86 is verschenen, is een diameter van 8 mm genoemd. In beschikbare berekeningen van BubbleDeck vloeren is ook met een diameter van 8 mm gerekend.

Op basis van KOMO certificaat K22722/01 [14] uit 2002 wordt geconcludeerd, dat tot 2012 de eisen in NVN 6725 van toepassing waren als de tralieliggers niet als dwarskrachtwapening in rekening werden gebracht. In dat geval werden aan de tralieliggers alleen functionele eisen gesteld met betrekking tot productie, transport en storten. Dit betekent dat in dat geval de eisen uit NVN 6725 als minimum golden. Opgemerkt wordt, dat dit ook wel tweebenige tralieliggers werden toegepast, maar dat deze niet als dwarskrachtwapening in rekening werden gebracht.

Bij projecten waar na april 2012 bouwvergunning is verleend, behoort het ontwerp van bollenplaatvloeren te zijn gebaseerd op NEN-EN 13747 en NEN-EN 1992-1-1. Op de eisen van die normen wordt in de volgende paragraaf ingegaan.

Op basis van beschikbare informatie kan worden gesteld dat in de praktische uitvoering de laslengte van de koppelwapening, in 2012 en daarna niet significant is gewijzigd ten opzichte van wat is berekend met NVN 6725. Voor wat betreft tralieliggers wijkt de tekst in het recentere KOMO certificaat K22722/01 [15] niet af van KOMO certificaat K22722/01 [14] uit 2002.

De reductie van het oppervlak van het aansluitvlak tussen de breedplaten en de druklaag door de aanwezigheid van bollen is van meerdere factoren afhankelijk. In het algemeen kan worden gesteld dat een reductie met 20% als maximum kan worden beschouwd.

2.4.6 Breedplaatvloeren op basis van NEN-EN 13747

Op dit moment moeten breedplaten voldoen aan productnorm NEN-EN 13747 [16]. Deze norm moet worden toegepast naast de op dit moment geldende norm voor het ontwerpen van betonconstructies NEN-EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Met betrekking tot tralieliggers en laslengten zijn de eisen als volgt.

Tralieliggers moeten voldoen aan de eisen in NEN-EN 10080 ‘Staal voor het wapenen van beton - Lasbaar betonstaal – Algemeen’.

In artikel 4.2.4.2.2 van de productnorm is gesteld dat de maximale afstand tussen de rand van de breedplaat en de tralieligger gelijk is aan de kleinste waarde van de volgende twee vergelijkingen:

- a) $0,5 \times 835 \text{ mm} = 418 \text{ mm}$
- b) $0,5 \times (15 h_p + 125)$
 - = 438 mm voor $h_p = 50 \text{ mm}$
 - = 588 mm voor $h_p = 70 \text{ mm}$waarbij h_p de hoogte van de breedplaat is

Maatgevend is een maximale afstand van 418 mm. Deze eis is iets ruimer dan de theoretische eis van 400 mm die in NVN 6725 is opgenomen, maar kleiner dan de waarde van 450 mm die volgens de NVN in de praktijk mocht zijn toegepast.

In artikel 4.2.4.2.1 van de productnorm is gesteld dat de maximale hart-op-hart afstand van de tralieliggers gelijk is aan de kleinste waarde van de volgende twee vergelijkingen:

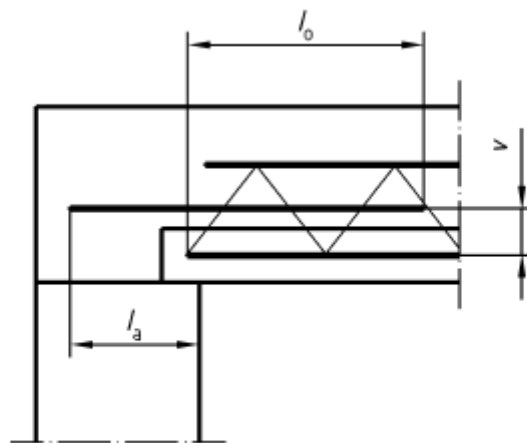
- a) 835 mm
- b) $15 h_p + 125$
 - = 875 mm voor $h_p = 50$ mm
 - = 1175 mm voor $h_p = 70$ mm

Maatgevend is een maximale hart-op-hart afstand van 835 mm. Deze eis is strenger dan de theoretische eis van 850 mm die in NVN 6725 is opgenomen.

Overige eisen aan de tralieliggers in de productnorm zijn:

- De afstand van de tralieliggers tot het einde van de breedplaat mag maximaal 250 mm bedragen. Dit betekent dat de tralieliggers niet tot het einde van de breedplaat hoeven door te lopen. Vanaf 250 mm van het einde moeten de tralieliggers over de gehele verdere lengte van de breedplaat aanwezig zijn;
- De onderstaven van de tralieliggers moeten aan de bovenzijde ten minste 10 mm betondekking hebben in de breedplaat.

Voor de in de praktijk toegepaste afmetingen voor tralieliggers wordt verwezen naar paragraaf 2.4.3.



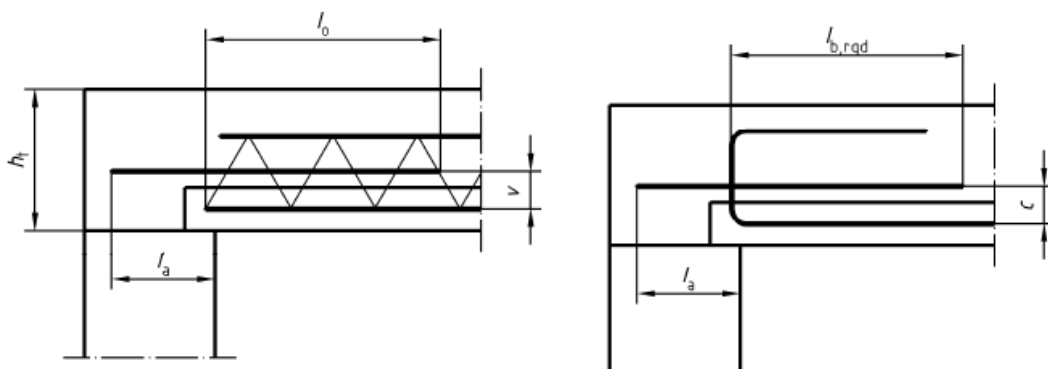
l_0 : design lap length according to 8.7.3 of EN 1992-1-1

figuur 11 Verlengen van onderwapening bij een steunpunt volgens NEN-EN 13747

In NEN-EN 13747 is weinig gesteld over de laslengte van wapening. In E.2.2 c) van die norm is aangegeven dat de hoofdwapening in de breedplaat bij een oplegging middels een overlappingslas gelast kan worden aan wapening die op de breedplaat wordt geplaatst, zie figuur 11. De laslengte moet dan voldoen aan 8.7.3 in NEN-EN 1992-1-1. Dit is in tegenspraak met 8.7.2 (4) van NEN-EN 1992-1-1 waarin gesteld wordt dat bij overlappingslassen waarbij de staven zich niet in dezelfde laag bevinden – dit is het geval bij wapening die op de breedplaat wordt gelegd – slechts 50% van de wapening op dezelfde plaats gelast mag worden. Daarnaast geldt volgens 8.7.3 van NEN-EN 1992-1-1 dat in het geval dat meer dan 55% van de staven gelast worden, de laslengte met een factor α_6 gelijk aan 1,5 vergroot moet worden. Opgemerkt wordt dat de vergroting middels de factor α_6 vooral ingegeven is om de scheurvorming in een gebied met overlappingslassen te beperken en

niet zo zeer betrekking heeft op de capaciteit van de overlappingslas. Het principe waarbij alle buigtrekwapening in een breedplaat, gelast wordt middels een overlappingslas met koppelwapening die in de druklaag boven de breedplaat is aangebracht en zich dus in een andere wapeningslaag bevindt, voldoet niet aan de eisen in NEN-EN 1992-1-1.

Het onderscheid tussen het toepassen van een laslengte l_0 of een verankeringslengte l_b , blijkt uit figuur E.6 van NEN-EN 13747, waar bij toepassing van tralieliggers een laslengte voor de koppelwapening wordt voorgeschreven terwijl als er opgebogen staven uit de breedplaat worden opgenomen, het toepassen een verankeringslengte wordt voorgeschreven, zie figuur 12.



figuur 12 Fragmenten van figuur E.6 van NEN-EN 13747 met de toepassing van tralieliggers links en opgebogen wapening rechts

Op basis van beschikbare informatie wordt geconcludeerd dat in de praktijk de lengte van de koppelwapening na 2012 niet significant afwijkt van de laslengten die eerder op basis van de NVN 6725 zijn bepaald en toegepast.

In NEN-EN 13747 zijn geen eisen gesteld aan de ruwheid van de bovenzijde van de breedplaten. Wel zal het ontbreken van ruwheid, zijn effect hebben op de rekenkundig te bepalen schuifsterkte van het aansluitvlak.

2.4.7 Conclusie

Uit het voorgaande en een verkenning van praktijkvoorbeelden wordt bevestigd dat het kritische vloerdetail, geschetst in figuur 1, ook veelvuldig in andere breedplaatvloerconstructies met een primaire krachtafdracht ter plaatse van langsnaden is toegepast.

3 Verkenning van beschikbare literatuur

3.1 Inleiding

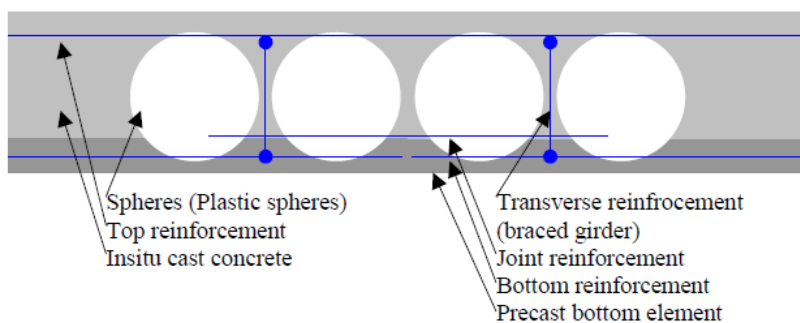
Hierna is een samenvatting opgenomen van literatuur gerelateerd aan de problematiek rondom het aansluitdetail bij breedplaatvloeren. In deze samenvatting is ingegaan op literatuur waarin de momentcapaciteit van het aansluitdetail is beschouwd. Daarnaast is er beknopt ingegaan op literatuur over de afschuifcapaciteit van aansluitvlakken.

Een overzicht van experimenten op proefstukken met koppelwapening met een relatief kleine diameters, die in dit hoofdstuk zijn beschreven, is gegeven in bijlage F.

3.2 Onderzoek van Gudmand-Høyer

3.2.1 Analytisch onderzoek naar de momentcapaciteit

In [18] is een analytisch model beschreven dat de capaciteit van het aansluitdetail tussen twee breedplaatvloeren beschrijft. Het rapport is onderdeel van een studie die in 2003 is uitgevoerd aan Technische Universiteit van Denemarken (DTU). Het onderzoek richt zich specifiek op breedplaatvloeren met gewichtbesparende elementen van het type BubbleDeck, zie figuur 13. De beschreven analytische methode beschrijft het gedrag van het aansluitdetail op basis van de plasticiteitstheorie.

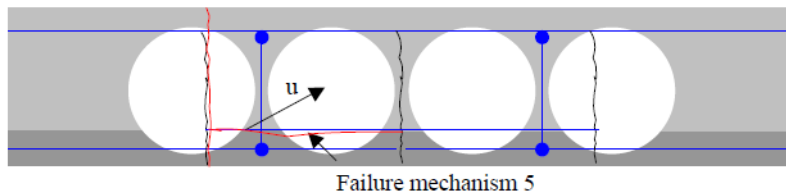


figuur 13 Schematische weergave van het beschouwde model [18]

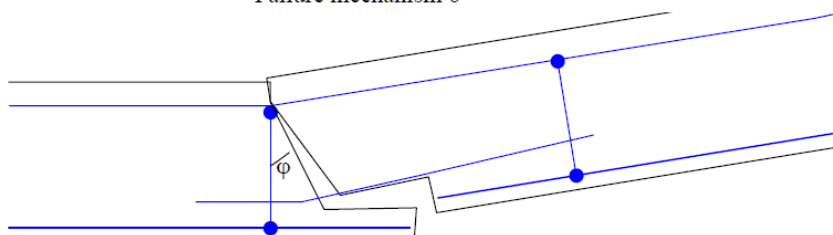
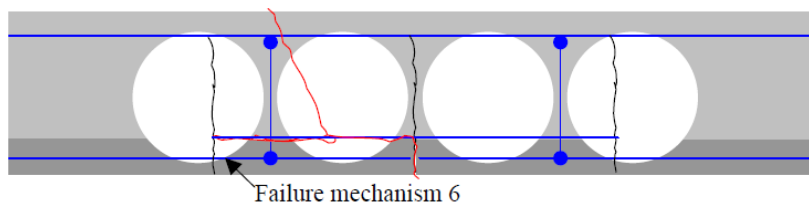
In de analytische beschouwing worden zes bezwijkmechanismen behandeld, waaronder combinaties van buiging en onthechting. De volgende bezwijkmechanismen worden beschreven:

- 1) Het vloeien van de koppelwapening;
- 2) Het vloeien van de onderwapening in de breedplaat;
- 3) Bezwijken van de verankering van de koppelwapening, hierin wordt onderscheid gemaakt in drie mogelijke bezwijkmechanismen:
 - a. Bezwijken door slijten;
 - b. Bezwijken door slijten in combinatie met randbreuk;
 - c. Bezwijken door slijten in combinatie met achteruitbreken;
- 4) Bezwijken van de verankering van de onderwapening;
- 5) Bezwijken op onthechting in het aansluitvlak tussen de breedplaat en druklaag, zie figuur 14;
- 6) Uittrekken van de koppelwapening, vergelijkbaar met mechanisme 3, in combinatie met een gedeeltelijke onthechting tussen de breedplaat en druklaag, zie figuur 15.

Bij het beschrijven van het bezwijkmechanisme op basis van onthechting wordt gemeld dat dit geen plastisch mechanisme betreft. Bezwijkmechanisme 5 is vergelijkbaar met het bezwijkmechanisme dat is opgetreden bij de naar aanleiding van de gedeeltelijke instorting in Eindhoven uitgevoerde de proeven, welke zijn beschreven in [2].



figuur 14 Bezwijkmechanisme 5 [18]



figuur 15 Bezwijkmechanisme 6 [18]

Het analytische model is vervolgens uitgewerkt voor één situatie met een vloer met een totale dikte van 280 mm en een breedplaatdikte van 60 mm. De langswapening in de breedplaat en de koppelswapening bestaat uit Ø8-125 mm. Uit het model volgt dat bezwijkmechanisme 6 maatgevend is ten opzichte van de overige beschreven bezwijkmechanismen.

3.2.2 Experimenteel onderzoek naar de momentcapaciteit van BubbleDeck platen

In [19] en [20] zijn experimentele onderzoeken beschreven, die zijn uitgevoerd aan de DTU. Het doel van de experimentele onderzoek is het bepalen van de momentcapaciteit van het aansluitdetail ter plaatse van de langsvog tussen twee breedplaatvloeren van het type BubbleDeck.

tabel 2 Gegevens proefstukken en proefopstelling Gudmand-Høyer

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	280 mm
	dikte breedplaat	*
	breedte proefstuk	1000 mm
	lengte proefstuk	3200 mm
	gewichtsbesparende elementen	bollen
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	3000 mm
	afstand tussen puntlasten	1000 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	*
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	33,6 MPa
	kwaliteit toegepast betonstaal	B500*
	kwaliteit staal tralieligger	B500*
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	Ø8-125
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	*
	koppelwapening	8Ø8-125
	lengte koppelwapening	700 mm
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	*
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	**
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	*
	diameter tralieligger b/d/o	*
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	*
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	*
Uitvoering breedplaten		
	type beton	zelfverdichtend
	afwerking bovenzijde	ruwheid ≥ 3 mm
* gegevens niet of niet duidelijk uit het rapport af te leiden		
** In de proefserie beschreven in [19] is op 250 mm vanaf de voeg een ladderligger opgenomen die de breedplaat met de druklaag verbindt. In de proefserie die in [20] is beschreven ontbreekt deze ladderligger.		

Het beschreven experimentele onderzoek omvat twee series van vijf proefstukken die zijn beproefd in een 4-puntsbuigproefopstelling. Iedere bron beschrijft één serie. In tabel 2 zijn de gegevens van de proefstukken en proefopstelling opgenomen. Opgemerkt dient te worden dat niet alle gegevens duidelijk in het rapport zijn weergegeven.

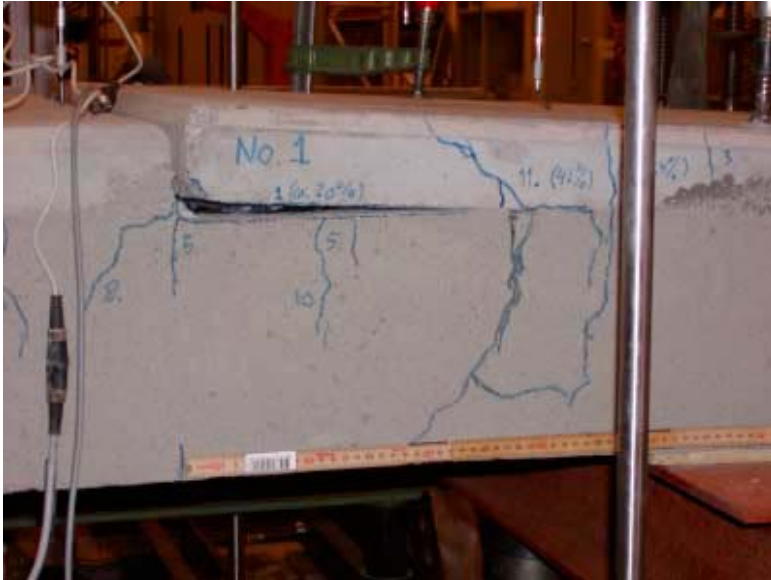
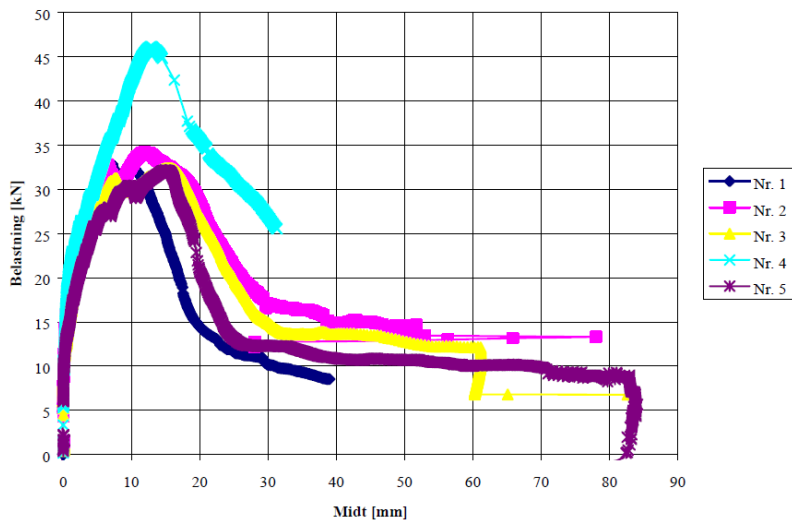


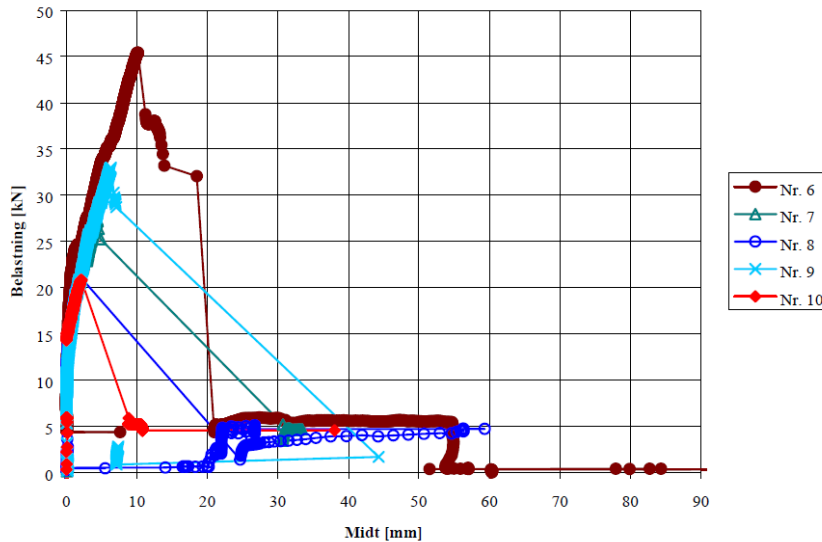
foto 6 Typisch bezwijkmechanisme (proefstuk 1, ondersteboven beproefd) [19]

De resultaten van de experimenten zijn in de rapporten slechts beknopt beschreven. In figuur 16 is het last-ervormingsgedrag opgenomen van de vijf proeven met ladderligger. De resultaten laten een vergelijkbaar gedrag zien voor alle vijf de proeven. Na het bereiken van de bezwijklast neemt de weerstand van de proefstukken af bij een toename van de doorbuiging. Proefstuk 4 wijkt enigszins af met een hogere bezwijklast. Op basis van de foto's in het rapport is te zien dat er buigtrek-scheuren zijn ontstaan in zowel de breedplaat als de druklaag en dat er onthechting van de breedplaat heeft plaatsgevonden, zie foto 6.



figuur 16 Last-ervormingsdiagram van de vijf proeven met ladderligger [19]

In figuur 17 het last-ervormingsgedrag opgenomen van de vijf proeven zonder ladderligger. De spreiding in de bereikte bezwijklast is hier groter. Ook hier is er één proefstuk dat een weerstand van circa 45 kN bereikt. Het gedrag van de proefstukken na het bereiken van de bezwijklast is afwijkend van dat van de serie met ladderliggers als verbindingswapening tussen de breedplaat en de druklaag. Na het bezwijken van de bezwijklast valt de weerstand van het proefstuk zeer snel terug tot een lage waarde van circa 5 kN. Er is hier sprake van een bros bezwijkgedrag.



figuur 17 Last-ervormingsdiagram van de vijf proeven zonder ladderligger [20]

Op basis van de koppelwapening $\text{Ø}8\text{-}125$ en een breedplaatdikte van 60 mm (aanname) is voor de beschouwde proefstukken de momentcapaciteit en maximale kracht per vijzel bepaald, waarbij de koppelwapening gaat vloeien. De berekende bezwijkkracht komt redelijk overeen met het resultaat van proefstuk 4.

3.3 Onderzoek van Lundgren

3.3.1 Numeriek onderzoek naar de momentcapaciteit

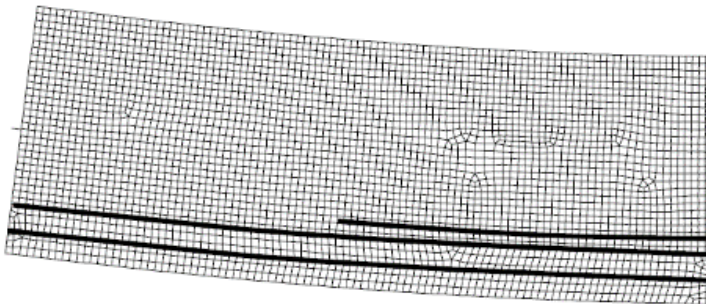
In [21] is een numeriek onderzoek beschreven naar de momentcapaciteit ter plaatse van het aansluitdetail tussen twee breedplaten. Het onderzoek is in 2003 verricht aan de Chalmers Technische Universiteit te Zweden.

Voor het onderzoek is een 2D rekenmodel ontwikkeld, waarbij gebruik is gemaakt van het eindige elementprogramma DIANA. Een vloerdeel is gemodelleerd met een totale hoogte van 250 mm en met een breedplaatdikte van 50 mm, zie figuur 18. De langswapening in de breedplaat is gelijk aan $\text{Ø}8\text{-}150$ mm. Deze wapening is ook aangebracht als koppelwapening. De verankeringslengte van de koppelwapening bedraagt 0,35 m. In het model is een relatief hoge treksterkte van de wapening van 700 MPa aangehouden. In het rekenmodel zijn geen gewichtsbesparende elementen opgenomen.

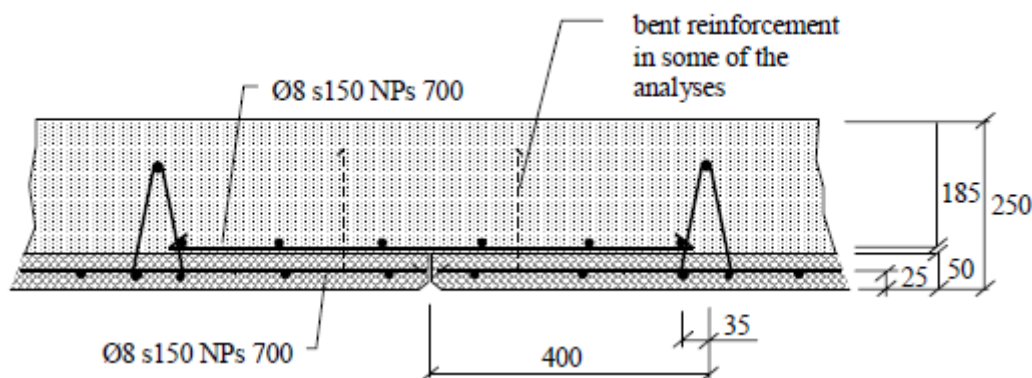
Als eerste is het model gebruikt om te onderzoeken wat de invloed is van de eigenschappen van het aansluitvlak (cohesie, wrijving). Dit is gedaan door in het model, bij het aansluitvlak, een interface te modelleren met een Mohr-Coulomb materiaalmodel (frictiemodel). Vervolgens is ook gekeken wat de invloed is van de wapening, waarbij verschillende aspecten in beschouwing zijn genomen, zoals de invloed van een lagere vloeispanning (500 MPa in plaats van 700MPa) en de invloed van het toepassen van opgebogen wapening, zie figuur 19.

Op basis van het numerieke onderzoek is door de onderzoeker geconcludeerd dat een model zonder opgebogen wapening bros bezwijkt en niet beschikt over rotatiecapaciteit. De bezwijksterkte hangt hierbij sterk af van de ruwheid van het aansluitvlak. Ondanks het feit dat zonder het toepassen van opgebogen wapening wel de gewenste bezwijkkracht wordt bereikt, waarbij de koppelwapening

vloeit, is geconcludeerd dat het de voorkeur verdient om altijd opgebogen wapening toe te passen. Dit omdat hiermee de rotatiecapaciteit sterk wordt vergroot. Uit het onderzoek blijkt dat opgebogen wapening verder van de naad zorgt voor een hogere momentcapaciteit van het aansluitdetail in vergelijking met wapening dicht bij de naad. In het geval de opgebogen wapening dicht bij de naad wordt toegepast, treden hogere spanningen op in deze wapening ter plaatse van het aansluitvlak tussen breedplaat en druklaag en is het numerieke model instabieler.



figuur 18 Vervormd model, de dikke lijnen tonen de wapening en de interface [18]



figuur 19 Geometrie en wapening proefstuk [21]

3.3.2 Combinatie van experimenteel en numeriek onderzoek

Navolgend op het onderzoek uit 2003, beschreven in [21] is in [22] een vervolgonderzoek beschreven. Het onderzoek betreft een combinatie van experimenteel en numeriek onderzoek en is ook uitgevoerd aan de Chalmers Technische Universiteit.

Een aantal afschuifproeven en slijtproeven, zie respectievelijk foto 7a en b, zijn uitgevoerd, waarbij verschillende methodes voor het opruwen van het betonoppervlak zijn toegepast. De oppervlakken van de breedplaten zijn hierbij opgeruwd middels het aanbrengen van groeven met een diepte van circa 10 mm en een hart-op-hartafstand van 100 mm of door het borstelen van het oppervlak met een stalen borstel. Door het borstelen is een ruwheid van circa 7,0 mm verkregen.

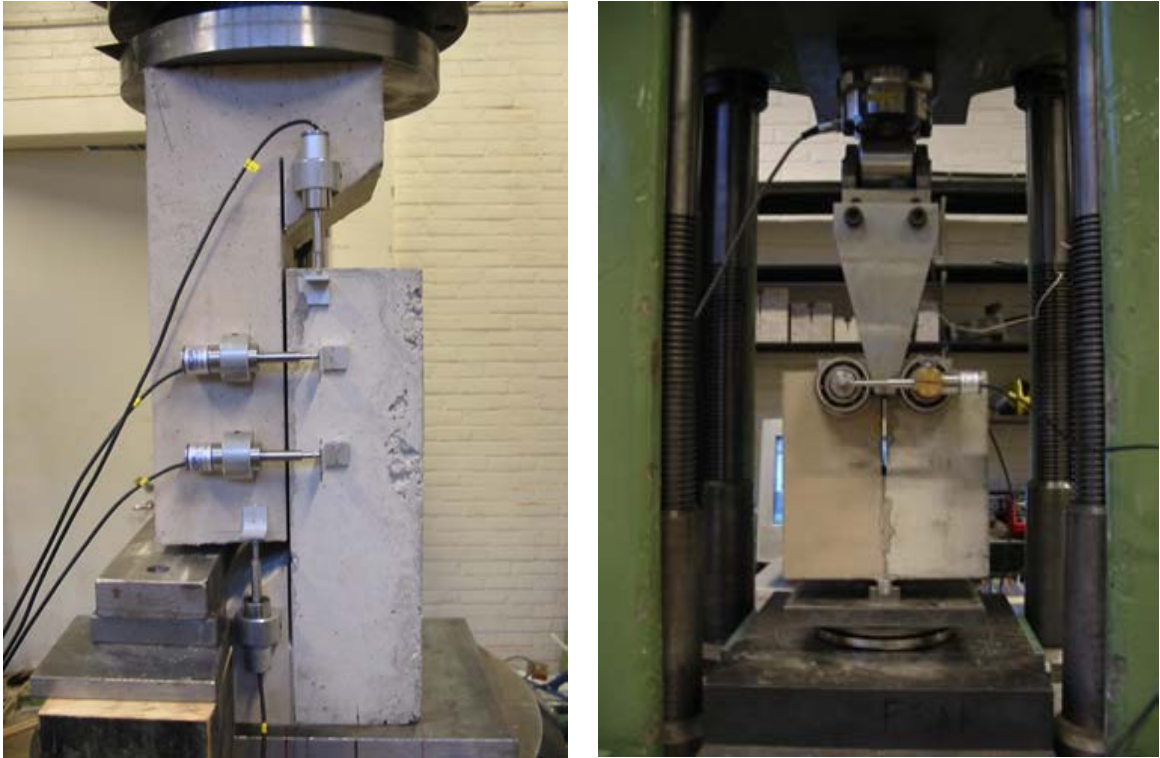
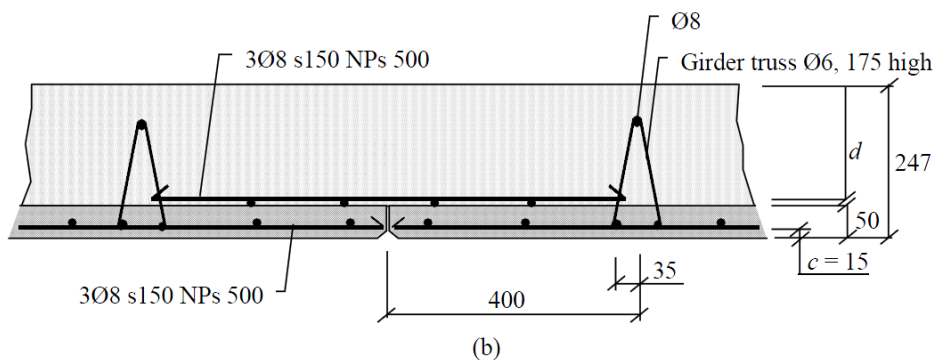


foto 7a en b Setup van respectievelijk de afschuifproeven en slijtproeven [22]

Ook zijn een aantal 4-puntsbuigproeven uitgevoerd. In tabel 3 zijn de gegevens van de proefstukken en de proefopstelling opgenomen, zie ook figuur 20. Bij deze proefstukken zijn de breedplaten ook opgeruwd middels het aanbrengen van groeven of door het oppervlak te borstelen. In de proefstukken zijn geen gewichtsbesparende elementen, opgenomen. In figuur 21 is een typisch last-doorbuigingsdiagram opgenomen. Bij alle proeven treedt ductiel gedrag op, waarbij de koppelwapening vloeit en bezwijken optreedt door het bereiken van de momentcapaciteit, zie foto 8.

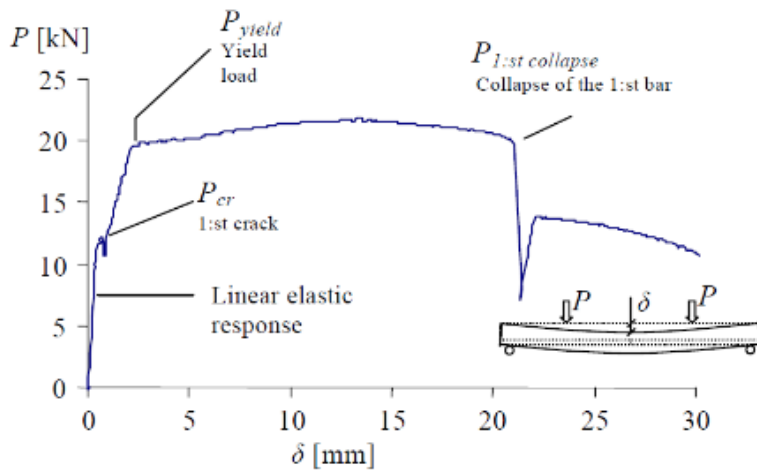


figuur 20 Schematische weergave proefstukken [22]

Er is een EEM model van de ‘full-scale’ experimenten beschreven waarin de eerder, middels experimenteel onderzoek bepaalde materiaaleigenschappen van het aansluitvlak zijn verwerkt in een Mohr-Coulomb materiaalmodel. De resultaten van de afschuifproeven en slijtproeven zijn vervolgens gebruikt om de materiaaleigenschappen van het Mohr-Coulomb materiaalmodel te kalibreren. Opvallend is dat hierbij relatief hoge waarden worden gevonden voor de wrijvingscoëfficiënt ($1,3 \leq \mu \leq 3,7$) en cohesie ($0,7 \text{ MPa} \leq c \leq 1,58 \text{ MPa}$).

tabel 3 Gegevens proefstukken en proefopstelling Lundgren

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	247 mm
	dikte breedplaat	50 mm
	breedte proefstuk	500 mm
	lengte proefstuk	2700 mm
	gewichtsbesparende elementen	nee
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	2500 mm
	afstand tussen puntlasten	1300 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	48,7 / 56,7 MPa
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	36 MPa
	kwaliteit toegepast betonstaal	B500*
	kwaliteit staal tralieligger	B500*
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	3Ø8-150
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	15 mm
	koppelwapening	3Ø8-150
	lengte koppelwapening	730 mm
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	8 mm
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	400 mm
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	175 mm
	diameter tralieligger b/d/o	8/6/*
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	50-15-8 = 27 mm
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	*
Uitvoering breedplaten		
	type beton	normaal
	afwerking bovenzijde	Groeven aangebracht en geborsteld
*gegevens niet of niet duidelijk uit het rapport af te leiden		



figuur 21 Typisch last-doorbuigingsdiagram full-scale experimenten [22]

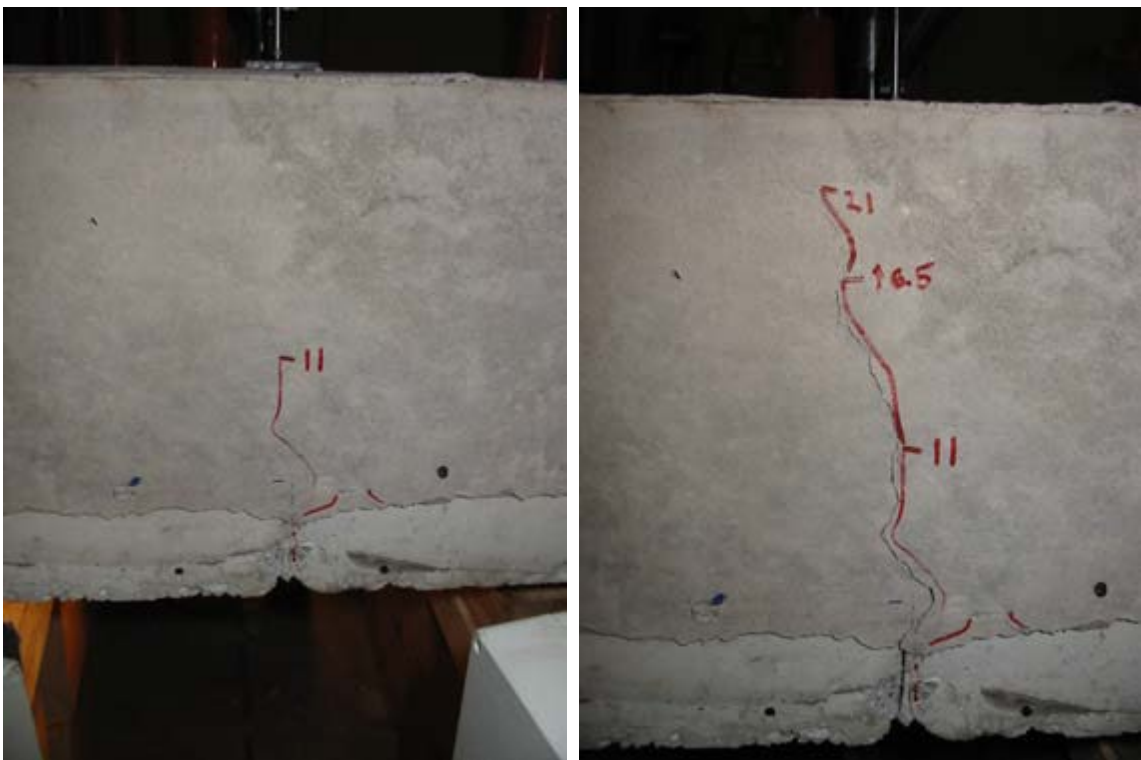
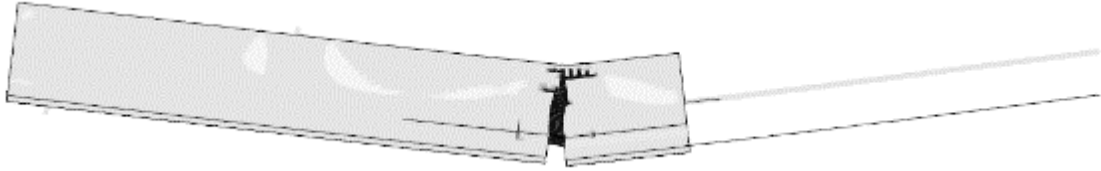
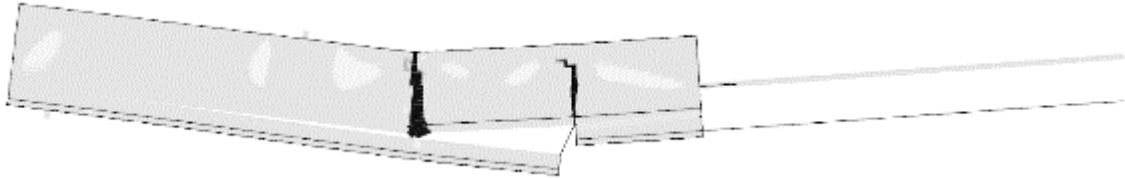


foto 8 Ontwikkeling scheurvorming in het midden van de plaat ter plaatse van de naad tussen de breedplaten [22]

Indien de eigenschappen van het aansluitvlak worden bepaald op basis van de uitgevoerde afschuifproeven treedt geen onthechting op tussen de schil en de druklaag, zie figuur 22. Ook is een model beschouwd waarbij geen sprake is van aanhechting tussen breedplaat en druklaag, in dit geval treedt wel onthechting op, zie figuur 23.



figuur 22 Scheurenpatroon en vervormde constructie vlak voor bezwijken [22]



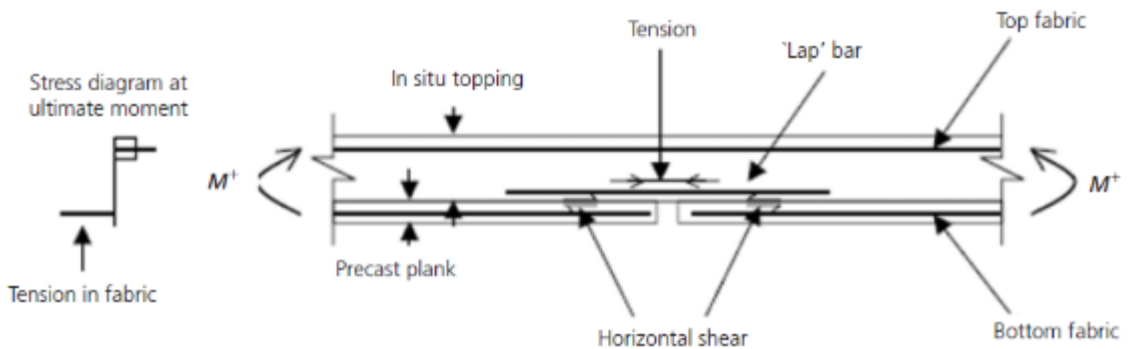
figuur 23 Scheurenpatroon en vervormde constructie vlak voor bezwijken bij een constructie met een zwakke interface [22]

Op basis van het onderzoek wordt geconcludeerd dat het opruwen van de breedplaten, middels het borstelen met een stalen borstel een betere aanhechting geeft ten opzichte van het aanbrengen van groeven. Daarnaast is bezwijken door het bereiken van de momentcapaciteit maatgevend bij de uitgevoerde experimenten. In de EEM berekeningen wordt dit ook gevonden. Echter, er is ook gekeken wat er gebeurt bij het wijzigen van de eigenschappen van het frictie model, bij slechtere aanhechteigenschappen treedt wel onthechting op. Tot slot wordt geconcludeerd dat de constructieve capaciteit van een geheel vloerveld mede bepaald wordt door de rotatiecapaciteit van het aansluitdetail.

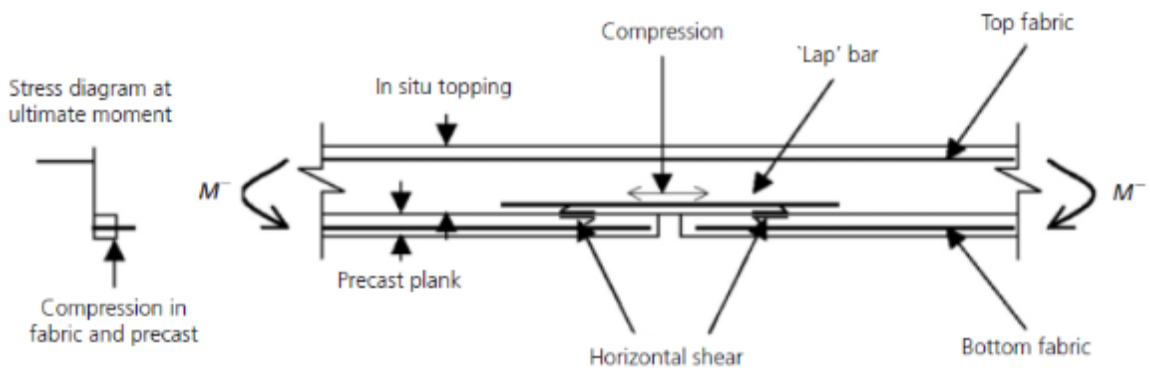
In [23] wordt het onderzoek dat is beschreven in rapporten [21] en [22], nogmaals beschreven.

3.4 Onderzoek van Stehle e.a.

In [24] is een onderzoek naar de capaciteit van de aansluiting tussen twee breedplaatvloeren beschreven. Het onderzoek is in 2011 uitgevoerd aan de universiteit van Cardiff in het Verenigd Koninkrijk. Het onderzoek heeft als doel meer inzicht te verkrijgen in het constructief gedrag van dergelijke verbindingen. In tegenstelling tot de eerder beschreven onderzoeken richt het onderzoek van [24] zich zowel op de capaciteit bij een positief buigend moment, waarbij een trekkracht optreedt in de koppelwapening, geschetst in figuur 24, als ook een negatief buigend moment, waarbij juist een drukkracht optreedt ter plaatse van de koppelwapening, zoals geschetst in figuur 25. Ten behoeve daarvan is bij de naad ruimte tussen de twee breedplaten vrijgehouden.

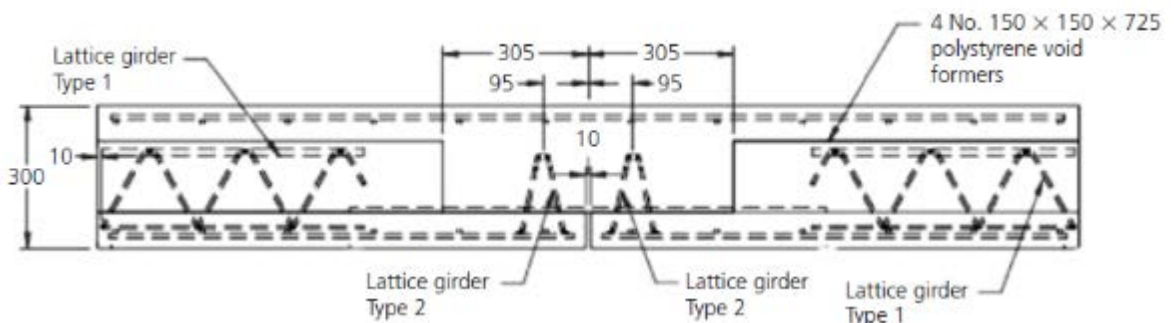


figuur 24 Krachtenverloop bij een positief buigend moment [24]



figuur 25 Krachtenverloop bij een negatief buigend moment [24]

In tabel 4 zijn de gegevens van de proefstukken opgenomen. De beproefde elementen hebben een lengte van 2,06 m, een breedte van 0,50 m en een hoogte van 300 mm en zijn voorzien van gewichtbesparende polystyreenblokken. De elementen zijn beproefd in een 4-puntsbuigproef met een overspanning van 1,9 m. In totaal zijn 7 elementen beproefd. Met uitzondering van proefstuk 5, waren de proefstukken voorzien van tralieliggers, parallel aan en dichtbij de naad, zie figuur 26. De koppelwapening bestaat uit 3 wapeningstaven $\text{Ø}10-75$ die geconcentreerd aanwezig is tussen de polystyreenblokken.

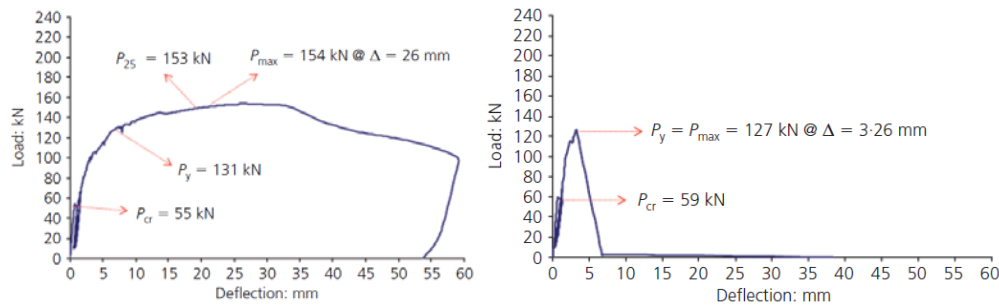


figuur 26 Overzicht proefstukken [24]

tabel 4 Gegevens proefstukken en proefopstelling Stehle

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	300 mm
	dikte breedplaat	75 mm
	breedte proefstuk	500 mm
	lengte proefstuk	2060 mm
	gewichtsbesparende elementen	Polystyreen blokken
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	1900 mm
	afstand tussen puntlasten	1000 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	35 MPa
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	35 MPa
	kwaliteit toegepast betonstaal	B500*
	kwaliteit staal tralieligger	B500*
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	3Ø10-200 mm
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	20 mm
	koppelwapening	3Ø10-75 mm
	lengte koppelwapening	1000 mm
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	0 mm
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	95 mm
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	160 mm
	diameter tralieligger b/d/o	14/7/6
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	75-20-10 = 45 mm
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	*
Uitvoering breedplaten		
	type beton	normaal
	afwerking bovenzijde	*
*gegevens niet of niet duidelijk uit het rapport af te leiden		

Uit de resultaten volgt dat de proefstukken met tralieliggers naast de naad en belast door een positief buigend moment bezwijken door het bereiken van de momentcapaciteit, waarbij de koppelwapening vloeit en de theoretische momentcapaciteit wordt bereikt, zie figuur 27a en foto 9. Een uitzondering is proefstuk 5 zonder tralieliggers naast de naad. De maximale belasting bij die proef is iets lager en rotatiecapaciteit ontbreekt. Bij dit proefstuk treedt onthechting op tussen de breedplaat en de druklaag, zie figuur 27b en foto 10.



figuur 27a en b respectievelijk het resultaat van proefstuk 6 (met tralieliggers naast de naad) en proefstuk 5 (zonder tralieliggers naast de naad) [24]



foto 9 Bezwijkbeeld proefstuk 6 (met tralieligger naast de naad) [24]



foto 10 Bezwijkbeeld proefstuk 5 (zonder tralieligger naast de naad) [24]

De proefstukken belast door een negatief buigend moment, allen met tralieliggers naast de naad, bereiken allemaal de theoretisch bepaalde bezwijklast. Bezwijken vindt plaats door het bereiken van de momentcapaciteit of een combinatie van buigend moment en dwarskracht ter plaatse van het steunpunt.

Uit het experimentele onderzoek wordt geconcludeerd dat het aansluitdetail, zoals toegepast in de experimenten met tralieliggers naast de naad en goede aanhechteigenschappen, goed in staat is om buigende momenten af te dragen en daardoor geschikt is voor een toepassing bij breedplaatvloeren die in meerdere richtingen overspannen.

3.5 Onderzoek van Weglarzy

In [25] is een PhD-onderzoek beschreven naar de momentcapaciteit van het aansluitdetail tussen twee breedplaten in een breedplaatvloer. Het is uitgevoerd aan de universiteit van Siegen in Duitsland en in 2014 gerapporteerd. Het omvat een experimenteel en numeriek deel. Het doel van het

onderzoek is om te kijken of de huidige regels in Eurocode 2 (EN 1992-1-1:2005) voldoende zijn voor het ontwerpen van een dergelijk aansluitdetail.

tabel 5 Gegevens proefstukken en proefopstelling Weglarzy

Geometrie proefstuk		
hoogte proefstuk		200 mm
dikte breedplaat		50 mm
breedte proefstuk		500 mm
Lengte proefstuk		3440 / 4200 mm
gewichtsbesparende elementen		geen
Geometrie proefopstelling		
overspanning		3240 tot 4000 mm
afstand tussen puntlasten		2240 tot 2600 mm
Materiaaleigenschappen		
beoogde betonsterkteklasse breedplaat		C20/25
beoogde betonsterkteklasse druklaag		C40/50
kwaliteit toegepast betonstaal		B500*
kwaliteit staal tralieligger		B500*
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
langswapening in de breedplaat		variërend van 6 ϕ 6, 4 ϕ 12, 4 ϕ 16
dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde		*
koppelwapening		variërend van 7 ϕ 6 tot 5 ϕ 16
lengte koppelwapening		variërend van 430 mm tot over de volledige lengte
ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening		0 mm
afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg		variërend van 200 mm tot 600 mm
hoogte tralieligger / systeemplaat tralieligger [mm]		*
diameter tralieligger b/d/o		*/6/*
diepte onderzijde tralieligger in breedplaat		**
verbinding tussen tralieligger en langswapening		*
Uitvoering breedplaten		
type beton		normaal
afwerking bovenzijde		opgeruwd
*gegevens niet of niet duidelijk uit het rapport af te leiden		
** de wapening in de breedplaat is in twee lagen aangebracht waarbij de bovenste laag door de tralieliggers is gevlochten		

Het experimentele onderzoek omvat een serie van zes 4-puntsbuigproeven, zie figuur 28. De gegevens van de proefstukken en proefopstelling zijn samengevat in tabel 5. De proeven zijn uitgevoerd op massieve breedplaatvloeren. Met uitzondering van één proefstuk zijn bij alle proefstukken tralieliggers toegepast ter plaatse van de koppelwapening, weliswaar op verschillende afstanden van de naad, variërend van 0,2 tot 0,6 m. De toegepaste hoeveelheid koppelwapening is gevarieerd van

7Ø6 tot 5Ø16. Bij het proefstuk zonder tralieliggers heeft de koppelwapening ook een korte verankerslengte van 215 mm (minimale verankerslengte). De bovenzijde van de breedplaten is bij alle proefstukken opgeruwd, zie foto 11a en b.

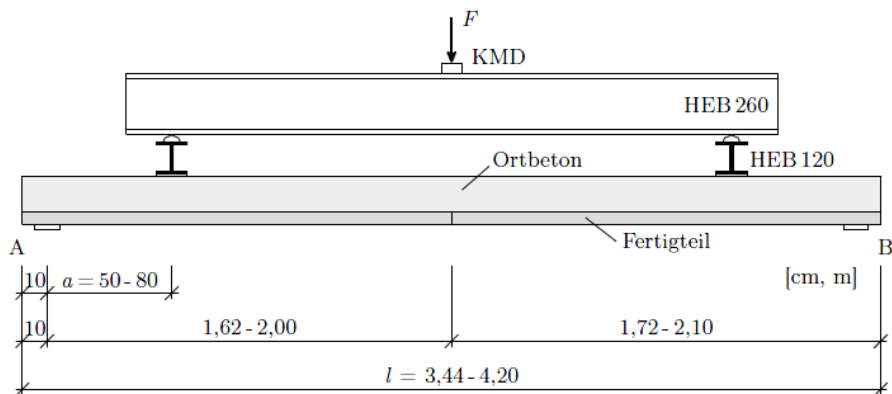


Abbildung 4.3: Übersicht des Versuchsaufbaus

figuur 28 Overzicht proefopstelling Weglarzy

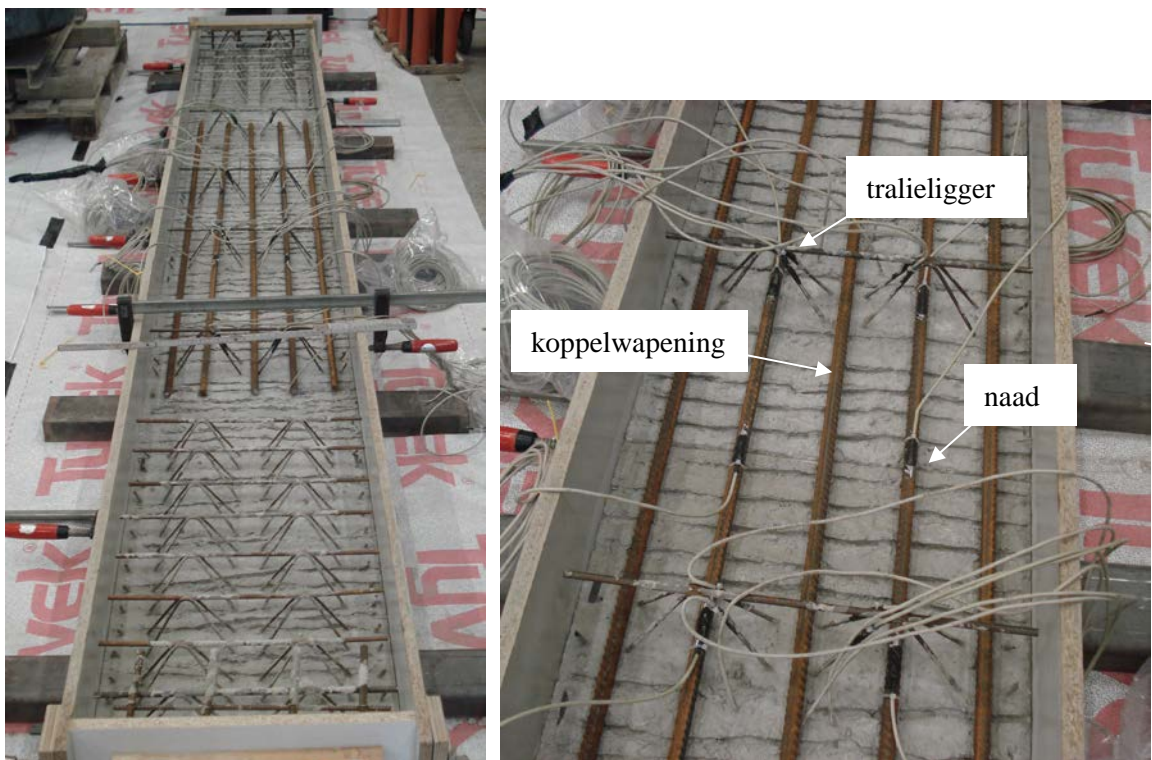


foto 11a en b Overzicht proefstukken en respectievelijk een detail van het aansluitvlak [25]

Uit de resultaten volgt dat de proefstukken met koppelwapening Ø6 en tralieliggers bezwijken door het bereiken van de momentcapaciteit, waarbij de koppelwapening vloeit en een ductiel gedrag optreedt. Een uitzondering hierop is het proefstuk met Ø6 koppelwapening zonder tralieliggers en met een korte verankerslengte van de koppelwapening. Dit proefstuk bezwijkt, vroegtijdig door ont hechting van de breedplaat en de druklaag, zie foto 12.

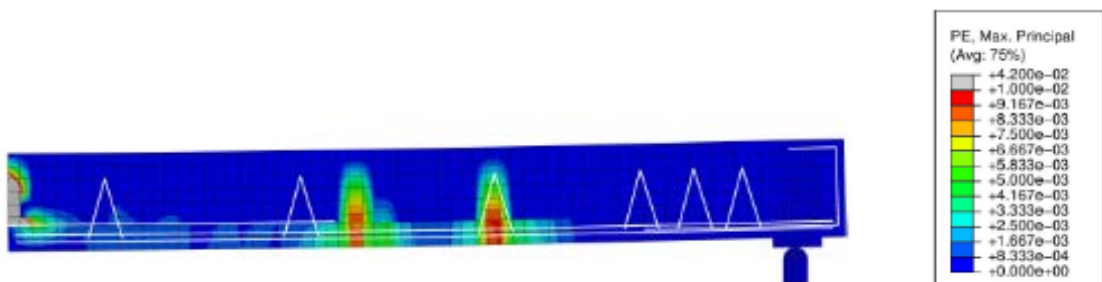


foto 12a en b Bezwijkbeeld proefstuk B3, zonder tralieliggers ter plaatse van de koppelwapening [25]

Bij de proefstukken met $\varnothing 14$ en $\varnothing 16$ koppelwapening (B5 en B6), waarbij de tralieligger respectievelijk op 425 mm en 250 mm vanaf de naad is aangebracht, wordt ook de vloeigrens van de koppelwapening niet geheel bereikt en ontstaat een scheur in het aansluitvlak of een horizontale scheur in de druklaag ter plaatse van de koppelwapening.

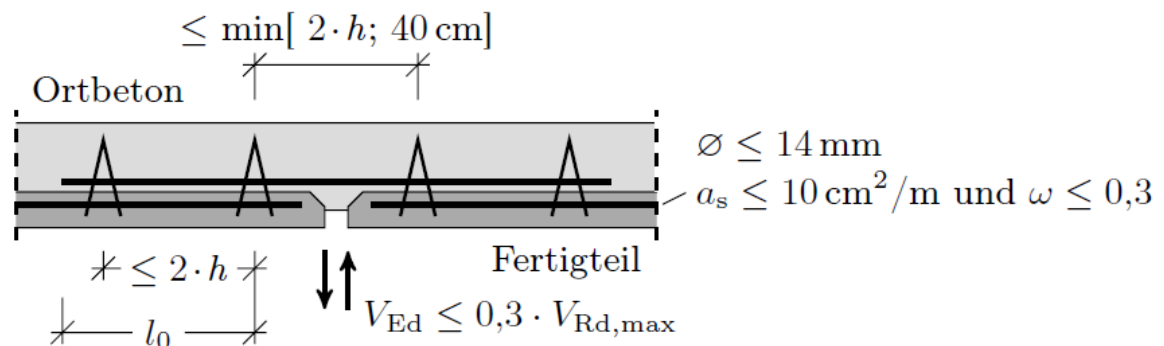
Door Weglarzy is middels rekstrookjes de spanning in een aantal diagonalen gemeten. Bij de proefstukken met $\varnothing 6$ koppelwapening, die bezwijken na het bereiken van de vloeigrens blijft de spanning in de diagonalen beperkt tot enkele tientallen MPa's. Bij de proefstukken met $\varnothing 14$ en $\varnothing 16$ koppelwapening treden hogere spanningen op. Bij het proefstuk met de $\varnothing 14$ koppelwapening gebeurt dit na het bereiken van de maximale weerstand. Bij het proefstuk met $\varnothing 16$ koppelwapening gebeurt dit al ruimschoots voordat de maximale weerstand is bereikt.

De studie omvat naast het experimentele onderzoek ook een numeriek onderzoek op basis van een niet-lineair EEM model, zie figuur 29. Hiervoor is gebruik gemaakt van het programma Abaqus. In het model is de wapening discreet gemodelleerd. In tegenstelling tot bijvoorbeeld het onderzoek van Lundgren [22] zijn de breedplaat en druklaag vast, zonder toepassing van een interface (frictie-model), aan elkaar verbonden. Om toch enige vorm van schade te simuleren, zijn elementen in de eerste rij naast de naad ($b = 25$ mm), niet aan elkaar verbonden. Het model is gevalideerd op basis van de uitgevoerde experimenten en vervolgens toegepast in een parameterstudie. De parameterstudie richt zich met name op de geometrische eigenschappen van het aansluitdetail zoals: vloerhoogte, diameter van de wapening (en tralieliggers) en de aantallen en locaties van de tralieliggers. Op basis van het onderzoek is onder andere aanbevolen om altijd tralieliggers toe te passen op een afstand van 0,20 m vanaf de naad.



figuur 29 voorbeeld EEM model [25]

Aan het einde van zijn onderzoek concludeert Weglarzy dat de aanbevelingen die in Duitsland worden gehanteerd, gebaseerd op EN 1992-1-1 en [26], voldoende zijn om een goed constructief gedrag te krijgen bij de naad tussen twee breedplaten. De aanbevelingen die in [26] zijn opgenomen zijn in figuur 30 getoond. In zijn onderzoek heeft hij tevens onderzocht wat de consequentie is van het direct op de breedplaat plaatsen van de koppelwapening, dat is naar zijn mening mogelijk als de lengte met 30% is vergroot. Bij deze conclusie moet opgemerkt worden dat de tralieliggers, zoals onder tabel 5 is vermeld, extra zijn verankerd in de breedplaat door het doorrijgen van de langswapening van de breedplaat.



figuur 30 Aanbevelingen voor de detaillering en rekenkundige toets van een breedplaatvloer ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten volgens [26]

3.6 Onderzoek Da Silva

In [27] is een experimenteel onderzoek beschreven naar het aansluitdetail tussen twee breedplaten in een BubbleDeck breedplaatvloer. Het onderzoek is in 2016 uitgevoerd aan de Universiteit van Brasilia als onderdeel van een masterstudie.

Het experimentele onderzoek bestaat, naast een serie materiaalproeven, uit een aantal 4-puntsbuigproeven. De proefstukken voor de 4-puntsbuigproeven betreffen bollenplaatvloeren en zijn voorzien van gewichtsbesparende bollen. De proefstukken hebben een lengte van 3,0 m, een breedte van 1,025 m en een dikte van 280 mm. Er zijn bollen tot de naad toegepast. De koppelwapening bestaat uit 8Ø10-125 mm met een verankeringslengte van 500 mm. De koppelwapening is geconcentreerd aangebracht tussen de bollen. Uit het onderzoek volgt dat de proefstukken bezwijken door het bereiken van de momentcapaciteit (buiging), of door een combinatie van buiging en gedeeltelijke onthechting, zie foto 13b. De bezwijklast lag hierbij ongeveer gelijk aan de bezwijklast van de referentieproef op een massieve plaat. Door Da Silva wordt geconcludeerd dat de dimensionering van het betreffende aansluitdetail geen afbreuk doet op het constructieve draagvermogen indien het wordt belast door een buigend moment.

tabel 6 Gegevens proefstukken en proefopstelling Da Silva

Geometrie proefstuk		
hoogte proefstuk		280 mm
dikte breedplaat		60 mm
breedte proefstuk		1025 mm
lengte proefstuk		3000 mm
gewichtsbesparende elementen		Bollen \varnothing 225 mm
Geometrie proefopstelling		
overspanning		2700 mm
afstand tussen puntlasten		900 mm
Materiaaleigenschappen		
beoogde betonsterkteklasse breedplaat		30 MPa
beoogde betonsterkteklasse druklaag		C40/50
kwaliteit toegepast betonstaal		650 MPa (in plaat) 550 MPa (overig)
kwaliteit staal tralieligger		B500A*
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
langswapening in de breedplaat		8 \varnothing 8-100/150 mm
dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde		28 mm
koppelwapening		8 \varnothing 10-125 mm
lengte koppelwapening		1000 mm
ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening		0 mm*
afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg		1000 mm en 125 mm* (beugels toegepast)
hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]		216 mm*
diameter tralieligger b/d/o		*/*/*
diepte onderzijde tralieligger in breedplaat		60-28-8 = 24 mm
verbinding tussen tralieligger en langswapening		*
Uitvoering breedplaten		
type beton		normaal
afwerking bovenzijde		*
*gegevens niet of niet duidelijk uit het rapport af te leiden		



foto 13a en b vervaardiging proefstuk en respectievelijk een bezweken proefstuk [25]

3.7 Onderzoek van Molken e.a.

In [28] wordt verslag gedaan van zes experimenten op breedplaatvloeren met een hoogte van 340 mm dat is in 2018 uitgevoerd aan de KU te Leuven. De breedplaten hebben een dikte van 60 mm. De breedte van de proefstukken is gelijk aan 900 mm. Bij vijf van de zes experimenten zijn in de druklaag gewichtsbeparende maatregelen van het type Airdeck aangebracht. Dit in de vorm van boxen. Deze zijn zo aangebracht dat in de breedte van het proefstuk, naast 3 boxen, 2 hele ribben en 2 halve ribben aanwezig zijn.

De druklaag is bedoeld met een betonkwaliteit C30/37, de sterkte is tijdens het onderzoek specifiek beproefd en gerapporteerd. De breedplaten zijn vervaardigd van beton C50/60. Dit beton is verder niet onderzocht.

De wapening in de breedplaten is gelijk aan $20\text{Ø}10$ en $2\text{Ø}8$ (1668 mm^2). De dekking aan de onderzijde van deze wapening is gelijk aan 20 mm. De tralieliggers zijn in de haakse richting direct op deze wapening geplaatst. De tralieliggers hebben onderstaven en diagonalen $\text{Ø}6$ en een bovenstaaf $\text{Ø}8$. De eerste tralieligger bevindt zich op 300 mm vanaf de naad. De koppelwapening bestaat uit $6\text{Ø}16$ met een lengte van 1500 mm. Bij de proefstukken met de boxen zijn er in de hele ribben 2 koppelstaven en in de halve ribben één koppelstaaf aangebracht.

Bij de vier van de vijf proefstukken met boxen zijn verder de volgende variaties aangebracht:

- met een niet bewerkt of een bewerkt oppervlak van de breedplaat;
- koppelwapening direct op de breedplaat of met de dekking tot de bovenzijde van de breedplaat.

Bij het vijfde proefstuk met boxen is de $\text{Ø}10$ wapening in de breedplaat ter plaatse van de naad als haak omgezet en opgenomen in de druklaag.

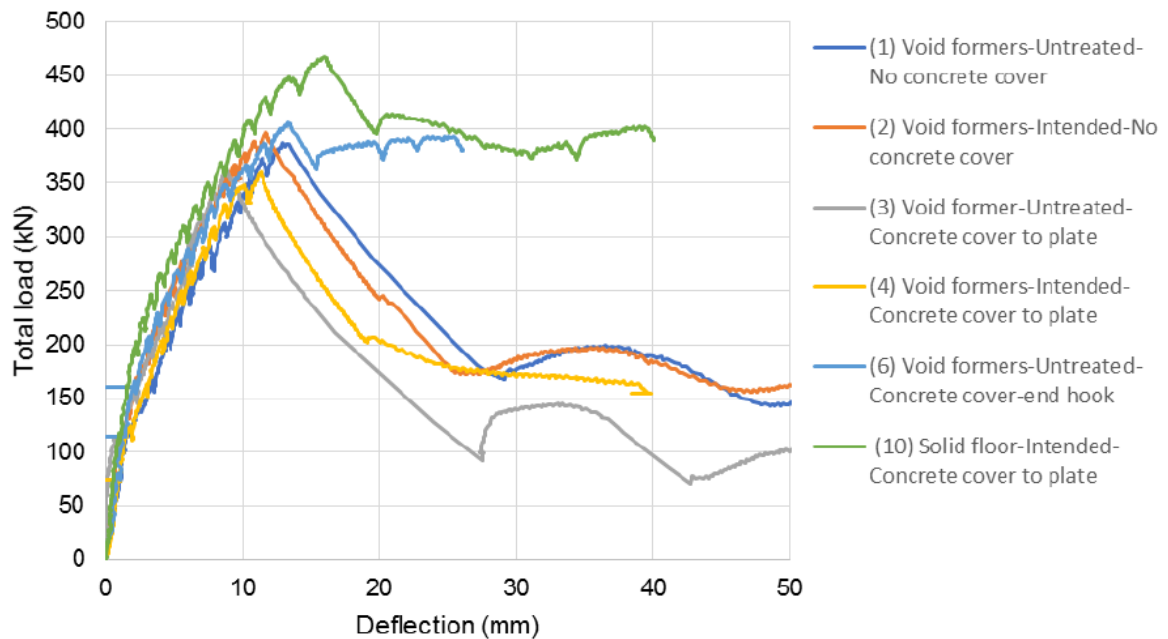
De proefstukken zijn belast met een 4-puntsbuigproef waarbij de overspanning gelijk is aan 3,16 meter en de afstand tussen de twee actiekrachten gelijk is aan 1,86 m. De gerapporteerde kracht is gelijk aan de som van beide actiekrachten.

tabel 7 Gegevens proefstukken en proefopstelling Molkens

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	340 mm
	dikte breedplaat	60 mm
	breedte proefstuk	900 mm
	lengte proefstuk	3600 mm
	gewichtsbesparende elementen	geen (1/6) Airdeck boxen (5/6)
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	3160 mm
	afstand tussen puntlasten	1860 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	C50/60
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	C30/37
	kwaliteit toegepast betonstaal	BE500
	kwaliteit staal tralieligger	*
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	20Ø10 + 2Ø8
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	20 mm
	koppelwapening	6Ø16
	lengte koppelwapening	1500 mm
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	0 mm (2/6) * (4/6)
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	300 mm bij 1 proefstuk zijn haken toegepast
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	*
	diameter tralieligger b/d/o	8/6/6
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	60-20-10 = 30 mm
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	*
Uitvoering breedplaten		
	type beton	normaal
	afwerking bovenzijde	geen (3/6) gegroeft (3/6)
*gegevens niet of niet duidelijk uit het rapport af te leiden		

Bij een aantal proeven treedt een horizontale scheur op in het aansluitvlak die doorloopt tot de tralieligger en daarna ook iets verder doorzet maar niet leidt tot het bezwijken van de bevestiging van de tralieligger. Spoedig ontstaan ook meer verticaal georiënteerde scheuren in de door de aanwezigheid van de boxen gereduceerde doorsneden. Ook trad er horizontale scheurvorming op aan de zijkant van het proefstuk in de halve rib op de hoogte van de koppelwapening. Bij enkele proefstukken is vastgesteld dat er slip van de koppelwapening optreedt in de halve ribben. Het bezwijken van de proefstukken wordt geweten aan slip van de koppelwapening.

Het last-ervormingsgedrag van de diverse proefstukken is gegeven in figuur 31. Hieruit blijkt dat bij alle proefstukken na het bereiken van de piekweerstand een terugval van de weerstand optreedt bij een toename van de doorbuiging. Bij het massieve proefstuk (10) en het proefstuk met de haak aan de wapening (6) is deze terugval het kleinste.



figuur 31 Last-ervormingsgedrag van de in [[28]] beschreven proefstukken

In [28] is door de betreffende onderzoeker geconcludeerd dat het bezwijkgedrag zoals dat bij de schade in de parkeergarage bij Eindhoven Airport is opgetreden, tijdens de proeven niet is waargenomen.

3.8 Samenvatting

Hiervoor is literatuur gerelateerd aan het aansluitdetail bij breedplaatvloeren samengevat. Het beschrijft verschillende experimentele, numerieke en analytische onderzoeken. In diverse onderzoeken zijn ook 4-puntsbuigproeven uitgevoerd voor het bepalen van de momentcapaciteit van het kritische aansluitdetail. Van deze onderzoeken zijn de relevante data van de proefstukken, zover als bekend, in tabellen en in bijlage F samengevat.

De hoeveelheid koppelwapening is bij de beschreven experimentele onderzoeken in het algemeen kleiner dan die aanwezig was bij de vloeren van de parkeergarage bij Eindhoven Airport. Bij de beschreven experimenten is de positie van de tralieligger variërend of is een tralieligger in het geheel niet aanwezig. Ook wordt opgemerkt dat bij een aantal experimenten de koppelwapening niet doorliep tot voorbij de eerste tralieligger.

De aangetroffen bezwijkvormen zijn divers. Het bezwijken van het aansluitvlak, eventueel in combinatie met het uittrekken van de tralieligger is waargenomen, maar ook het bij het ontwerp beoogde bezwijken door vloeien van de koppelwapening is waargenomen.

Het bezwijken van het aansluitvlak gebeurt met een ongewenst bros gedrag, als er al sprake is van enige vervormingscapaciteit, dan neemt de weerstand van het proefstuk significant af bij een toenemende vervorming. Er is geen sprake van voldoende vervormingscapaciteit, een eigenschap die bij het ontwerpen van betonconstructies wel wordt nagestreefd om zo herverdeling van krachten mogelijk te maken en waarschuwend gedrag te vertonen voorafgaand aan bezwijken.

Ook als vloeï van de koppelwapening wordt bereikt, kan de ductiliteit van de constructie waarin het kritische vloerdetail is opgenomen, beperkt zijn.

4 Beschikbare resultaten experimenteel onderzoek

4.1 Inleiding

Tijdens het onderzoek naar de oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage en daarna zijn verschillende experimenten uitgevoerd naar het gedrag van breedplaatvloeren die ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten worden belast door een positief moment. Deze experimenten zijn hierna opgesomd:

- Experimenten ten tijde van het onderzoek naar de oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage, beschreven in bijlage XI van [2]
- Experimenten naar het gedrag van Cobiax vloeren, uitgevoerd in opdracht van BAM [29]
- Experimenten naar het gedrag van massieve breedplaten met traditioneel beton, uitgevoerd in opdracht van het Betonhuis [30]
- Experimenten naar het gedrag van massieve breedplaten met zelfverdichtend beton, uitgevoerd in opdracht van Hageman [31]
- Experimenten naar het gedrag van versterkte breedplaten, uitgevoerd in opdracht van de Task-force Versterken van BAM².

Daarnaast zijn voor een aantal van de hiervoor beschreven proefstukken, kleinere proefstukken beproefd waarbij middels een directe afschuifproef de eigenschappen van het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag nader zijn bepaald.

Hierna zijn een aantal kenmerkende bevindingen van deze onderzoeken samengevat. Relevante variabelen van de beschouwde proefstukken zijn samengevat in bijlage A van dit rapport.

4.2 ‘Eindhoven Airport onderzoek’

In het kader van dit onderzoek zijn 7 proefstukken beproefd, zie [2]. Bij deze proefstukken zijn de volgende variabelen gevarieerd:

- de configuratie van de hoeveelheid koppelwapening (gebundeld of niet – 4Ø16 of 3Ø16+1Ø10 per rib)
- de druksterkte van het beton van de druklaag
- het wel of niet geknikt zijn van het proefstuk.

Ten behoeve het overzicht zijn hierna de kenmerken van de proefstukken en de afmeting van de opstelling samengevat in tabel 8.

Uit het uitgevoerde onderzoek blijkt dat bij alle zeven proefstukken het bezwijken optreedt doordat na het ontstaan van een scheur in het aansluitvlak, die doorloopt tot en met de eerste tralieligger, het resterende deel van het aansluitvlak bezwijkt en de tralieligger uit de breedplaat wordt getrokken. De gevonden bezwijklast is relatief laag ten opzicht van de waarde die in het ontwerp beoogd was. De variatie van de grootte van de bezwijklast is beperkt.

² 1)Aansluitend op het onderzoek naar de oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de parkeergarage Eindhoven Airport heeft BAM het initiatief genomen versterkingen te gaan onderzoeken. Daartoe is een Task-force gestart, waarin naast BAM wordt deelgenomen door Hilti Nederland BV, Adviesbureau Hageman, Van Rossum en ABT. In [36] zijn een aantal resultaten van het onderzoek opgenomen.

tabel 8 Gegevens proefstukken en proefopstelling 'Eindhoven Airport onderzoek'

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	450 mm
	dikte breedplaat	70 mm
	breedte proefstuk	800 mm
	lengte proefstuk	3832mm
	gewichtsbesparende elementen	Bollen Ø360 mm
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	3232 mm
	afstand tussen puntlasten	1600 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	C45/55
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	18 MPa (4/7) 34 MPa (3/7)
	kwaliteit toegepast betonstaal	B500
	kwaliteit staal tralieligger	B500
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	Ø14 en Ø10
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	35 mm
	koppelwapening	8Ø16 (4/7) 6Ø16 + 2Ø10 (3/7)
	lengte koppelwapening	1550 mm (Ø16) 1150 mm (Ø10)
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	0 mm
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	425 mm
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	300 / 200
	diameter tralieligger b/d/o	10/6/6
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	70-35-14 = 21 mm
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	soms gelast
Uitvoering breedplaten		
	type beton	zelfverdichtend
	afwerking bovenzijde	geen

4.3 BAM-Cobix

In [29] is het onderzoek beschreven dat in opdracht van BAM is uitgevoerd. Hierbij zijn door de samenwerking tussen BAM en Gelissen proefstukken vervaardigd die een beeld geven van de in de laatste decennia toegepaste Cobix breedplaatvloeren. Opgemerkt wordt dat de breedplaten ten behoeve van deze proeven zijn vervaardigd bij Lodewikus in Oosterhout. Voor maart 2018 werden de breedplaten voor het Cobix vloersysteem bij andere producenten vervaardigd. Ook is het zo dat bij de beproefde proefstukken direct naast de naad tussen de twee breedplaten het maximale aantal aan te brengen Cobix bollen is aangebracht. In de praktijk zijn ter plaatse van de naad ook regelmatig bollen om en om aangebracht om zo bijvoorbeeld meer ruimte beschikbaar te maken voor de

koppelwapening. In die gevallen is, volgens Gelissen, daar waar bollen achterwege zijn gelaten, de bovenzijde van de breedplaat opgeruwd met een bezem.

tabel 9 Gegevens proefstukken en proefopstelling Cobiax onderzoek

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	450 mm
	dikte breedplaat	70 of 90 mm
	breedte proefstuk	800 mm
	lengte proefstuk	3800 mm
	gewichtsbesparende elementen	Bollen
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	3200 mm
	afstand tussen puntlasten	1600 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	C 55/67
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	C 35/45
	kwaliteit toegepast betonstaal	B500
	kwaliteit staal tralieligger	B500
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	10Ø12
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	30 mm
	koppelwapening	4Ø20
	lengte koppelwapening	1800 mm **
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	8 mm
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	375 mm 100 mm ***
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	300 / 200
	diameter tralieligger b/d/o	8/6/6
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	70 - 30 - 12 = 28 mm 90 - 52 - 12 = 26 mm
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	soms gelast
Uitvoering breedplaten		
	type beton	zelfverdichtend beton
	afwerking bovenzijde	geen
** bij één type proef is de lengte van de koppelstaven gereduceerd tot 1400 mm		
*** er is een configuratie beproefd waarbij reguliere wapeningsstaven ter plaatse van de naad uit de breedplaten verticaal omhoog steken.		

Ook zijn proefstukken vervaardigd om te onderzoeken hoe bij de herbouw van de parkeergarage bij Eindhoven Airport het detail bij de naden tussen de breedplaten op plaatsen waar positieve momenten aanwezig zijn, uitgevoerd kan worden om een voldoende betrouwbare constructie te verkrijgen.

Hierbij zijn tralieliggers aangebracht op 100 mm vanaf de naad of steken nabij de naad, wapeningsstaven verticaal uit de breedplaten omhoog.

Van iedere configuratie die is onderzocht, zijn drie proefstukken beproefd. Voor het hier beschouwde probleem, een voeg ter plaatse van een positief moment zonder dwarskracht, zijn 5 configuraties beproefd. Dus in het totaal zijn er 15 proefstukken beschikbaar.

Daarnaast is een serie van drie proefstukken beproefd waarbij sprake was van een combinatie van dwarskracht en moment ter plaatse van de voeg.

Ten behoeve het overzicht zijn hierna de kenmerken van de proefstukken en de afmeting van de opstelling samengevat in tabel 9.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat de proefstukken die enigszins representatief waren voor de toepassing van de Cobiax vloeren in het verleden, na het ontstaan van buigtrekscheuren in de druklaag bezweken door het vloeien van de koppelwapening. Dit gold ook voor de proefstukken waarbij wapeningsstaven ter plaatse van de naad uit de breedplaten verticaal omhoog steken.

Van de proefstukken waarbij nabij de naad tralieliggers zijn aangebracht zijn vier van de zes proefstukken bezweken doordat het aansluitvlak bezwijkt en de tralieligger, die op 100 mm vanaf de naad staan, uit de breedplaat wordt getrokken. Dit gebeurde wel bij een relatief hoge belasting waarbij bijna het vloeigedrag van de koppelwapening bereikt zou worden.

4.4 Breedplaten van traditioneel beton

Door het Betonhuis, een vereniging waarin onder andere een aantal breedplaatvloeren fabrikanten zich verenigd hebben, is aan het Structures Laboratory Eindhoven opdracht gegeven om door de fabrikanten vervaardigde proefstukken, met breedplaten van traditioneel beton, te beproeven. Dit onderzoek is beschreven in [30]. De proefstukken zijn zo samengesteld dat ze extreme situaties die in de laatste decennia met beperkte regelmaat zijn vervaardigd, representeren.

Het basisproefstuk is een proefstuk met een dikte van 300 mm, een breedplaatdikte van 70 mm, een niet afgewerkte bovenzijde van de breedplaat en koppelwapening $\text{Ø}12\text{-}150$. Ten opzichte van dit proefstuk zijn vervolgens afwijkende typen proefstukken vervaardigd waarbij diverse variabelen zijn gevarieerd. Zo zijn bijvoorbeeld de hoeveelheid koppelwapening verhoogd tot $\text{Ø}16\text{-}150$ en de lengte van de koppelwapening aangepast. In totaal zijn er 7 verschillende typen proefstukken beproefd, waarbij van ieder type drie proefstukken zijn vervaardigd en beproefd. Een beknopt overzicht van de beschouwde variabelen is opgenomen in tabel 10.

Behoudens de proefstukken waarbij de breedplaten aan de bovenzijde zijn opgeruwd en waarbij tevens de diepte van de tralieligger gelijk is aan 35 mm, zijn alle proefstukken bezweken door het ontstaan van een scheur in het aansluitvlak gecombineerd met het uittrekken van de tralieligger uit de breedplaat. Bij de opgeruwde breedplaten werd vloeien van de koppelwapening bereikt.

tabel 10 Gegevens proefstukken en proefopstelling Betonhuis-onderzoek

Geometrie proefstuk		
hoogte proefstuk		300 mm (250 mm)
dikte breedplaat		70 mm
breedte proefstuk		1000 mm
lengte proefstuk		3800 mm
gewichtsbesparende elementen		-
Geometrie proefopstelling		
overspanning		3200 mm
afstand tussen puntlasten		1600 mm
Materiaaleigenschappen		
beoogde betonsterkteklasse breedplaat		C 30/37
beoogde betonsterkteklasse druklaag		C 30/37 (C20/25)
kwaliteit toegepast betonstaal		B500
kwaliteit staal tralieligger		B500
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
langswapening in de breedplaat		Ø8-65 (Ø10-55)
dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde		35 mm (25 mm)
koppelwapening		7Ø12 (7Ø16)
lengte koppelwapening		1400 mm (1700 mm)
ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening		geen
afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg		400 mm (100 mm)
hoogte tralieligger / systeemplaat tralieligger [mm]		190 / 200 (210 / 200)
diameter tralieligger b/d/o		7/4,5/5 (8/5/5)
diepte onderzijde tralieligger in breedplaat		70 - 35 - 8 = 27 mm (70 - 25 - 10) = 35 mm (70 - 35 - 10 = 25 mm)
verbinding tussen tralieligger en langswapening		geen
Uitvoering breedplaten		
type beton		traditioneel
afwerking bovenzijde		geen (opgeruwd)

4.5 Breedplaten van zelfverdichtend beton

Aanvullend op de in 4.4 beschreven proeven, waarbij de breedplaten zijn vervaardigd met traditioneel grindbeton, zijn, om inzicht te krijgen in het effect van de toepassing van zelfverdichtend beton, ook proefstukken vervaardigd waarbij de breedplaten zijn vervaardigd met zelfverdichtend beton. De druksterkte van dit beton is aanmerkelijk hoger dan de beoogde sterkte van C30/37. De gemeten druksterkte van kubussen van het zelfverdichtend beton is circa 90 MPa. Er zijn twee typen proefstukken beproefd, één met een gladde bovenzijde en één met een opgeruwde bovenzijde. De wijze van opruwen is vergelijkbaar met de methode die bij het ruwe proefstuk van breedplaten met traditioneel beton is toegepast. Van ieder type zijn drie proefstukken beproefd.

tabel 11 Gegevens proefstukken en proefopstelling breedplaten zelfverdichtend beton

Geometrie proefstuk		
	hoogte proefstuk	300 mm
	dikte breedplaat	70 mm
	breedte proefstuk	1000 mm
	gewichtsbesparende elementen	nee
Geometrie proefopstelling		
	overspanning	3200 mm
	afstand tussen puntlasten	1600 mm
Materiaaleigenschappen		
	beoogde betonsterkteklasse breedplaat	C30/37
	beoogde betonsterkteklasse druklaag	C30/37
	kwaliteit toegepast betonstaal	B500B
	kwaliteit staal tralieligger	B500A
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
	langswapening in de breedplaat	Ø8-65
	dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde	25 mm
	koppelwapening	7Ø12-150
	lengte koppelwapening	1400 mm
	ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening	0 mm
	afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg	400 mm
	hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]	210 / 200
	diameter tralieligger b/d/o [mm]	8/5/5
	diepte onderzijde tralieligger in breedplaat	37 mm
	verbinding tussen tralieligger en langswapening	geen
Uitvoering breedplaten		
	type beton	zvb
	afwerking bovenzijde	glad opgeruwd

De proefstukken bezwijken in het algemeen bij een relatief hoge last nadat vloeit van de wapening is opgetreden. Bij één proefstuk treedt een afwijkend bezwijkbeeld op bij een lagere belasting. Een buigtrekscheur in de druklaag bij de tralieligger leidt er toe dat de tralieligger als het ware uit de druklaag wordt getrokken, daarna breken en slippen de staven van de koppelwapening.

4.6 Taskforce Versterken

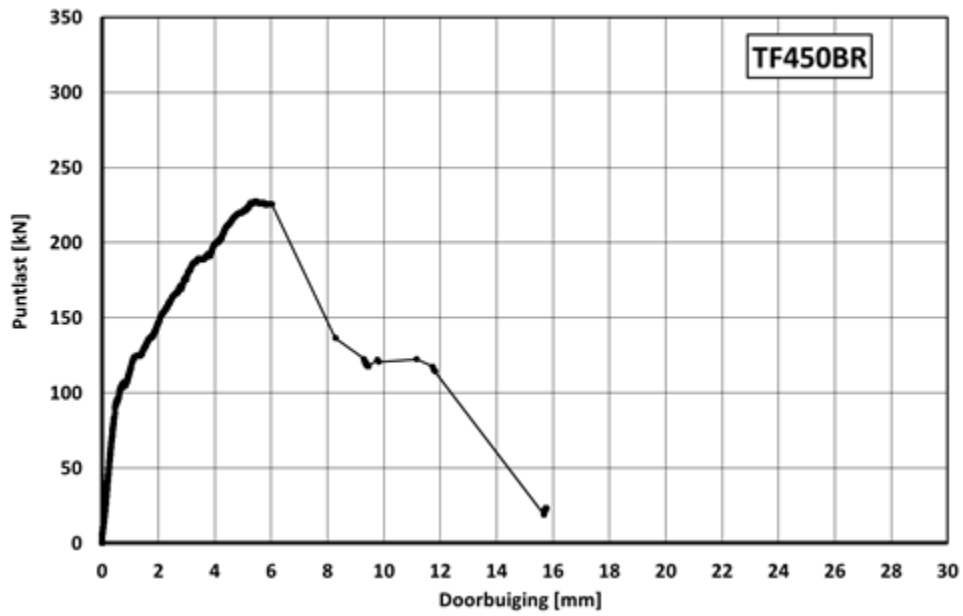
Om na te gaan hoe de momentweerstand van breedplaatvloeren ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten verbeterd kan worden, heeft BAM de 'Taskforce Versterken' ingesteld. Hierin werkt de BAM samen met enkele ingenieursbureaus en met Hilti. Door de BAM zijn ten behoeve van dit onderzoek proefstukken vervaardigd die wat betreft geometrie overeenkomen met de proefstukken die voor het 'Eindhoven Airport onderzoek', zie 4.2 hiervoor. Voor het betonmengsel van de breedplaten is dezelfde mengselsamenstelling gebruikt als bij het 'Eindhoven Airport onderzoek'.

Naast de proefstukken met een vloerhoogte van 450 mm zijn er ook proefstukken gemaakt met breedplaatvloeren, voorzien van gewichtsbesparende elementen, met een hoogte van 280 mm. De proefstukken zijn beproefd in het Structures Laboratory Eindhoven. Tijdens het onderzoek zijn niet versterkte en versterkte proefstukken beproefd. Hierna wordt ingegaan op het gedrag van enkele niet versterkte proefstukken. Een overzicht van de eigenschappen van de beschouwde proefstukken is gegeven tabel 12.

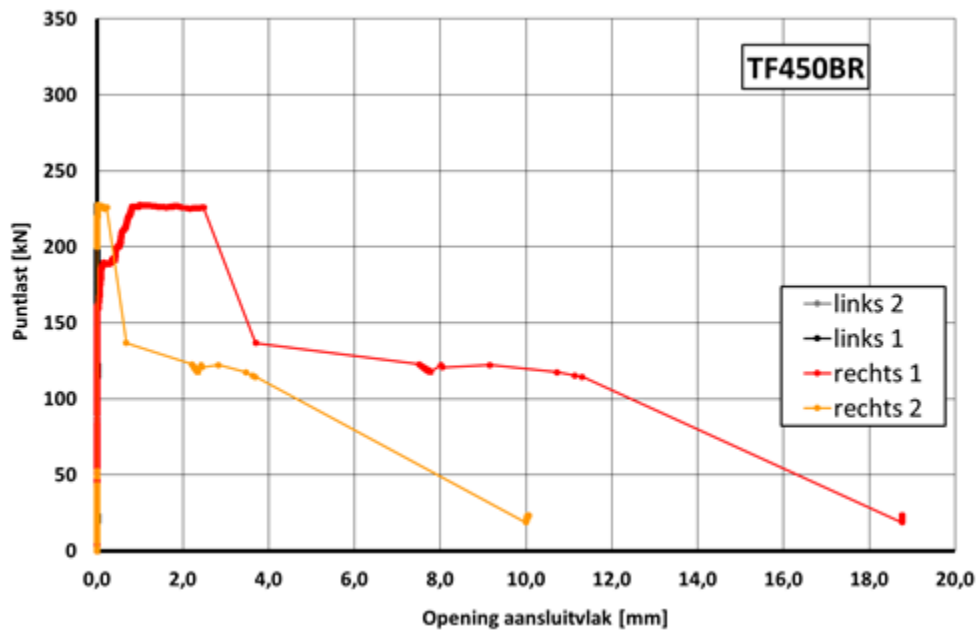
Tijdens de proeven op proefstukken met een hoogte van 450 mm bleek dat de hechtsterkte tussen de breedplaat en de druklaag bij deze proefstukken beduidend hoger was dan bij de proefstukken van het 'Eindhoven Airport onderzoek'. De bezwijkwaarde van de proefstukken lag dan ook fors hoger. Echter na het bereiken van de maximale weerstand viel de weerstand van het proefstuk terug tot het niveau dat ook bij het 'Eindhoven Airport onderzoek' is gevonden van 120 à 130 kN per puntlast. Een voorbeeld van het gedrag van deze proefstukken is gegeven in figuur 32 en figuur 33. Het begin van de terugval werd ingeleid door een beperkte toename van de scheurwijdte in het aansluitvlak nabij de tralieligger aan de rechterzijde, op een afstand van 425 mm vanaf de naad tussen de beide breedplaten. Deze scheur loopt daarbij door tot het einde van de koppelwapening en zelfs verticaal omhoog daarna, zie foto 14. De weerstand wordt op dat moment vooral geleverd door de tralieligger die nog aan beide zijde van het gescheurde aansluitvlak in het beton verankerd is.

tabel 12 Gegevens proefstukken en proefopstelling 'Taskforce Versterken'

Geometrie proefstuk		
hoogte proefstuk		450 mm (280 mm)
dikte breedplaat		70 mm
breedte proefstuk		800 mm
lengte proefstuk		3800mm
gewichtsbesparende elementen		Bollen $\varnothing 360$ mm ($\varnothing 225$ mm)
Geometrie proefopstelling		
overspanning		3200 mm
afstand tussen puntlasten		1600 mm
Materiaaleigenschappen		
beoogde betonsterkteklasse breedplaat		C45/55
beoogde betonsterkteklasse druklaag		C30/37
kwaliteit toegepast betonstaal		B500
kwaliteit staal tralieligger		B500
Wapeningshoeveelheid en geometrie		
langswapening in de breedplaat		8 $\varnothing 14$ (2 $\varnothing 12$ + 4 $\varnothing 14$)
dekking op langswapening ten opzichte van onderzijde		35 mm
koppelwapening		8 $\varnothing 16$ (2 $\varnothing 10$ + 4 $\varnothing 16$)
lengte koppelwapening		1550 mm ($\varnothing 16$) 1150 mm ($\varnothing 10$)
ruimte tussen bovenzijde breedplaat en koppelwapening		0 mm
afstand hart 1 ^e tralieligger tot de voeg		425 mm (300 mm)
hoogte tralieligger / systeemplengte tralieligger [mm]		300 / 200 (170/200)
diameter tralieligger b/d/o		10/6/6
diepte onderzijde tralieligger in breedplaat		70-35-14 = 21 mm
verbinding tussen tralieligger en langswapening		soms gelast
Uitvoering breedplaten		
type beton		zelfverdichtend
afwerking bovenzijde		geen



figuur 32 Last-doorbuigingsgedrag proefstuk TF450BR



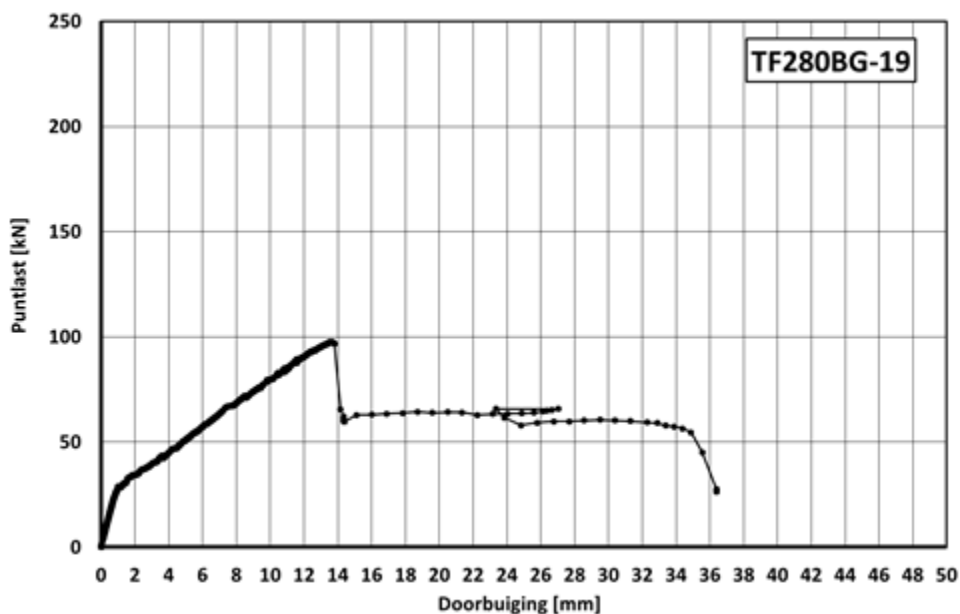
figuur 33 Relatie tussen scheurwijdte in het aansluitvlak en de kracht per vijzel bij proefstuk TF450BR



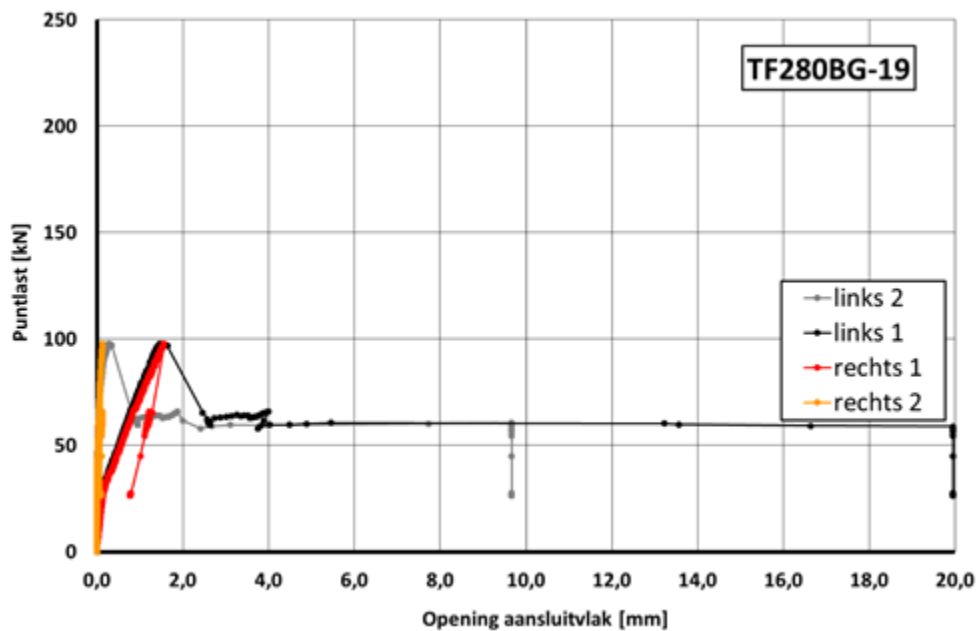
foto 14 Proefstuk TF450BR na het bereiken van de maximale weerstand bij een belasting van 118 kN en een scheurwijdte rechts 1 (op de foto links) gelijk aan 7,7 mm.

Het uiteindelijke bezwijken treedt op gelijk aan de proefstukken van het ‘Eindhoven Airport onderzoek’ doordat na het ontstaan van een scheur in het aansluitvlak, die doorloopt tot en met de eerste tralieligger, aan één zijde van het proefstuk het resterende deel van het aansluitvlak bezwijkt en de tralieligger uit de breedplaat wordt getrokken.

Bij niet versterkte proefstukken met een hoogte van 280 mm wordt een gelijk gedrag gevonden. Na het bereiken van een maximale weerstand valt de weerstand terug en blijft vervolgens bij een toenemende verplaatsing nog enigszins constant, zie figuur 34 en figuur 35 hierna.



figuur 34 Last-doorbuigingsgedrag proefstuk TF280BG-19



figuur 35 Relatie tussen scheurwijdte in het aansluitvlak en de kracht per vijzel bij proefstuk TF280BG-19

Het bezwijken van het niet versterkte proefstuk met een hoogte van 280 mm, gaat op eenzelfde wijze als bij het proefstuk met een hoogte van 450 mm.

Voor de verdere analyse van de resultaten van de verschillende proeven worden de resultaten van de proefstukken TF450BR en TF280BG-19 beschouwd, zie tabel 13. Bij deze analyse de weerstand die met een toenemende vervorming enigszins kan worden vastgehouden, aangeduid als ductiel bezwijkniveau.

tabel 13 Resultaten enkele niet versterkte proefstukken Taskforce Versterken

proefstuk	maximale bezwijklast [kN]	ductiel bezwijkniveau [kN]	druksterkte druklaag [MPa]	druksterkte breedplaat [MPa]
TF450BR	227	122	54,1	54,6
TF280BG-19	98	64	50,9	60,5

Een uitgebreid verslag van de proeven die door de Taskforce zijn uitgevoerd volgt later.

4.7 Directe afschuifproeven

In het kader van een afstudeeronderzoek van L. Croes zijn op de TU/e zijn er in het Structures Laboratory Eindhoven op diverse configuraties van hiervoor beschreven proefstukken directe afschuifproeven uitgevoerd op het aansluitvlak tussen de breedplaten en de druklaag. Het doel van het onderzoek is om meer inzicht te krijgen in het gedrag van dit aansluitvlak als deze wordt belast door een combinatie van normaalrukspanning en afschuiving.

Voor de beschouwde configuraties zijn 6 proefstukken vervaardigd en beproefd. De proefstukken zijn door de fabrikanten tegelijkertijd met de proefstukken voor de 4-puntsbuigproeven vervaardigd. Zo ver dat praktisch mogelijk was, zijn de afschuifproeven in dezelfde periode uitgevoerd als de 4-puntsbuigproeven.

De proefstukken hebben lengte van 300 mm, een breedte van 250 mm en een druklaagdikte van 200 mm. De proefstukken worden vervaardigd door op een stuk breedplaat met de gegeven lengte- en breedte-afmetingen een druklaag met een dikte van 200 mm te storten. De afwerking van de bovenzijde van de breedplaat zijn representatief voor de afwerking van de bovenzijde van de breedplaten voor de 4-puntsbuigproeven.

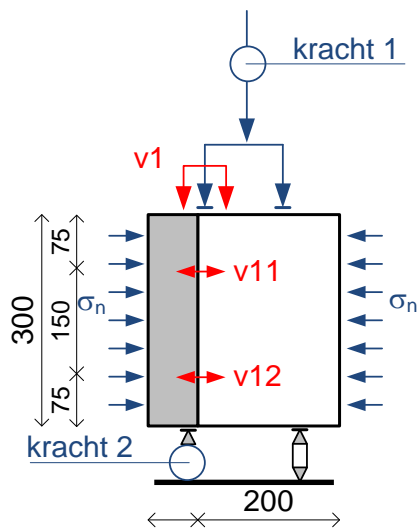
Een schets van de proefopstelling is gegeven in figuur 36. Bij de proef zijn bij twee of drie verschillende voordrukken σ_n telkens drie of twee proefstukken op afschuiving belast. Daarbij worden de volgende verplaatsingen gemeten:

- v1 het verplaatsingsverschil tussen de breedplaat en de druklaag in verticale richting;
- v11 en v12 meten van verplaatsing in de richting loodrecht op het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag.

Naast de verplaatsingen zijn ook op drie plaatsen de kracht gemeten:

- kracht1 de kracht uitgeoefend op het proefstuk
- kracht2 de kracht in de oplegging onder de breedplaat
- σ_n de kracht uitgeoefend in de richting loodrecht op het aansluitvlak.

De verplaatsingsmetingen zijn aan beide zijden van het proefstuk uitgevoerd. Foto 9 toont de opstelling na het bezwijken van het proefstuk.



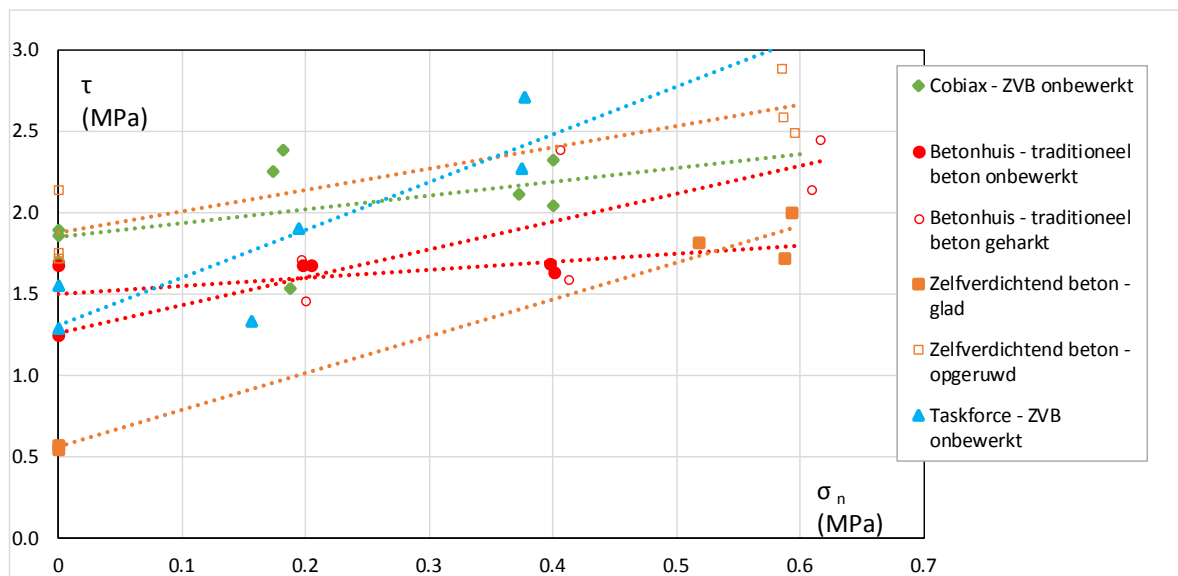
figuur 36 Opstelling directe afschuifproef



foto 15 Opstelling na bezwijken proefstuk

Hierna zijn voor verschillende configuraties van breedplaten en druklagen de resultaten van de directe afschuifproeven, uitgevoerd in het Structures Laboratory Eindhoven, samengevat in figuur 37. Hierbij is de gemiddelde schuifspanning τ waarbij het bezwijken van het proefstuk is opgetreden,

uitgezet tegen de gemiddelde voorspandruk loodrecht op het afschuifvlak σ_n . Daarnaast is ook een lineaire benadering van de relatie tussen de schuifsterkte τ en de voordruk σ_n geschetst.



figuur 37 Resultaten directe afschuifproeven

Een overzicht van de resultaten met grafieken per configuratie is opgenomen in bijlage B bij dit rapport.

tabel 14 Overzicht van lineaire benadering van de schuifsterkte van het aansluitvlak

configuratie	$f_{cm,cube}$ breedplaat [MPa]	$f_{cm,cube}$ druklaag [MPa]	τ_0 [MPa]	μ
BAM-Cobiax zvb onbewerkt	86	44	1,84	0,85
Betonhuis traditioneel grindbeton onbewerkt	40	18	1,50	0,50
Betonhuis traditioneel grindbeton opgeruwd	66	40	1,26	1,70
Zelfverdichtend beton glad	88	43	0,57	2,25
Zelfverdichtend beton opgeruwd	94	38	1,87	1,32
Taskforce onbewerkt	56	60	1,31	2,94

In tabel 14 zijn de resultaten van deze lineaire benaderingen samengevat middels het beschrijven van de variabelen van de volgende vergelijking:

$$\tau_{\text{bezwijk}} = \tau_0 + \mu \sigma_n \quad (2)$$

waarin:

τ_{bezwijk} is de schuifsterkte van het aansluitvlak bij een bekende normaaldrukspanning

τ_0 is de initiële schuifsterkte van het aansluitvlak

μ is een coëfficiënt die de invloed van de normaaldrukspanning op de schuifsterkte beschrijft
 σ_n is de normaaldrukspanning in het aansluitvlak.

De hiervoor gepresenteerde waarden kenmerken zich door een grote variatie en laten zich lastig beschrijven per betonsoort of per afwerkingswijze. Zo is de wrijvingscoëfficiënt voor het gladde zelfverdichtend beton oppervlak met 2,51 zeer hoog. Echter de range van de gevonden waarden komt overeen met waarden die ook door Lundgren [22] zijn gepresenteerd.

In foto 16a en b zijn de aansluitvlakken van beide configuraties met zelfverdichtend betonnen breedplaten getoond.



foto 16a en b Bezweken aansluitvlakken van zelfverdichtend beton glad (a) en opgeruwd (b)

4.8 Hechtsterktemeting

Door SGS Intron zijn hechtsterktemetingen uitgevoerd op restanten van de vloerconstructie van de parkeergarage, op proefstukken van het ‘Eindhoven Airport onderzoek’ [2] en op proefstukken van de ‘Taskforce Versterken’, zie [32].

Tijdens het onderzoek aan het ‘Eindhoven Airport onderzoek’ proefstuk VL18, uitgevoerd na het beproeven van het proefstuk in een deel dat gelegen is tussen de actiekracht en de reactiekracht, is geconstateerd dat bij een fors deel van het oppervlak van het beschouwde proefstuk reeds sprake was van onthechting tussen het beton van de breedplaat en het beton van de druklaag. Van delen waar wel sprake was van hechting is de hechtsterkte bepaald conform EN 1542. Er zijn drie monsters beproefd. Het bezwijkvlak trad telkens op in het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag. De gemiddelde hechtsterkte was gelijk aan 1,2 MPa (1,0, 1,2 en 1,4 MPa).

Bij proefstuk TF-280-BV-05 van de ‘Taskforce Versterken’, dat als proefstuk niet beproefd is, zijn ook drie monsters beproefd. Bij deze proeven lag het bezwijkvlak steeds in het beton van de druklaag en dus niet in het aansluitvlak. De gemiddelde waarde was gelijk aan 4,0 MPa (3,0, 3,2 en 5,2 MPa).

Het beton van deze proefstukken vertoont volgens SGS Intron een dichte en homogene structuur en vormt daarmee bij voldoende ruwheid van het betonoppervlak, een solide basis voor een goede hechting tussen het beton van de breedplaat en van de druklaag.

Er zijn twee restanten van de +4 vloer van het bezwiken bouwdeel B van de parkeergarage bij Eindhoven Airport onderzocht. Over een groot deel van het oppervlak is sprake van het ontbreken van hechting. Er zijn drie kernen beproefd op hechtsterkte, waarbij waarden tussen 0,18, 0,78 en 1,41 MPa zijn gevonden. In twee van deze kernen (0,18 en 1,41 MPa) was echter nog een deel van een tralieligger aanwezig die beide delen met elkaar verbond. In de breedplaat van de vloerplaten uit de vloer van de bezwiken parkeergarage vertoont het beton van de breedplaat onvolkomenheden in de vorm van ontmenging en aanrijking van luchtbellens aan het oppervlak. Dit heeft naar de mening van SGS Intron een negatief effect op de hechting met de druklaag.

Tot slot merkt SGS Intron op dat door het afkloppen van de vloerelementen op basis van de klank een kwalitatieve indicatie worden verkregen van de mate van hechting tussen de breedplaat en de daarop gestorte druklaag. Bij een hoge klank is de hechting meestal voldoende om kernen te kunnen inboren ter bepaling van de hechtsterkte. Bij een duidelijk lagere klank is de hechtsterkte dusdanig gering dat de torsiekrachten bij het boren de hechtsterkte al overschrijdt.

4.9 Uittreksterkte tralieliggers

In het kader van een afstudeeronderzoek op de TU/e worden in het Structures Laboratory Eindhoven proeven voorbereid om de uittreksterkte van tralieliggers die met een verschillende diepte in een breedplaat zijn aangebracht, te bepalen. Bij het opstellen van dit rapport waren nog geen resultaten van het onderzoek beschikbaar.

5 Analyse van onderzoeksresultaten

5.1 Inleiding

Hierna worden voor de in hoofdstuk 4 beschreven proefstukken een aantal kenmerken nader geanalyseerd.

Zo wordt het maximale moment waarbij bezwijken is opgetreden gerelateerd aan een momentweerstand die theoretisch zou kunnen worden bereikt als de volgende uitgangspunten worden aangehouden:

- het bezwijken treedt op bij het optreden van vloeï in de koppelwapening die in de druklaag is aangebracht;
- aangenomen is dat vlakke doorsneden vlak blijven;
- dat de gemiddelde vloeïgrens van het betonstaal gelijk is aan 550 MPa;
- dat de druksterkte van het beton gelijk is aan de gemiddelde druksterkte van de beproefde kubussen;
- dat de relatie tussen spanning en rek van het beton overeenkomstig figuur 3.4 van NEN-EN 1992-1-1;
- de rekken van het beton en het staal dat zich op zelfde hoogte in de doorsnede bevindt, zijn gelijk.

De verhouding tussen het moment ten tijde van het bezwijken en de momentweerstand wordt hier de bezwijkverhouding genoemd. Als de bezwijkverhouding gelijk aan 1,0 of groter is, is bij het experiment de op basis van de reguliere uitgangspunten verwachte bezwijklast gehaald

Uitgaande van een voldoende verankering is bij alle proefstukken de maatgevende snede voor deze momentweerstand, de snede ter plaatse van de naad tussen de twee breedplaten. De wapening in de breedplaten leidt tot een grotere momentweerstand. De momentweerstand van de proefstukken wordt daarom bepaald door de hoeveelheid koppelwapening in de druklaag.

Daarnaast wordt nagegaan wat in het proefstuk op het moment van bezwijken, de gemiddelde schuifspanning in het aansluitvlak is. Omdat in het algemeen op het moment van bezwijken, de scheurvorming in het aansluitvlak reeds aanwezig is, en zelfs tot in het deel met de eerste tralieligger doorloopt, is hierbij als aansluitvlak aangehouden het product van de breedte van het proefstuk en de lengte van de koppelwapening in het proefstuk, gemeten vanaf het hart van de eerste tralieligger, verder gereduceerd door het oppervlak van gewichtsbesparende elementen in het aansluitvlak. De over te dragen schuifkracht wordt als volgt bepaald. In de doorsnede ter plaatse van het einde van de koppelwapening wordt de trekkracht in de wapening in de breedplaten bepaald, uitgaande van een lineaire spanningsverdeling in het beton onder druk. Het beton met positieve rekken wordt gescheurd verondersteld. Bij deze bepaling is de elasticiteitsmodulus van het beton bepaald uit de bekende gemiddelde kubusdruksterkte en de vergelijking in tabel 3.1 van NEN-EN 1992-1-1.

Een voorbeeld van de berekening van deze waarden is opgenomen in bijlage C van dit rapport. Vervolgens zijn de gevonden waarden samengevat in een tabel in dezelfde bijlage.

5.2 Beschrijving van het bezwijken

Bij de uitgevoerde experimenten treden in het algemeen twee soorten bezwijken op: het vloeien van de koppelwapening wordt bereikt of het aansluitvlak tussen de breedplaat en de druklaag bezwijkt waarbij de horizontale scheur in het aansluitvlak zich voortzet tot het einde van de koppelwapening en daarna verticaal omhoog loopt en de tralieligger uit de breedplaat wordt getrokken. Zie foto 17 en foto 18 hierna.



foto 17 Bezwijken door vloeien van staal van de koppelwapening (proefstuk 42 - R2)

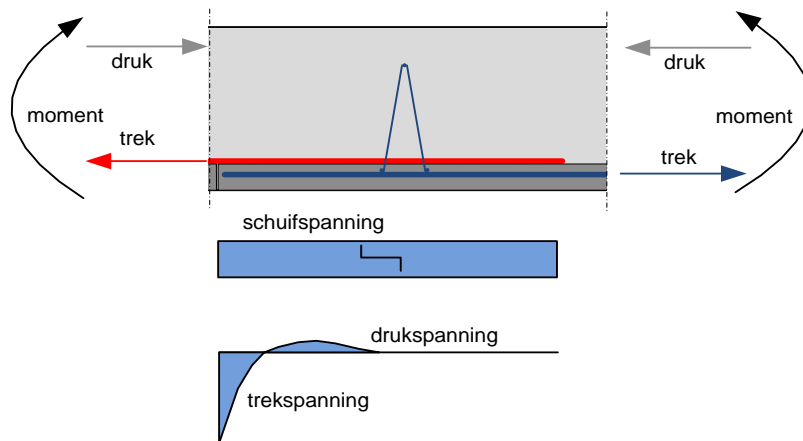


foto 18 Bezwijken door het door het onthechten van het aansluitvlak (proefstuk 24 - T2)

Een uitzondering op dit bezwijken is gevonden bij proefstuk 47 – ZR1 waarbij na het ontstaan van een verticale buigscheur in de druklaag ter plaatse van de tralieligger de tralieligger en de koppelwapening uit de druklaag zijn getrokken. Hierbij is de verankering van de koppelwapening in de druklaag maatgevend geweest.

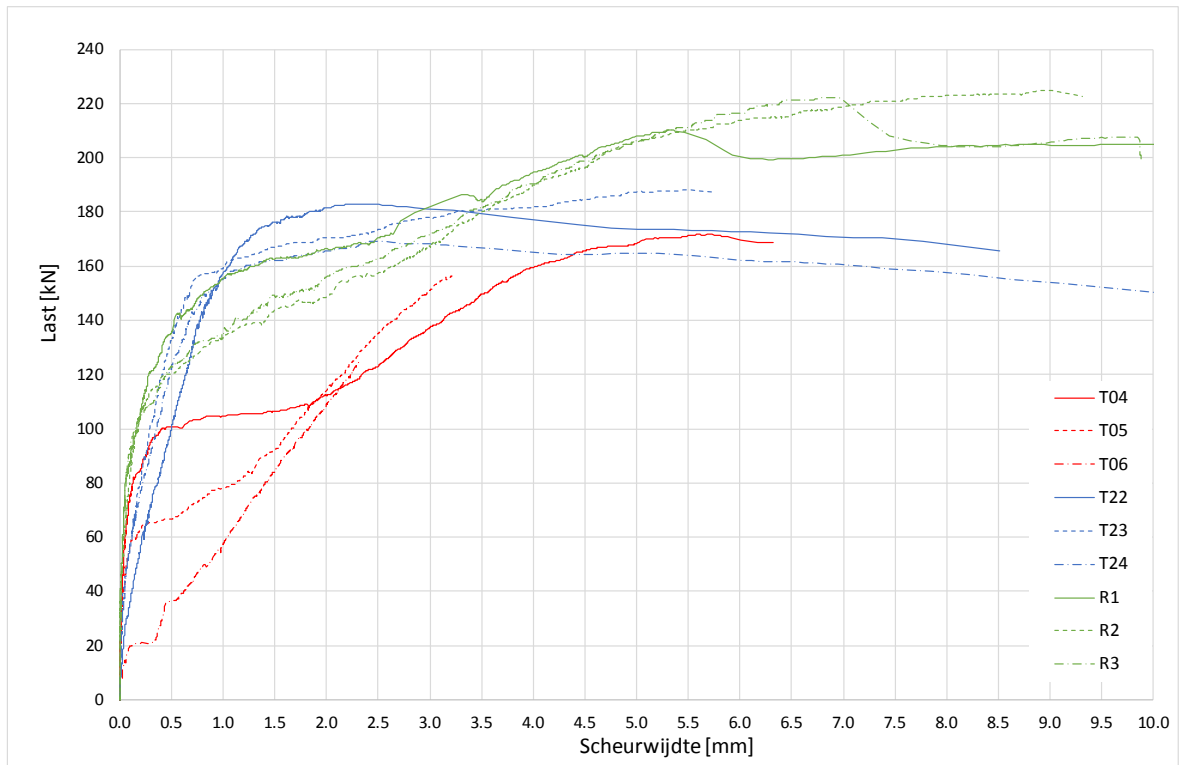
Voorafgaand aan het bezwijken van de proefstukken ontstaat er bij de proefstukken zonder gewichtsbesparende elementen, een horizontale scheur in het aansluitvlak. In het aansluitvlak treden

schuifspanningen op ten gevolge van het overdragen van de trekkracht vanuit de onderzijde van de druklaag naar de breedplaat en trek- en drukspanningen ten gevolge van het opleggen van de kromming die de druklaag ondergaat, aan de breedplaat, zie figuur 38.



figuur 38 Spanningen in het aansluitvlak

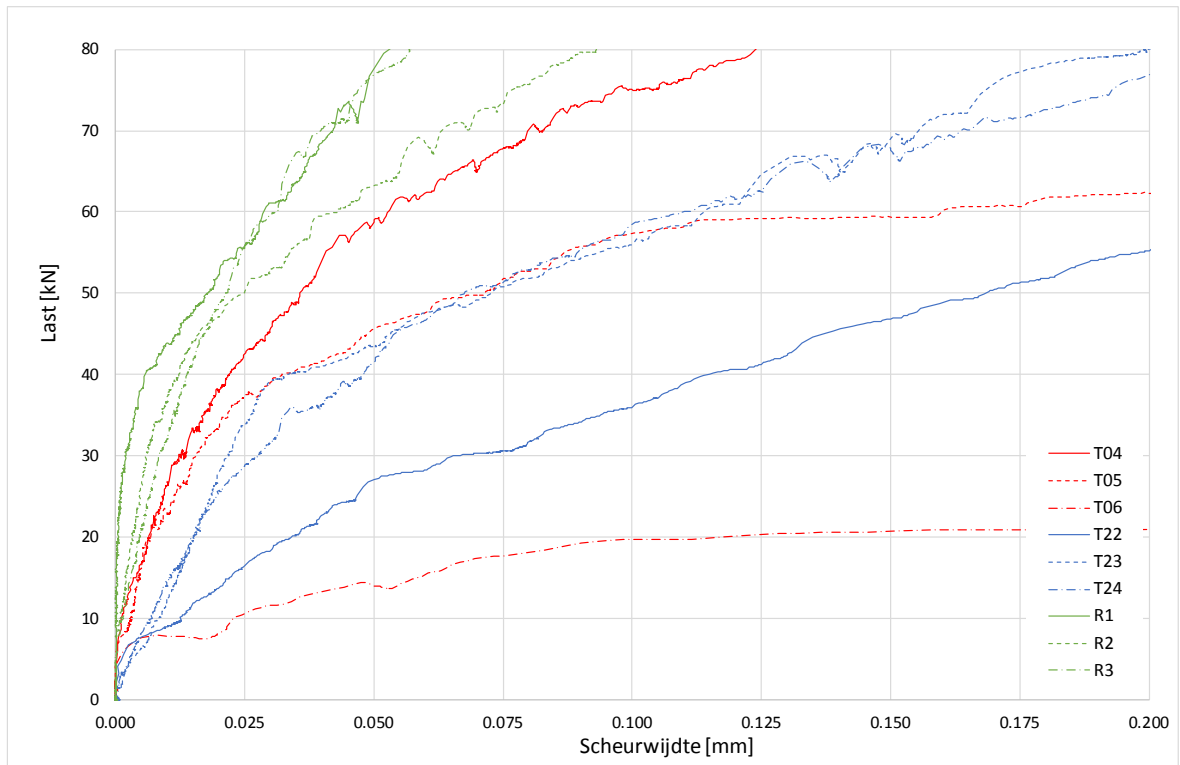
Het moment waarop de scheur ontstaat, wordt bepaald door de hechtsterkte in het aansluitvlak. In figuur 39 is voor 9 proefstukken van de Betonhuis-serie de relatie tussen de scheurwijdte in het aansluitvlak, gemeten op 50 mm vanaf de naad, en de kracht in de vijzel getoond. De getoonde waarde is de grootste waarde van de gemiddelde scheurwijdte die aan de linker- en rechterzijde van de naad op 50 mm afstand van de naad zijn gemeten. Alle getoonde proefstukken hebben 7Ø16 als koppelwapening. De proefstukken T04 t/m T06 (T04T06) en T22 t/m T24 (T22T24) hebben breedplaten van traditioneel beton die niet zijn opgeruwd. Bij de proefstukken R1 t/m R3 is de bovenzijde van het beton opgeruwd. Bij proefstukken T22T24 is de eerste tralieligger op 100 mm vanaf de naad aangebracht. Bij de overige proefstukken bevindt de eerste tralieligger zich op 400 mm vanaf de naad. Bij proefstuk R1R3 is de diepte van de tralieligger 35 mm, terwijl dit bij de overige proefstukken 25 mm is.



figuur 39 Ontwikkeling van de scheurwijdte op 50 mm vanaf de naad bij 9 verschillende proefstukken

Het blijkt dat bij de proefstukken T04-T06 de scheurwijdte van het aansluitvlak snel toeneemt, daarbij neemt de weerstand van het proefstuk ook toe. Dit totdat bezwijken optreedt als de horizontale scheur zich verder doorzet tot voorbij de tralieligger.

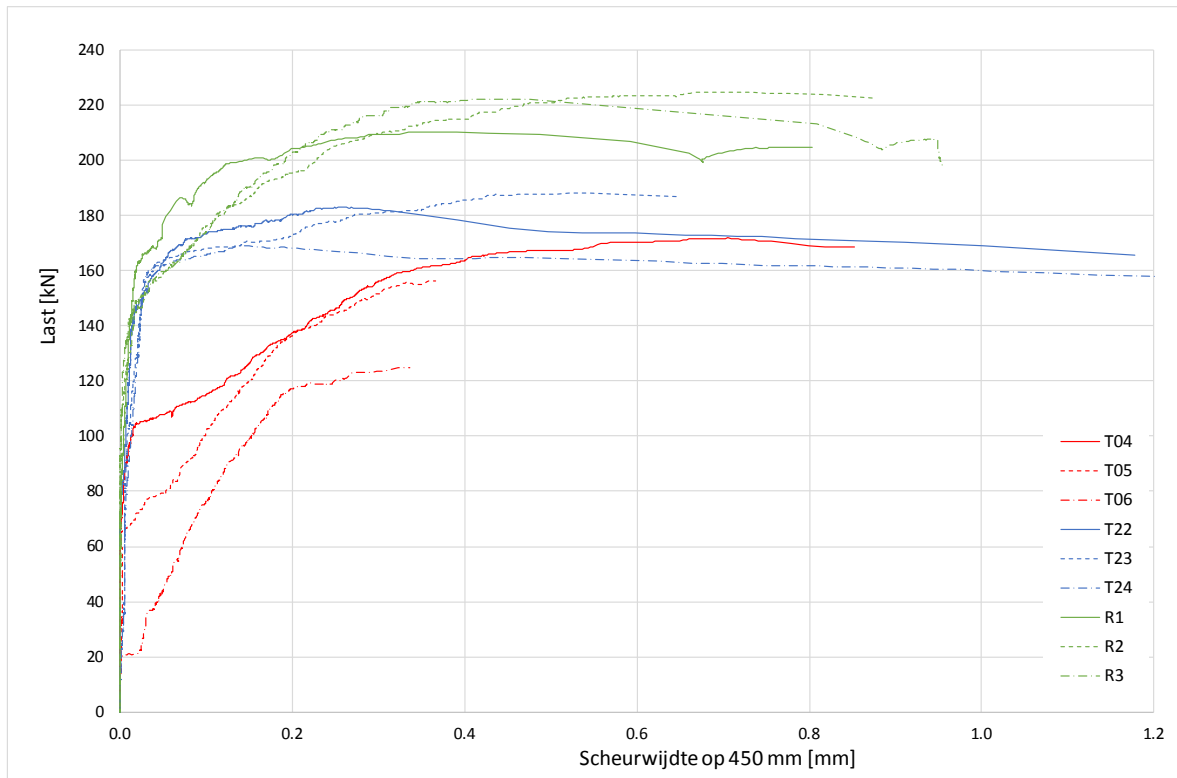
Bij proefstukken T22-T24 ontstaat de scheur in het aansluitvlak ook relatief snel. Dit is zichtbaar in figuur 40, waarin een detail van figuur 39 met kleine scheurwijdten is getoond. Door de aanwezigheid van de tralieligger dichtbij de naad wordt de grootte van de scheurwijdte bij een toename van de belasting beperkt gehouden. Uiteindelijk wordt bij de maximale weerstand de tralieligger uit de breedplaat getrokken en treedt het bezwijken van het aansluitvlak op.



figuur 40 Ontwikkeling van de scheurwijdte op 50 mm vanaf de naad bij 9 verschillende proefstukken, detail van figuur 39

Bij proefstuk R1R3, met het opgeruwde oppervlak, is de hechting in het aansluitvlak beter. Dit blijkt uit figuur 40 waarin zichtbaar is dat in het begin van de proef de scheurwijdten bij de R1R3 proefstukken significant kleiner zijn dan bij de andere zes proefstukken.

Geconcludeerd moet worden dat afhankelijk van de hechtsterkte van het aansluitvlak reeds spoedig een scheur kan ontstaan in het aansluitvlak die zich doorzet tot de eerste tralieligger. De functionaliteit van de tralieligger beperkt dan het verder doorlopen van de scheur. In figuur 41 is de ontwikkeling van de scheurwijdte zichtbaar op een afstand van 450 mm vanaf de naad, het gebied waar bij de proefstukken T04T06 en R1R3 de eerste tralieligger aanwezig is. De grootte van de scheurwijdte op het moment dat bezwijken optreedt is hier veel kleiner dan nabij de naad tussen de breedplaten, deze zijn hier in de orde grootte van maximaal 1 mm tegen 10 mm nabij de naad.

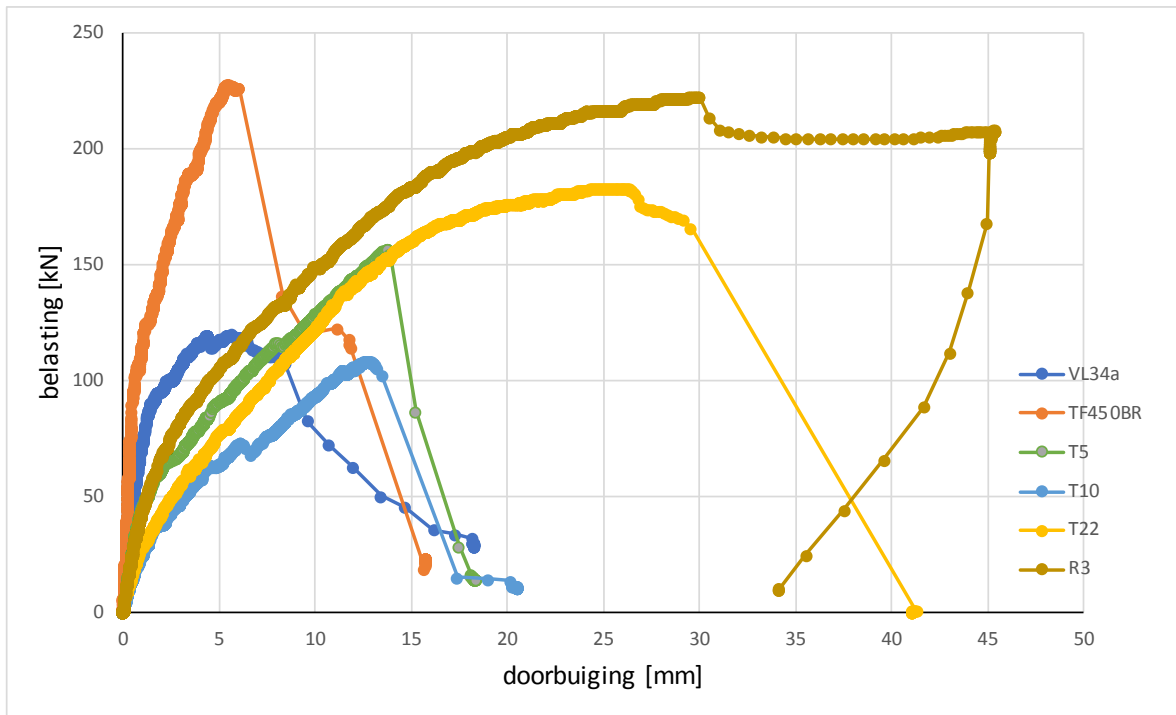


figuur 41 Ontwikkeling van de scheurwijdte op 450 mm vanaf de naad bij 9 verschillende proefstukken

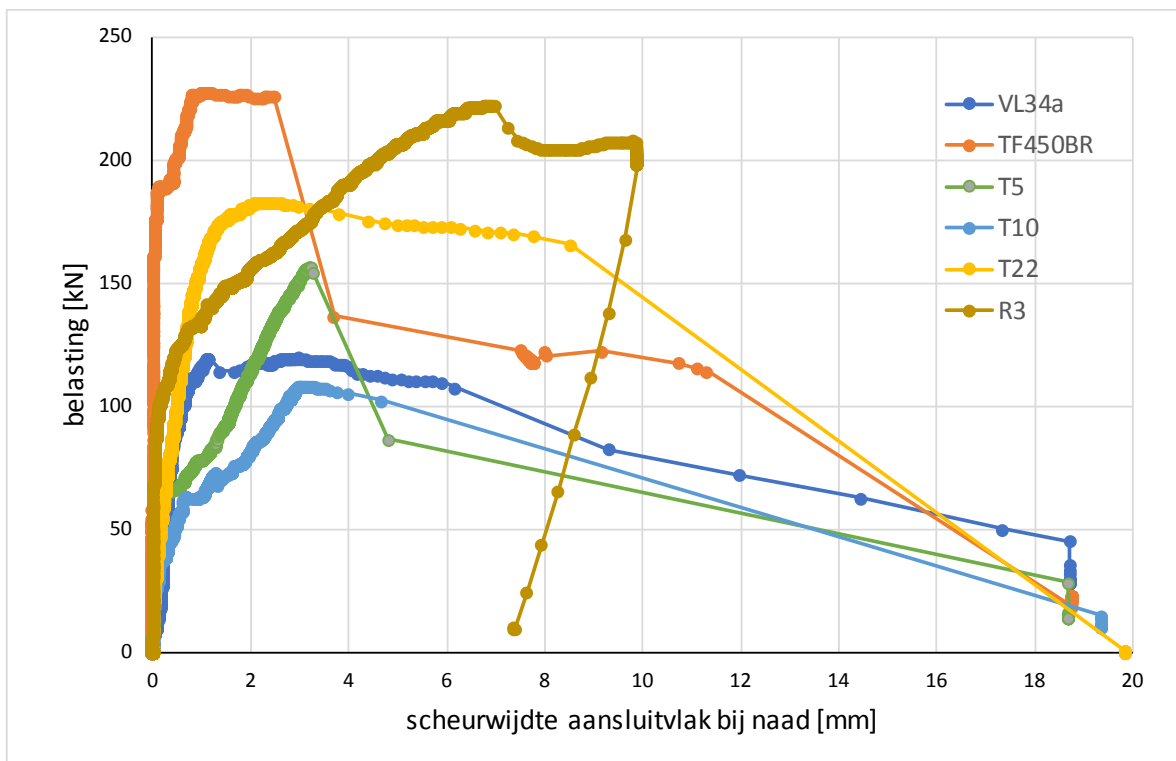
Door het ontstaan van de scheur met een forse wijdte in het deel van het aansluitvlak tussen de naad en de eerste tralieligger zal er over dat gebied vanuit de druklaag geen significante krachtoverdracht naar de breedplaat kunnen plaatsvinden. Het is daarom slechts mogelijk om de koppelwapening te verankeren vanaf het hart van de eerste tralieligger die de breedplaat met de druklaag verbindt. Dit strookt volledig met een aanbeveling van Weglarzy [25] die op basis van [33] ook stelt dat de verankering van de koppelstaven gerekend moet worden vanaf de eerste tralieligger.

Er is sprake van een groot verschil in hechtsterkte van het aansluitvlak tussen de diverse proefstukken. Bij de proefstukken van het 'Eindhoven Airport onderzoek' was de hechting bijvoorbeeld beperkt en ontstond, gelijk aan de proefstukken T04-T06 die hiervoor zijn beschreven, de scheur in het aansluitvlak relatief snel. Daarentegen is de hechtsterkte bij de Taskforce proefstukken relatief hoog, zelfs zo hoog dat de weerstand van het proefstuk gebaseerd op de hechting in het aansluitvlak voor de eerste tralieligger, hoger is dan de uiteindelijke bezwijkweerstand waarbij de tralieligger uit de breedplaat wordt getrokken en het finale bezwijken optreedt.

In figuur 42 en figuur 43 zijn voor 6 verschillende proeven, waarbij ook deels een verschillend bezwijkgedrag is opgetreden, de verhouding gegeven tussen de uitgeoefende last in één vijzel en respectievelijk de doorbuiging en de grootste scheurwijdte in het aansluitvlak nabij de naad tussen de twee breedplaten.



figuur 42 De doorbuiging van 6 verschillende proefstukken



figuur 43 Ontwikkeling van de scheurwijdte op 50 mm vanaf de naad van 6 verschillende proefstukken

De proefstukken VL34a en TF450BR hebben beide een hoogte van 450 mm terwijl de overige 4 getoonde proefstukken een hoogte van 300 mm hebben.

Proefstuk VL34a is een proefstuk van het Eindhoven Airport onderzoek, dit bezwijkt doordat de scheur in het aansluitvlak snel ontstaat, toeneemt in breedte waarna het proefstuk bezwijkt door het uittrekken van de tralieligger uit de breedplaat. Hetzelfde gedrag is waargenomen bij proefstuk T5, en T10, proefstukken van de Betonhuis-serie met Ø16 koppelwapening, waarbij de koppelwapening van proefstuk T10 relatief kort is. Bij proefstuk T22, tralieligger bij de rand, is toename van de scheurwijdte in het aansluitvlak beperkt door de nabij de naad aanwezige tralieliggers.

Bij proefstuk TF450BR is het gedrag afwijkend, Hierbij wordt eerst bij een beperkte scheurwijdte in het aansluitvlak een grotere weerstand gevonden, waarna de weerstand van het proefstuk terugvalt tot het niveau van proefstuk VL34a. Bezwijken treedt op als de tralieligger uit de breedplaat wordt getrokken. Tenzij anders wordt vermeld, wordt hierna bij dit bezwijkgedrag uitgegaan van de ductiele weerstand zoals beschreven in paragraaf 4.6.

Bij proefstuk R3, een proefstuk uit de Betonhuis-serie met een ruw breedplaatoppervlak ontstaat ook een scheur in het aansluitvlak maar treedt bezwijken op als de koppelwapening gaat vloeien.

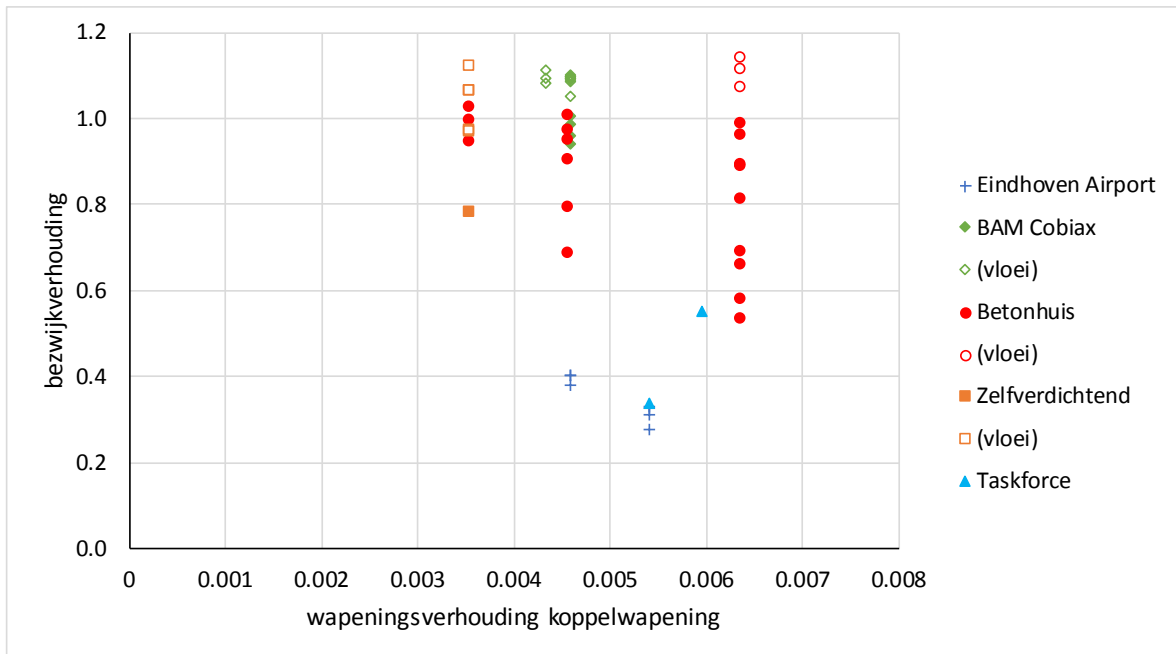
Uit figuur 42 blijkt dat de vervormingscapaciteit van proefstuk R3, waarbij vloeien van de koppelwapening optreedt groter is dan dat van de overige proefstukken. Van de overige proefstukken heeft proefstuk T22, waarbij een tralieligger bij de rand is geplaatst de grootste vervormingscapaciteit.

5.3 Bezwijken door vloeien van de koppelwapening

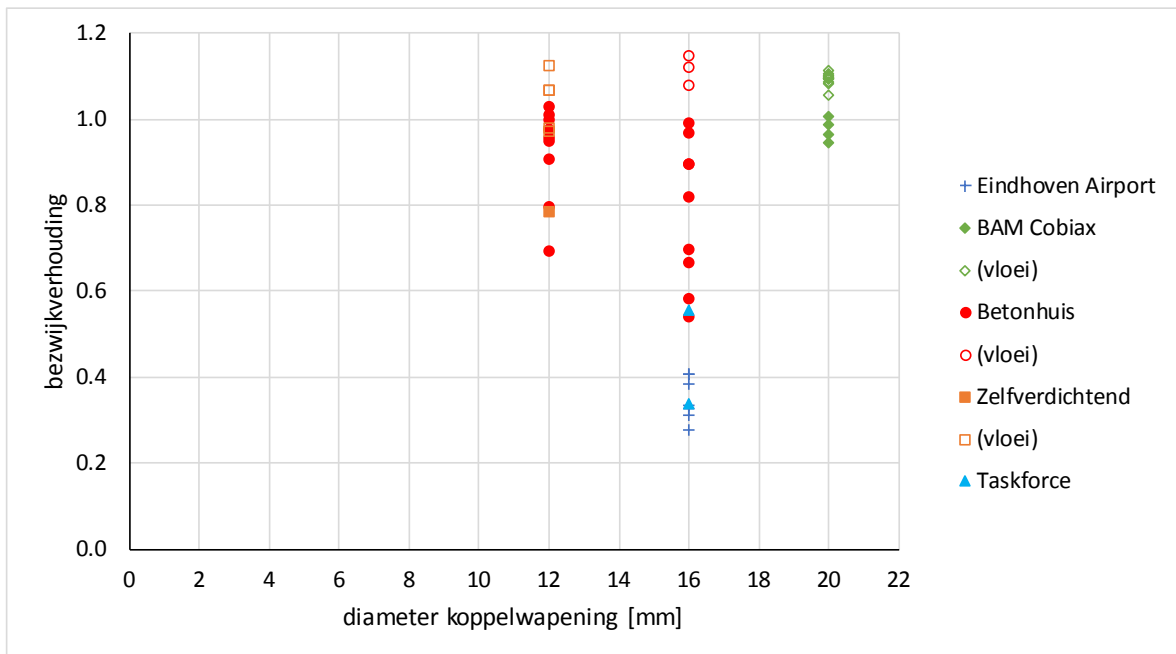
Het bezwijken door het vloeien van de koppelwapening is het mechanisme dat bij een regulier ontwerp van de vloer reeds beschouwd is. Hiervoor kunnen de rekenregels die in NEN-EN 1992-1-1 (Eurocode 2) zijn beschreven worden gebruikt.

Ter illustratie is hierna in figuur 44 de relatie tussen bezwijkverhouding en de wapeningsverhouding van de koppelwapening in de druklaag [$\rho = A_{s,koppel}/(d_{koppel} \times b)$] getoond. In figuur 45 is hetzelfde gedaan voor de diameter van de koppelwapening.

Daar waar bezwijken is ontstaan door vloeien van de koppelwapening is dit aangegeven door een marker zonder 'vulkleur'.



figuur 44 Relatie tussen de wapeningsverhouding van de koppelwapening en de bezwijkverhouding voor de uitgevoerde experimenten



figuur 45 Relatie tussen de diameter van de koppelwapening en de bezwijkverhouding voor de uitgevoerde experimenten

Uit de figuren blijkt dat vloeien van de koppelwapening dan wel bezwijken van het aansluitvlak optreedt bij alle beproefde wapeningsverhoudingen en staafdiameters.

5.4 Bezwijken door onvoldoende verankering van de koppelwapening

Voor het beschouwen van de verankering van de koppelwapening in de druklaag bij de beschikbare proefstukken wordt de volgende werkwijze gevolgd.

De beschikbare verankeringslengte is gelijk aan de lengte van de koppelwapening, gemeten vanaf de naad, minus de afstand tussen het hart van de eerste tralieligger en de naad.

Voor het bepalen van de benodigde verankeringslengte wordt uitgegaan van de benadering in artikel 8.4 van NEN-EN 1992-1-1. Daarbij volgt de aanhechtsterkte uit:

$$f_b = 2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctm} \quad (3)$$

waarin:

f_b is de aanhechtsterkte;

η_1 is een coëfficiënt om de aanhechtomstandigheden te beschrijven;

η_2 is een coëfficiënt die een mindere aanhechting omschrijft bij staven met een diameter groter dan 32 mm;

f_{ctm} is de gemiddelde treksterkte van het beton van de druklaag.

De waarde van η_1 is gelijk aan 1,0 als er sprake is van, of aangetoond kan worden dat er goede aanhechtomstandigheden zijn. Vooralsnog wordt hierna, hoewel met uitzondering van de BAM-Cobiast serie, bij alle proefstukken de koppelstaven direct op de breedplaat zijn geplaatst uitgegaan van 1,0.

De grootste diameter van de koppelwapening die bij de experimenten is gebruikt, is 20 mm. Voor η_2 kan daarom 1,0 worden aangehouden.

De waarde van de gemiddelde treksterkte is volgens tabel 3.1 van NEN-EN 1992-1-1 gekoppeld aan de cilinderdruksterkte van het beton. Uit de experimenten zijn de gemiddelde kubusdruksterkten bekend. Voor het beoordelen van de experimentele resultaten wordt de volgende relatie tussen de gemiddelde kubusdruksterkte en de cilinderdruksterkte aangehouden:

$$\text{de gemiddelde cilinder druksterkte} \quad f_{cm} = 3 \text{ MPa} + 0,851 f_{cm,cube} \quad (4)$$

$$\text{de karakteristieke cilinderdruksterkte: } f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad (5)$$

Hierbij is mede op basis van NEN-EN 206 aangehouden dat $f_{ck,cube} = f_{cm,cube} - 4 \text{ MPa}$.

De basisverankeringslengte volgt nu uit:

$$l_{b,reqd} = \frac{\emptyset f_y}{4 f_b} \quad (6)$$

waarin:

$l_{b,reqd}$ is de basisverankeringslengte

\emptyset is de diameter van de staven van de koppelwapening

f_y is de aangehouden vloeigrens van het betonstaal;
= 550 MPa

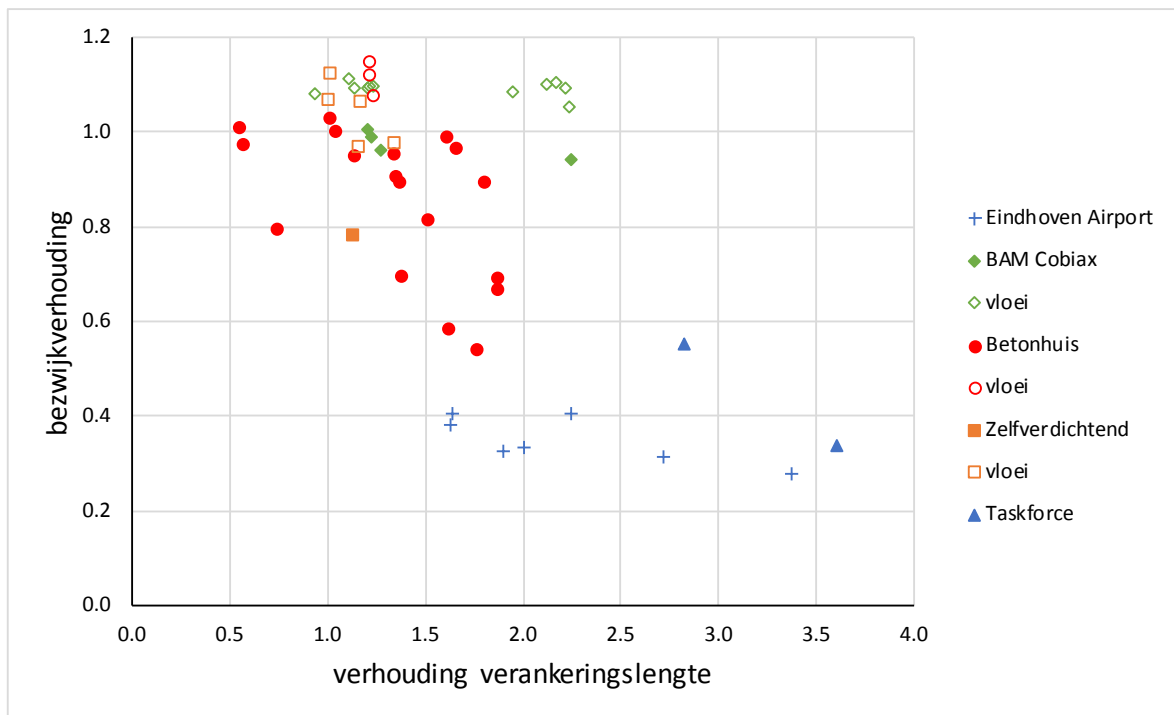
f_b is de aanhechtsterkte.

De basisverankeringslengte kan nog gereduceerd worden met diverse α_i variabelen, zie tabel 8.2 van NEN-EN 1992-1-1. Hierna is vooralsnog aangenomen dat deze variabelen alle een waarde hebben van 1,0. Als wordt uitgegaan van een waarde voor f_y van 550 MPa, dan dient bij het beoorde-

len van de verankeringslengte van de koppelstaven in de proeven, om de feitelijke maximale staalspanning te beschouwen de basisverankeringslengte nog vermenigvuldigd te worden met de bezwijkverhouding.

$$l_b = \text{bezwijkverhouding} \frac{\varnothing f_y}{4 f_b} \quad (7)$$

Hierna is in figuur 46 voor de verschillende proefstukken de verhouding tussen de aanwezige verankeringslengte en de benodigde verankeringslengte om de in de koppelwapening van het proefstuk de tijdens de proef optredende maximale spanningen te kunnen weerstaan, uitgezet tegen de bezwijkverhouding. Daarbij is uitgegaan van de gemiddelde aanhechtsterkte, afgeleid van de druksterkte van het beton van de druklaag.



figuur 46 Relatie tussen de verhouding van de verankeringslengten en de bezwijkverhouding voor de uitgevoerde experimenten

De drie proefstukken waarbij de verhouding voor de verankeringslengte kleiner is dan 1,0 zijn de proefstukken 35, 36 en 37 (T19T21) waarbij de gemiddelde kubusdruksterkte van het beton van de druklaag gelijk was aan circa 17,5 MPa. Deze proefstukken zijn bezweken door het doorzetten van de horizontale scheurvorming in het aansluitvlak en het uittrekken van de tralieligger uit de breedplaat. Bij deze proefstukken is, hoewel de feitelijk aanwezige verankeringslengte van 300 mm slechts circa 60% was van hetgeen benodigd is, geen uittrekken van de koppelwapeningsstaven aangetroffen.

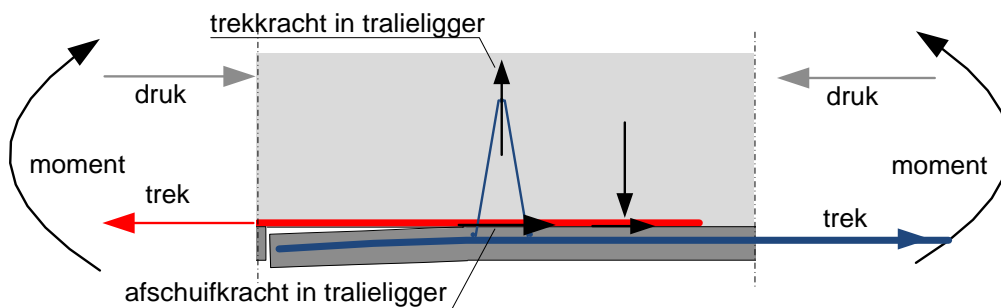
Bij proefstuk 47 (ZR1), waar het uittrekken van de tralieligger uit de druklaag en de koppelwapening is geconstateerd is de aanwezige verankeringslengte gelijk aan 250 mm terwijl de benodigde verankeringslengte 221 mm zou moeten zijn om de optredende spanning te kunnen weerstaan. Het is daarom aannemelijk dat het bezwijken hier vooral is ingegeven doordat ter plaatse van de tralie-

ligger een buigtrekscheur in de druklaag is ontstaan waarna de verankeringscapaciteit van de tralieligger in de druklaag verminderd is. Bij dit proefstuk zijn, zoals vermeld ter plaatse van de scheur ook enkele koppelwapeningsstaven gebroken.

5.5 Het bezwijken van het aansluitvlak

5.5.1 Inleiding

Bij het bezwijken van het aansluitvlak na het ontstaan van een scheur die doorloopt tot de eerste tralieligger zijn de eigenschappen van de tralieligger, zoals zijn verankeringscapaciteit in de breedplaat, en de eigenschappen van het aansluitvlak bepalend. In de tralieligger zal een trekkracht ontstaan die nodig is om de breedplaat, die initieel niet gekromd is, naar de door het aanwezige moment gekromde druklaag te trekken. Deze trekkracht zal evenwicht maken met een drukkracht tussen de druklaag en de breedplaat op een bepaalde afstand vanaf de tralieligger, zie figuur 47. Daarnaast zal de tralieligger en het door de tralieligger omsloten beton een deel van de afschuifkracht tussen de druklaag en de breedplaat overdragen. Een ander deel zal overgedragen worden in het niet gescheurde aansluitvlak achter de tralieligger.

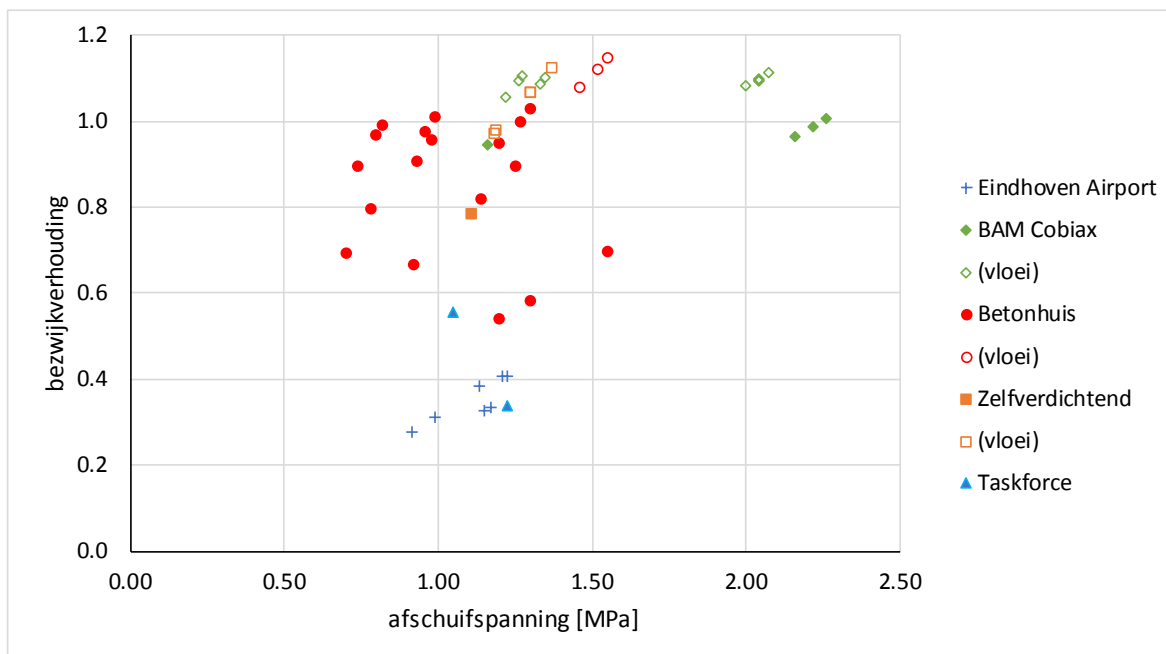


figuur 47 Krachtwerking bij het bezwijken van het aansluitvlak

Getracht is om dit gedrag te beschrijven met een eindig elementen model en op die wijze inzicht te krijgen in de grootte van de trekkracht in de tralieligger en de wijze waarop de afschuifkracht over de tralieligger en het aansluitvlak verdeeld wordt. Op dit moment is dit model nog onvoldoende in staat om het gedrag, dat bij de experimenten gevonden is, goed te beschrijven.

Voor het opstellen van een rekenregel voor het beoordelen van het bezwijken van het aansluitvlak is in figuur 48 eerst de grootte van de afschuifspanning uitgezet tegen de bezwijkverhouding. De afschuifspanning is bepaald door de trekkracht in de wapening in de breedplaat, ter plaatse van het einde van de koppelwapening te delen door het oppervlak gelijk aan de breedte van het proefstuk en de lengte van de koppelwapening achter de eerste tralieligger. Het oppervlak is hierbij vermindert door eventueel aanwezige gewichtsbesparende voorzieningen. Uit de grafiek blijkt dat het bezwijken van het aansluitvlak optreedt bij grote variatie van afschuifspanningen, namelijk tussen 0,70 en 2,26 MPa. De lage waarde van de afschuifspanning op het moment van bezwijken is vooral aanwezig in de proeven van de Betonhuis-serie.

Hoge waarden voor de afschuifspanning worden gevonden bij de BAM-Cobix serie. Bij die serie wordt het oppervlak van het aansluitvlak significant verkleind door de aanwezige bollen.



figuur 48 Relatie tussen de afschuifspanning en de bezwijkverhouding voor de uitgevoerde experimenten

Als de afschuifspanningen uit figuur 48 worden vergeleken met de initiële schuifsterkte τ_0 , zie tabel 14, dan blijkt dat de spanningen waarbij het bezwijken van het aansluitvlak optreedt significant kleiner zijn dan de bij de directe afschuifproeven bepaalde sterkte.

Hierna worden twee situaties nader beschouwd:

- het bezwijken van het aansluitvlak bij een relatief stijf gedrag, zoals bijvoorbeeld gevonden wordt bij proefstuk TF450BR voordat de weerstand terugvalt tot het ‘ductiele bezwijkniveau’
- het bezwijken van het aansluitvlak door het uittrekken van de tralieligger.

Deze twee situaties worden hierna achtereenvolgens beschouwd.

5.5.2 Afschuifsterkte aansluitvlak breedplaat aan ter plaatse gestort beton

Een van de mogelijkheden om de optredende kracht in de koppelstaven over te dragen naar de aanwezige wapening in de breedplaat is via de in het aansluitvlak aanwezige schuifsterkte. Dit mechanismen heeft een sterke link met het bezwijken van het aansluitvlak door het uittrekken van de tralieligger dat hierna wordt beschreven. Uit de uitgevoerde proeven is niet altijd eenduidig af te leiden of de capaciteit nu bepaald wordt door uittrekken van de tralieligger of dat het overschrijden van de maximale afschuifcapaciteit van de doorsnede maatgevend was. In de toetsingsregels voor de afschuifcapaciteit is in het algemeen ook een bijdrage van de aanwezige tralies opgenomen. Voor de afschuifcapaciteit is het aannemelijk dat vanaf een bepaalde scheurwijdte in het aansluitvlak er geen schuifkracht meer overgedragen kan worden of dat in ieder geval de capaciteit dermate afneemt dat zonder alternatief draagmechanisme de constructie faalt. Tot het bereiken van dit punt is er echter een krachtsafdracht via het aansluitvlak mogelijk. Op basis van de uitgevoerde proeven is gekeken naar het hiervoor meest geschikte sterktemodel.

Op basis van de beschikbare proefresultaten is gekeken hoe de bestaande rekenmodellen voor de afschuifcapaciteit van op verschillende tijdstippen gestort beton toegepast kunnen worden voor deze specifieke situatie. Uit de achtergronden van de in de normen opgenomen rekenregels [34] volgt dat de daar gegeven rekenwaarden in de regel als zeer conservatief worden gezien voor vele toepassingen. Maar tevens moet geconstateerd worden dat de rekenregels niet zijn opgesteld voor de hier gegeven situatie met relatief grote krommingen in het aansluitvlak en grote over te brengen schuifkrachten inclusief mogelijk trekkrachten door het afpeleffect loodrecht op het aansluitvlak.

Dit in ogenschouw nemend is gekeken hoe op basis van de bestaande normen en regelgeving een voorspelling van de aanwezige afschuifcapaciteit gemaakt kan worden. Deze kan vervolgens weer worden vertaald naar een maximaal door de koppelwapening op te nemen trekkracht.

In artikel 6.2.5 van NEN-EN 1992-1-1 zijn toetsingsregels gegeven voor de aansluitvlakken van op verschillende tijdstippen gestort beton. Deze zijn met name opgesteld voor het toetsen van de schuifspanningsoverdracht in gebieden met hoge dwarskrachten en weinig tot geen buiging.

De capaciteit, uitgedrukt in schuifspanning $v_{Rd,i}$, wordt daarbij bepaald volgens vergelijking (6.25) van NEN-EN 1992-1-1:

$$v_{Rd,i} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 v f_{cd} \quad (8)$$

Hierbij zijn de volgende componenten te onderscheiden in de capaciteitsbijdrage:

- $c f_{ctd}$ is adhesie (aanhechting ter plaatse gestort beton aan breedplaat)
- $\mu \sigma_n$ is frictie door externe normaalkrachten loodrecht op het aansluitvlak
- $\rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)$ is frictie door optredende normaalkrachten in betonstaal welke in het aansluitvlak aanwezig is (hier met name de poten van de tralieliggers)

De parameters c en μ zijn daarbij afhankelijk van de ruwheid van het aansluitvlak.

De door NEN-EN 1992-1-1 voorgestelde vergelijking is een combinatie van bros en plastisch gedrag. De voor beide mechanismen benodigde vervorming zijn niet gelijk en zodoende is het model minder representatief voor het werkelijke gedrag van de constructie. De combinatie is gevalideerd voor een beperkt toepassingsgebied. Wat dit toepassingsgebied is, is niet aangegeven. Voor Model-Code 2010 en bij de voorstellen voor de revisie van NEN-EN 1992-1-1 (rev.EN1992 – D3) is deze beperking van het model onderkend en is daarom een afwijkende aanpak gegeven. Voor breedplaatvloeren zijn de aanpakken vergeleken en bleken de voorspellingen op basis van rev.EN1992 - D3 goed toepasbaar op de hier beschouwde aansluiting in breedplaatvloeren. Deze is zodoende hier verder uitgewerkt.

In rev.EN1992 - D3 wordt voor het aansluitvlak van op verschillende tijdstippen gestort beton onderscheid gemaakt tussen:

- aansluitvlakken zonder of met voldoende verankerde kruisende wapening (verg. 8.55)
- aansluitvlakken doorsneden door wapening of deuvells met onvoldoende verankering (verg. 8.56)

Beide vergelijkingen zijn hierna gegeven:

$$\text{verg 8.55} \quad \tau_{Rdi} = c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_C} + \mu_v \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu_v \sin \alpha + \cos \alpha) \leq v f_{cd} \quad (9)$$

$$\text{verg 8.56} \quad \tau_{Rdi} = c_{v2} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_C} + \mu_v \sigma_n + k_t \rho f_{yd} + k_f \rho \sqrt{f_{yd} f_{cd}} \quad (10)$$

Bij deze vergelijkingen behoren de in tabel 15 gegeven waarden voor de diverse factoren.

tabel 15 Factoren bij vergelijkingen 8.55 en 8.56 (vergelijking (9) en (10))

Oppervlakte ruwheid	c_{v1}	μ_v	c_{v2}	k_t	k_f
erg ruw $R_t \geq 3,0$ mm	0,19	0,9	0,15	0,15	0,5
ruw $R_t \geq 1,5$ mm	0,15	0,7	0,7	0,5	0,9
glad	0,075	0,6	0	0,5	1,1
erg glad	0,0095	0,5	0	0	1,5

Bij vergelijking 8.55 wordt uitgegaan van een aandeel door adhesie en een aandeel door scheurwrijving door normaalkracht en/of ondersteund door wapeningstaal. Bij vergelijking 8.56 wordt uitgegaan van een lager aandeel adhesie en scheurwrijving in combinatie met een aandeel door deuwelwerking van het wapeningsstaal dat het aansluitvlak doorkruist.

Als gekeken wordt naar rev.EN1992 Versie D3 lijkt het voor de hand te liggen om uit te gaan van het daarin gegeven model voor aansluitvlakken met onvoldoende verankerde verticale wapening. Dit daar de koppelwapening niet lijkt te voldoen aan de eisen voor de verankeringslengte. Dat betekent het toepassen van vergelijking 8.56 (10). Toepassing hiervan laat echter zien dat er een grote spreiding wordt gevonden in de verhouding $F_{\text{model}}/F_{\text{proef}}$.

In de uitgevoerde analyse van de proefresultaten is in eerste instantie ervan uitgegaan dat het in de proeven gemeten maximale belastingsniveau gelijk is aan het niveau waarop krachtoverdracht door afschuiving in het aansluitvlak maximaal is. Bij de proeven waarin de koppelwapening niet tot vloeien belast kon worden, vertonen de geregistreerde scheurwijdten bij de meetpunten nabij de tralieligger vaak een forsere toename bij een lager belastingsniveau. Dit kan erop duiden dat de wijze waarop de optredende schuifkracht wordt overgedragen tussen de druklaag naar de breedplaat verandert. In [35] wordt omschreven dat al naar gelang de oppervlakte eigenschappen (glad, ruw etc) er bij een bepaalde kracht ($F_{\text{max}1}$, in figuur 49) sprake is van een verandering van het optredende mechanisme. Voor de analyse van de in de normen gegeven vergelijking is volgens [35] steeds uitgegaan van de eerste piek zoals aangegeven in figuur 49. Uit de figuur is ook op te maken dat het draagvermogen niet geheel wegvalt maar dat deze zelfs langzaam nog toe kan nemen. Dit wordt in de ModelCode 2010 en NEN-EN 1992-1-1 niet meegenomen hetgeen gezien de benodigde vervormingen terecht is. Dit maakt wel dat een ander mechanisme, zoals een grotere bijdrage van de tralieligger leidend tot het uittrekken van de tralieligger uit het beton, zich in kan gaan stellen. Hetgeen ook bij de proeven in meerdere gevallen waargenomen is.

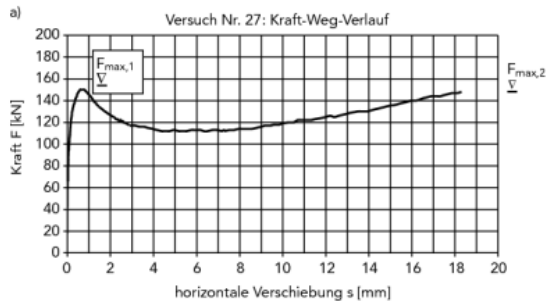
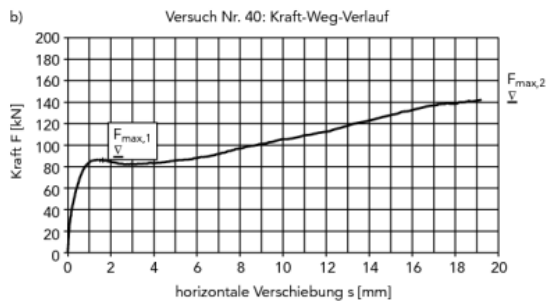


Bild 5 Last-Verschiebungsdiagramme bei rauen Fugen. a) HDW-gestrahlt (Fugenbewehrung 2 ∅ 12, Setztiefe $\ell_b = 17 \text{ } \varnothing$, $A_c = 300 \text{ cm}^2$, $\rho = 0,75 \%$, $f_{cwm} = 42 \text{ N/mm}^2$); b) Sandgestrahlt (Fugenbewehrung 2 ∅ 12, Setztiefe $\ell_b = 17 \text{ } \varnothing$, $A_c = 228 \text{ cm}^2$, $\rho = 0,99 \%$, $f_{cwm} = 44 \text{ N/mm}^2$)
Fig. 5 Load-displacement diagrams for rough interfaces. a) Water-jetted (joint reinforcement: 2 ∅ 12, anchorage depth $\ell_b = 17 \text{ } \varnothing$, $A_c = 300 \text{ cm}^2$, $\rho = 0,75 \%$, $f_{cwm} = 42 \text{ N/mm}^2$); b) Sandblasted (joint reinforcement: 2 ∅ 12, anchorage depth $\ell_b = 17 \text{ } \varnothing$, $A_c = 228 \text{ cm}^2$, $\rho = 0,99 \%$, $f_{cwm} = 44 \text{ N/mm}^2$)



figuur 49 Kracht versus horizontale vervorming voor oppervlak met waterstralen (a) of zandstralen (b) [35]

In [35] wordt ook aangegeven dat de optredende scheurwijdte bij het bereiken van $F_{max,1}$ orde grootte 0,3 a 0,5 mm is. Een waarde die ook in de proeven teruggevonden wordt. Hierbij dient aangetekend te worden dat voor gladdere aansluitvlakken deze waarde in de regel lager zal zijn.

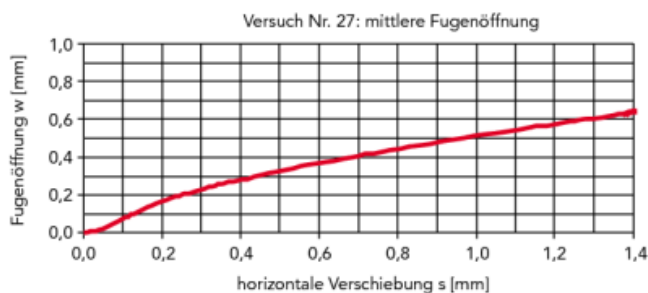


Bild 8 Fugenöffnung und Dehnung der Fugenbewehrung beim Versuch 27 (HDW-gestrahlt) (Fugenbewehrung: 2 ∅ 12, Setztiefe $\ell_b = 17 \text{ } \varnothing$, $A_c = 300 \text{ cm}^2$, $\rho = 0,75 \%$, $f_{cwm} = 42 \text{ N/mm}^2$)
Fig. 8 Crack opening and axial strains of joint reinforcement for specimen 27 (water-jetted) (joint reinforcement: 2 ∅ 12, anchorage depth $\ell_b = 17 \text{ } \varnothing$, $A_c = 300 \text{ cm}^2$, $\rho = 0,75 \%$, $f_{cwm} = 42 \text{ N/mm}^2$)

figuur 50 Voegopening versus horizontale verplaatsing [35]

Voor alle proefstukken met als geregistreerd faalmechanisme aansluiting/pull out is het punt bepaald waar naar alle waarschijnlijkheid voor scheurwrijving het maximale punt is bereikt, de hiervoor vastgestelde waarde is in bijlage A uitgedrukt als verhouding van de bezwijklast. Voor deze proefstukken is de vergelijking gemaakt met de voorspelde sterkte volgens de vergelijkingen en de gevonden sterkte in de proeven. Bij een aantal proeven waar vloeien van de wapening als maatgevend bezwijkmechanisme is vastgesteld, is bij een lager belastingniveau ook al het maximale punt bereikt voor scheurwrijving. Deze proeven zijn in de analyse dan ook meegenomen.

Uit deze analyse wordt opgemaakt dat voor het met vergelijking 8.55 van rev.EN1992 - D3, zie vergelijking (9), beschouwde faalmechanisme in de proeven blijktbaar de wapening voldoende verankerd was. Als men uitgaat van voldoende verankerde tralies voor het hier beschouwde mechanisme dan zou men gebruik kunnen maken van vergelijking (9).

Gegeven het feit dat in de proeven waarin vloeien van de wapening niet bereikt werd in de regel de afschuifcapaciteit bereikt wordt voordat de tralies uit het beton getrokken worden (zie volgende paragraaf) zou men kunnen stellen dat de tralies voor het hier beschouwde mechanisme voldoende verankerd zijn.

Hierbij wordt er geen rekening gehouden met de uvelwerking maar wel met normaalcrachtwrijving door de verticale wapening. De aanpak is vergelijkbaar met de huidige Eurocode. Voor de verschillende oppervlakte-eigenschappen gelden de waarden van tabel 16.

tabel 16 Coëfficiënten voor vergelijking (9)

Surface Roughness	c_{v1}	μ_v
Very rough $R_t \geq 3.0 \text{ mm}$	0,19	0,9
Rough $R_t \geq 1.5 \text{ mm}$	0,15	0,7
Smooth	0,075	0,6
Very smooth	0,0095	0,5

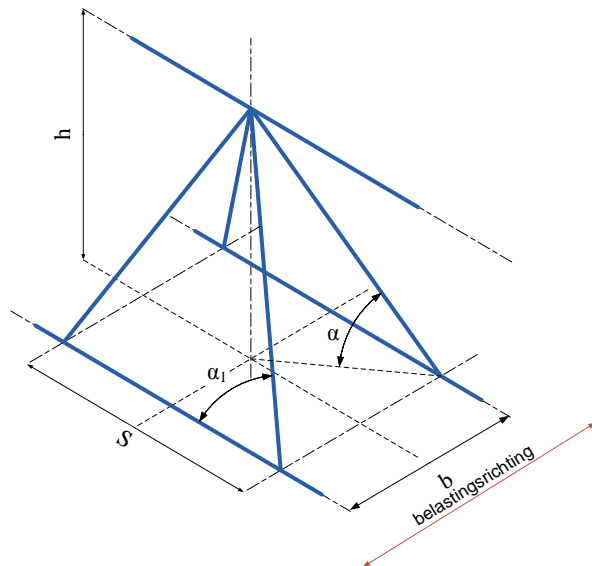
Opgemerkt wordt dat de waarden voor c_{v1} sterk af lijken te wijken van hetgeen er in NEN-EN1992-1-1 is beschreven. De waarden zijn echter anders omdat de wijze waarop de betonsterkte in rekening wordt gebracht is aangepast van de treksterkte naar een term gerelateerd aan de druksterkte. Het resultaat, de rekenwaarde van de toelaatbare schuifspanning is echter vergelijkbaar. Alleen voor “very smooth” is er niet meer gebruik gemaakt van een boven- en een ondergrens maar is alleen de ondergrens nog gegeven.

Voor de uiteindelijke vergelijking met de proeven is uitgegaan van de van vergelijking (9) afgeleide vergelijking:

$$\tau_{Rdi} = c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_C} + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha \quad (11)$$

Daar er geen normaalspanning wordt verwacht is $\mu_v \sigma_n$ gelijk aan 0 en daar in de proeven er altijd dubbelbenige symmetrische tralies aanwezig waren, kan in de bijdrage van de wapening aan de scheurwrijving de horizontaal component ($\cos \alpha$ in de vergelijking) gelijk aan 0 gesteld worden. Dit daar indien beide traliebenen op trek worden belast de beide resultanten elkaar tegenwerken en dus de bijdrage effectief gelijk aan 0 is.

Voor de hoek α moet de kleinste hoek van de diagonaalstaaf van de tralieligger met het aansluitvlak worden genomen, zie figuur 51, hetgeen bij het beschouwen van een langснаad, niet de hoek van de tralie in de richting van de maximale schuifkracht betreft. In het algemeen geeft de hoek α_1 die in figuur 51 is weergegeven, een voldoende nauwkeurige benadering van de hoek α .



figuur 51 Hoek α bij een tralieligger

Voor de bepaling van de aanwezige capaciteit is uitgegaan van:

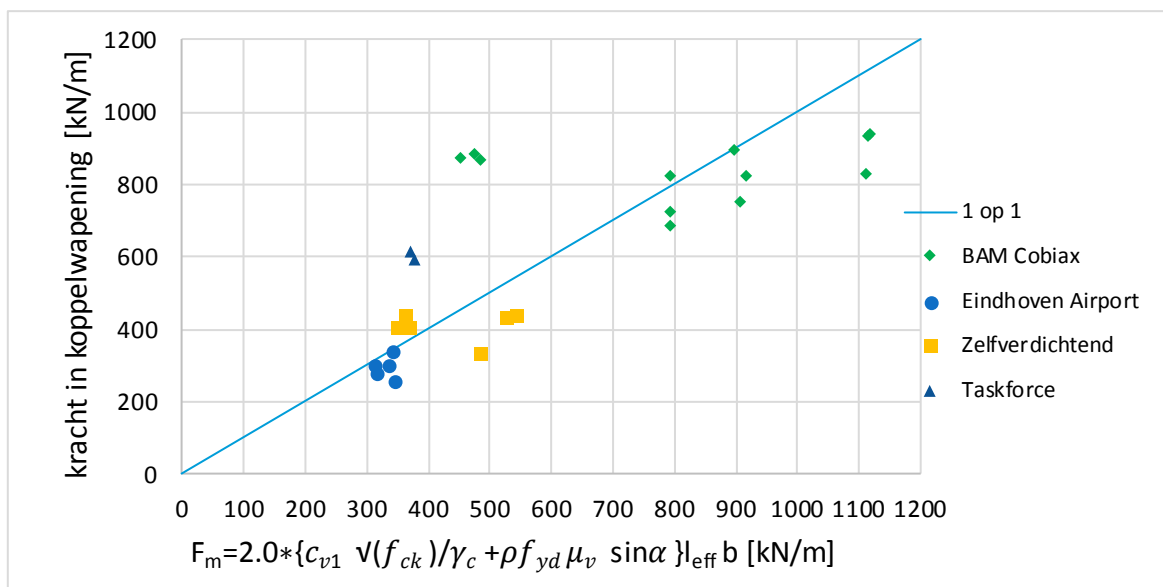
- de laagste waarde van de betondruksterkte (breedplaat of druklaag);
- dat de lengte van het in rekening te brengen aansluitvlak gelijk is aan de lengte van de koppelwapening achter de eerste verticale wapening (de lengte van de koppelstaven achter het hart van de tralieligger);
- de volgende oppervlakte classificatie van de verschillende proefstukken
 - o ZVB – geen nabehandeling – classificatie “glad”
 - o Traditioneel beton – geen nabehandeling – classificatie “glad”
 - o ZVB – opgeruwd – classificatie “ruw”
 - o Traditioneel beton – opgeruwd – classificatie “ruw”
- dat de wapening door het aansluitvlak wordt gevormd door alle diagonale van de aanwezige tralieliggers en andere wapening die het aansluitvlak doorkruist, zoals bij de BAM-Cobiax proeven het geval is;
- dat het effectieve oppervlak gereduceerd wordt door eventuele gewichtsbesparende elementen.

Vergelijking met proeven gebeurt in de regel op basis van een voorspelling van de sterkte waarbij voor de materiaaleigenschappen en eventuele andere parameters uitgegaan wordt van de gemiddelde waarden. Vanuit deze vergelijking en de gevonden variatie wordt dan een rekenwaarde voor de sterkte bepaald. Voor het hier gehanteerde model waren de gemiddelde waarden van de factoren c_{v1} en μ_v niet bekend, een vergelijking op basis van gemiddelde was zodoende niet geheel mogelijk. Er is daarom ervoor gekozen om op basis van karakteristieke waarden van de materiaaleigenschappen na te gaan of vergelijking (11) een veilige voorspelling van de sterkte geeft of niet.

Om de voorspelling te matchen met de testresultaten moet de volgens vergelijking (11) bepaalde sterkte vermenigvuldigd worden met een correctiefactor α_i . Welke gedefinieerd is als:

$$\alpha_i = \frac{F_{\text{proef}}}{F_{\text{voersp}}} \quad (12)$$

Hierbij is voor de als glad geclassificeerde aansluitvlakken onderscheidt gemaakt in proeven met zelf verdichtend beton (ZVB) en proeven met traditioneel beton. Dit door de gemiddelde waarde van de correctiefactor α voor de proeven bij ZVB orde grootte 9% lager bleek te zijn dan bij traditioneel beton. Voor de als “ruw” geclassificeerde aansluitvlakken is dit onderscheidt op basis van het aantal beschikbare proeven minder goed te maken. Op basis van het aantal beschikbare elementen is toch gemeend een zelfde verhouding tussen traditioneel beton en ZVB aan te kunnen houden. Uit de afzonderlijke beschouwingen voor de groepen volgt dat bij glad voor ZVB dan een gemiddelde waarde van $\alpha_i = 2,0$ en de bijbehorende variatiecoëfficiënt 0,18, zie figuur 52. Uit de gevonden verdelingsfunctie voor de waarde van α_i blijkt dat deze als lognormaal verdeeld mag worden beschouwd. Uitgaande van een lognormaal verdeeld populatie kan de rekenwaarde voor de uit het model volgende afschuifkracht bepaald worden met een rekenwaarde voor α_d van 1,1.



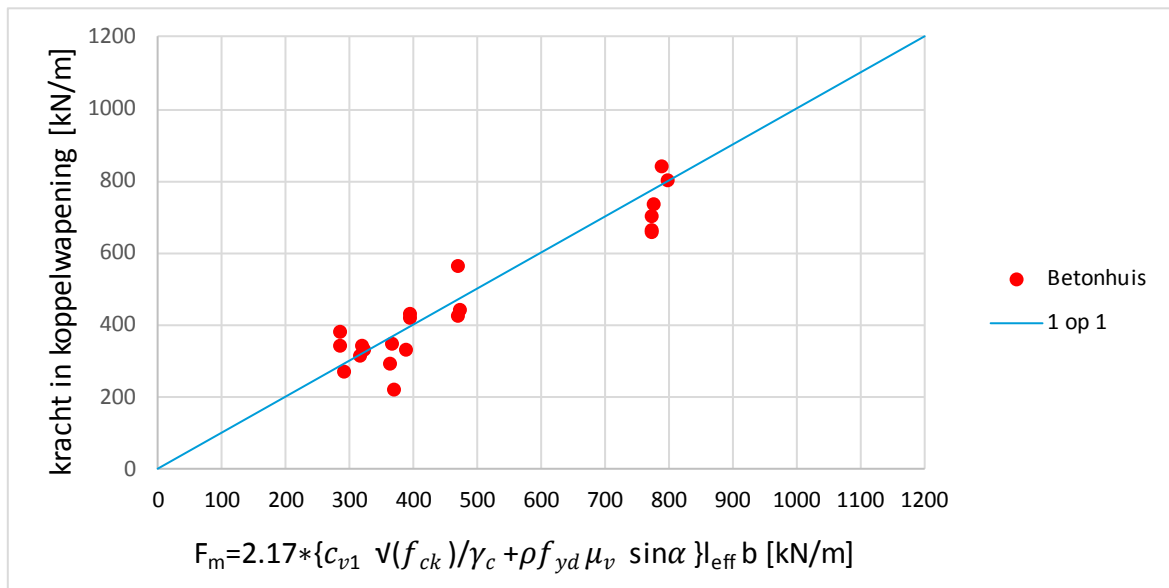
figuur 52 Relatie tussen de maximale trekkracht in de koppelwapening bij het experiment (verticaal) en volgens de vergelijking met $\alpha_i = 2,0$ voor zelfverdichtend beton

Voor traditioneel beton glad volgt $\alpha_i = 2,17$ en de bijbehorende variatiecoëfficiënt 0,17, zie figuur 53. Uitgaande van een lognormaal verdeeld populatie kan de rekenwaarde voor de uit het model volgende afschuifkracht bepaald worden met een rekenwaarde voor α_d van 1,2.

Hieruit kan dus opgemaakt worden dat voor de bepaling van de afschuifcapaciteit uitgegaan kan worden van de vergelijking zoals voorgesteld in rev.EC2 D3 met een toeslag op de capaciteit van 1,1 voor ZVB en 1,2 voor traditioneel beton. Hierbij dient dan wel uitgegaan te worden van het effectieve oppervlak vanaf de eerste verticale wapening door het aansluitvlak. Daarmee wordt de rekenregels als volgt:

$$\text{Traditioneel} \quad \tau_{Rd} = 1,2 \left[c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_C} + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha \right] \quad (13)$$

$$\tau_{Rd} = 1,1 \left[c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha \right] \quad (14)$$



figuur 53 Relatie tussen de maximale trekkracht in de koppelwapening bij het experiment (verticaal) en volgens de vergelijking met $\alpha_i = 2,17$ voor traditioneel beton

Aanvullende is gekeken of de waarde voor α_i ook geldt voor de proefstukken met als ruw geclassificeerde oppervlakken. Het aantal te beschouwen proeven bedroeg 5 maar de gemiddelde waarde en de variatiecoëfficiënt voor α_i was vergelijkbaar met die voor de als glad beschouwde proeven. De vergelijking inclusief de bijbehorende factoren zoals gegeven in rev.EC2 en de hier bepaalde correctiefactor α sluiten ook bij ruw dus goed aan bij het in de proeven gevonden gedrag. De aangepaste vergelijking is zodoende ook op als ruw geclassificeerde aansluitvlakken toepasbaar. Bij de geëvalueerde Nederlandse proeven bedroeg de minimale lengte van de koppelstaven achter de tralie 300mm. Zonder verdere beschouwing is de aangepaste vergelijking met een toeslag daarom niet zondermeer toepasbaar bij kortere doorvoer van de koppelstaven door de tralie. In [18] zijn proefresultaten gerapporteerd voor ZVB proefstukken met koppelstaven welke 100 mm door de verticale wapening heen steken. Op basis van deze set proeven is beoordeeld of deze proeven met passen binnen het beeld volgende uit de Nederlandse proeven. Het gedrag en de verhouding tussen de voorspelling en de proeven komen overeen met hetgeen in de Nederlandse proevenserie met ZVB wordt gevonden. Zodoende wordt geconcludeerd dat de bovenstaande vergelijking toepasbaar is tot een minimale effectieve lengte van de koppelstaven achter de tralie van 100mm.

Geconcludeerd wordt zodoende dat voor zowel glad als ruw uitgegaan kan worden van de rekenregels zoals voorgesteld in rev.EC2 D3 met een verhoging van de capaciteit van 10% voor ZVB en 20% voor traditioneel beton op voorwaarde dat de lengte van de koppelstaven achter de tralie minimaal 100 mm bedraagt. Voor het toepassingsgebied geldt dus het volgende:

- koppelstaven steken minimaal 100 mm door de eerste verticale wapening heen, de eerste verticale wapening dient te bestaan uit tralieliggers of wapening die goed verankerd is in de breedplaat; wapening om gewichtsbeparende elementen te positioneren gelden niet als eerste verticale wapening.

- de tralieligger moet minimaal 15 mm in de breedplaat verankerd zijn.

Verder moet bij gebruik van de vergelijking uitgegaan worden van het volgende:

- de laagste waarde voor de druksterkte van beide aansluitvlakken moet worden aangehouden
- alle wapening die het aansluitvlak doorkruist en die voldoende is verankerd, mag worden meegenomen.

Hierna is, op basis van het voorgaande de maximaal over te brengen schuifkracht voor een aansluitvlak bepaald bij twee configuraties van koppelwapening: Ø12-150 en Ø16-150. Bij de Ø12 is uitgegaan van een aanwezige verankeringslengte van 700 mm. Met een tralieafstand tot de langснаad van 400 mm resulteert dit in een effectieve lengte van 300 mm. Bij de Ø16 is uitgegaan van een verankeringslengte van 850 mm, wat bij eenzelfde traliepositie leidt tot een effectieve lengte van 450 mm. Verder is uitgegaan van de aanwezigheid van één tralieligger met diagonalen Ø5 en α gelijk aan 60°. Per meter breedte zijn in de tralieligger 20 diagonalen aanwezig. Uitgaan is van een massieve vloer zonder gewichtsbesparende elementen die een reducerend effect zouden kunnen hebben op het oppervlak van het aansluitvlak.

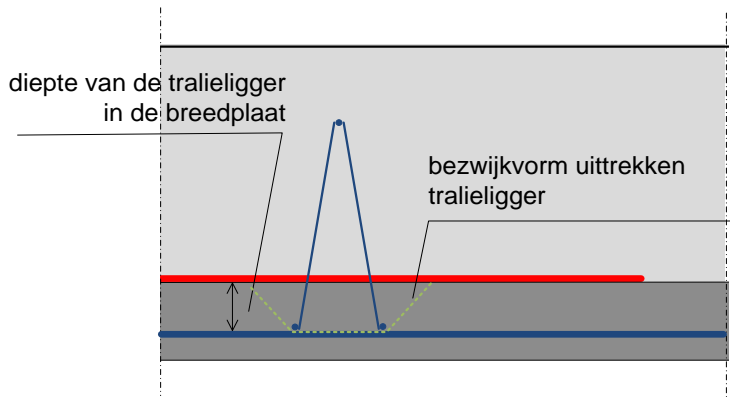
tabel 17 Trekkkracht in koppelwapening Ø12-150 en Ø16-150 volgens het beschreven afschuifmodel volgens rev.EN 1992 – D3

Traditioneel beton vergelijking (13)			Ø12-150 $l_{eff} = 300 \text{ mm}$		Ø16-150 $l_{eff} = 450 \text{ mm}$	
			[kN/m]	[%]	[kN/m]	[%]
$f_{yd} A_s$			328	100	583	100
	C_{v1}	μ_v				
C20/25						
glad	0,075	0,6	187	57	227	39
ruw	0,15	0,7	285	87	366	63
C30/37						
glad	0,075	0,6	205	63	254	44
ruw	0,15	0,7	321	98	420	72

Zelfverdichtend beton vergelijking (14)			Ø12-150 $l_{eff} = 300 \text{ mm}$		Ø16-150 $l_{eff} = 450 \text{ mm}$	
			[kN/m]	[%]	[kN/m]	[%]
$f_{yd} A_s$			328	100	583	100
	C_{v1}	μ_v				
C20/25						
glad	0,075	0,6	171	52	208	36
ruw	0,15	0,7	261	80	335	57
C30/37						
glad	0,075	0,6	188	57	233	40
ruw	0,15	0,7	295	90	385	66

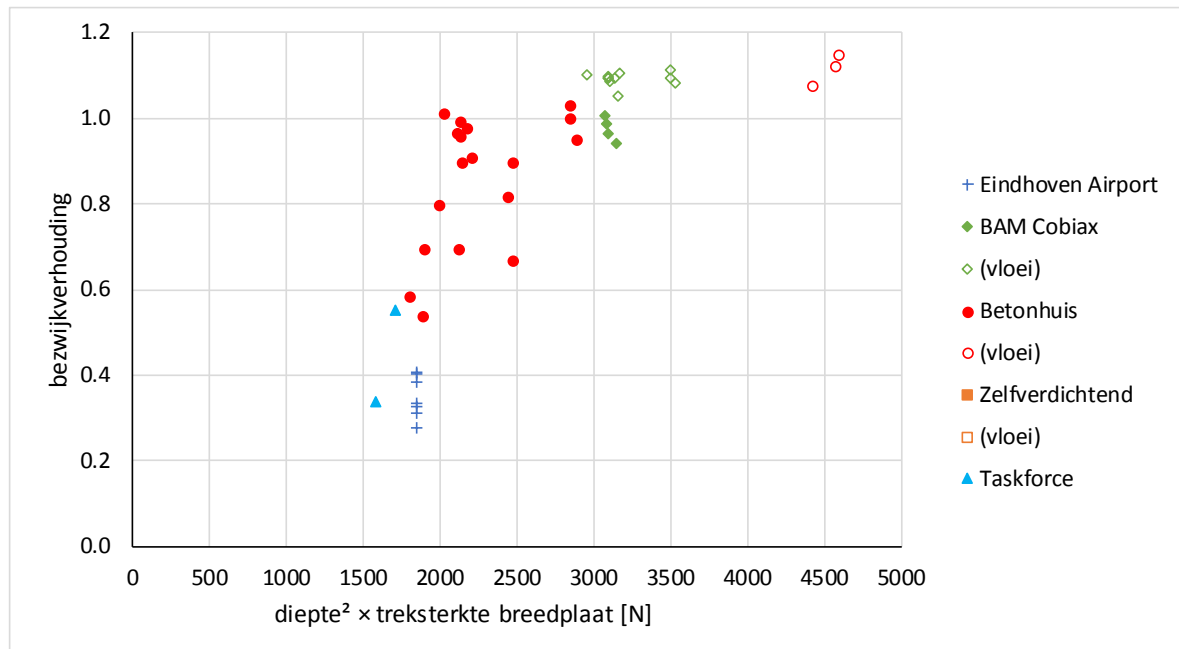
5.5.3 Bezwijken door het uittrekken van de tralieligger

Hierna is nagegaan in welke mate de capaciteit van de verankering van de tralieligger in de breedplaten bepalend kan zijn voor de grootte van trekkracht in de koppelwapening. Bepalend voor de capaciteit van de verankering van de tralieligger zijn de diepte van de tralieligger in de breedplaat, zie figuur 54, de breedte van het beton dat door de tralieligger uit de breedplaat wordt getrokken en de treksterkte van het beton van de breedplaat.



figuur 54 Diepte van de tralieligger in de breedplaat

Omdat de diepte ook invloed heeft op de breedte van het beton dat uit de breedplaat wordt getrokken, wordt de diepte hierbij kwadratisch beschouwd en wordt de breedte vooralsnog buiten beschouwing gelaten. Het product van de diepte in het kwadraat en de gemiddelde treksterkte van het beton van de breedplaat zijn in figuur 55 uitgezet tegen de bezwijkverhouding.



figuur 55 Relatie tussen het product van het kwadraat van de diepte en de treksterkte van het beton enerzijds en de bezwijkverhouding anderzijds

Uit figuur 55 wordt geconcludeerd dat de diepte van de tralieligger in de breedplaat en de treksterkte van het beton van de breedplaat, relevante variabelen zijn voor het beschrijven van het bezwijken door het falen van het aansluitvlak. Het bezwijkmechanisme dat tot nu toe beschreven is

als het bezwijken van het aansluitvlak, kan in deze situatie ook worden beschreven als het bezwijken van de verankering van de tralieligger. Hierna is de invloed van de diverse variabelen op dit mechanisme nader beschouwd.

Aansluitend op de theorie voor de uittrekweerstand van korte ankers in beton is daarbij, afwijkend van hetgeen hiervoor, de diepte van de tralieligger in het beton tot de macht 1,5 genomen. Naast de hiervoor genoemde variabelen van de diepte van de tralieligger en de treksterkte van het beton van de breedplaat, is hierbij ook de lengte van de koppelwapening, achter het hart van de tralieligger meegenomen.

Met behulp van curvefitting is het bezwijken van de tralieligger vertaald naar een maximaal te verankeren kracht van de koppelwapening achter de tralieligger. De trekkracht in de koppelwapening op het moment van bezwijken kan worden benaderd door:

$$F_{\text{uittrek}} = 1,7 f_{\text{ctm,breedplaat}} \text{ diepte}^{1,5} k_2 k_3 \quad (15)$$

waarin:

F_{uittrek} is de verankeringskracht van de koppelwapening achter de eerste tralieligger [kN/m];

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

diepte is de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat in mm, zie figuur 55;

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

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

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

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

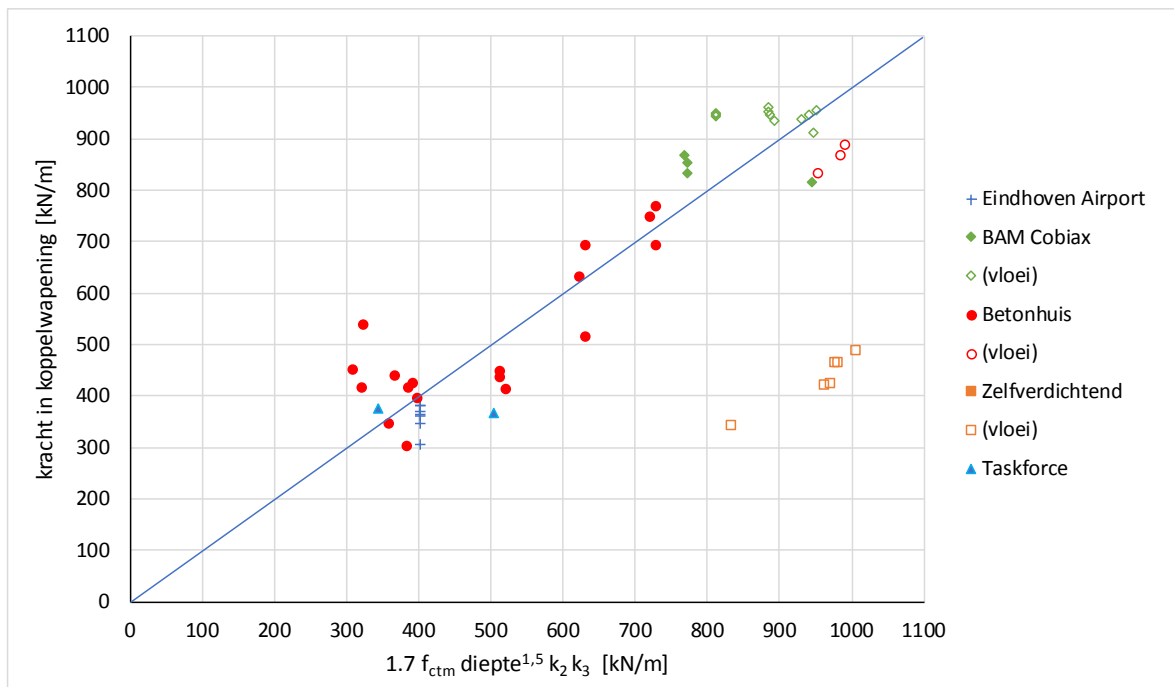
Door het betrekken van de lengte van de koppelstaven achter de eerste tralieligger is in het model ook de verankering van de koppelstaven beschouwd. Dit hoeft verder niet meer separaat getoetst te worden.

In figuur 56 zijn de in de proeven optredende trekkrachten, uitgedrukt in kN/m, vergeleken met de resultaten van vergelijking (15). Uit deze figuur blijkt dat vergelijking (15) een redelijke fit geeft voor de bovengrens van de trekkracht in de koppelwapening bepaald door het uittrekken van de tralieligger. Ook blijkt dat voor situaties waarbij vloeit van de koppelstaven is opgetreden, het model een waarde geeft die nagenoeg gelijk is aan de vloeikracht dan wel een waarde die groter is dan de vloeikracht. Als het model resulteert in een hogere waarde dan de vloeikracht zal de vloeikracht in de koppelstaven maatgevend zijn bij het bepalen van de weerstand van het beschouwde detail.

Voor het verder beoordelen van de gevonden relatie wordt de verhouding_{MT} gebruikt waarvoor geldt:

$$\text{verhouding}_{\text{MT}} = \frac{\text{Trekkracht}_{\text{model}}}{\text{Trekkracht}_{\text{proef}}} \quad (16)$$

De gemiddelde waarde van de verhouding_{MT} voor de 31 proeven waarbij het bezwijken van het aansluitvlak en uiteindelijk het uittrekken van de tralieligger is opgetreden is gelijk aan 1,02 met een variatiecoëfficiënt van 0,17.



figuur 56 Relatie tussen de maximale trekkracht in de koppelwapening bij het experiment (verticaal) en de benadering van de bovengrens voor deze kracht op basis van het bezwijken van de verankering van de tralieligger

In bijlage D is voor diverse variabelen zoals:

- de gemiddelde treksterkte van het beton van de breedplaat;
- de diepte van de tralieligger in de breedplaat;
- de lengte van de koppelstaven achter de tralieligger;
- de diameter van de koppelstaven;
- de wapeningsverhouding van de koppelwapening
- de hoogte van de druklaag;
- de druksterkte van het beton van de druklaag;
- het product van de hoogte en de druksterkte van de druklaag

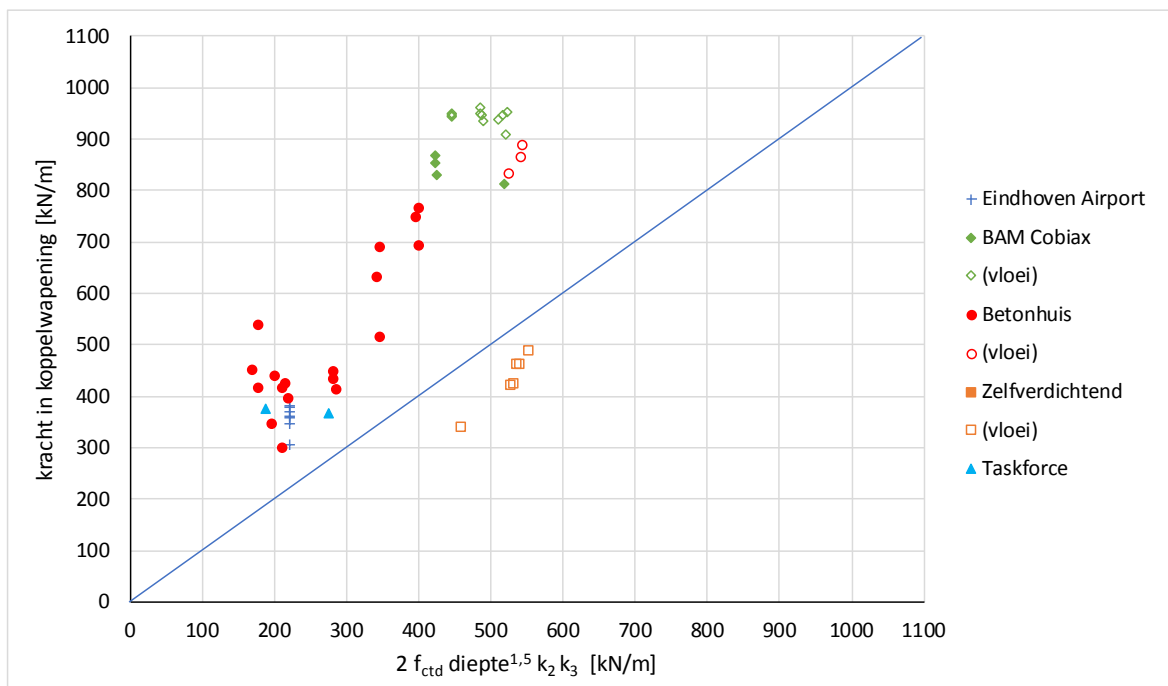
de relatie tussen verhouding_{MT} en de variabelen beschreven. Hieruit blijkt dat er bij toepassing van het model verder geen duidelijke relatie is tussen de beschouwde variabelen en de resultaten van het afgeleide model.

Als de variabele verhouding_{MT} wordt beschouwd als lognormaal verdeeld, is een rekenwaarde voor de uit het model volgende trekkracht in de koppelwapening te bepalen volgens bijlage D van NEN-EN 1990. Hieruit volgt dat voor het verkrijgen van een rekenwaarde vergelijking (15) met een waarde van 0,54 moet worden vermenigvuldigd.

$$F_{\text{uittrek,d}} = 0,54 \cdot 1,7 f_{\text{ctm,breedplaat}} \text{diepte}^{1,5} k_2 k_3 \quad (17)$$

$$\approx 2 f_{\text{ctd,breedplaat}} \text{diepte}^{1,5} k_2 k_3$$

Ter illustratie is in figuur 57 de verhouding tussen de tijdens de proeven maximaal opgetreden trekkracht in de koppelwapening en de rekenwaarde van de uittreksterkte van de koppelwapening volgens vergelijking (17) gegeven.



figuur 57 Vergelijking tussen de kracht in de koppelwapening tijdens de proef op de verticale as en de rekenwaarde van de maximale trekkracht in de koppelwapening bepaald door het uittrekken van de tralieligger

In tabel 18 zijn de krachten volgens vergelijking (17) bepaald voor twee configuraties van koppelwapening: $\varnothing 12-150$ en $\varnothing 16-150$, gelijk aan tabel 17 eerder. Bij de $\varnothing 12$ is uitgegaan van een aanwezige verankeringslengte van 700 mm. Met een tralieafstand tot de langснаad van 400 mm resulteert dit in een effectieve lengte van 300 mm. Bij de $\varnothing 16$ is uitgegaan van een verankeringslengte van 850 mm, wat bij eenzelfde traliepositie leidt tot een effectieve lengte van 450 mm. De uit vergelijking (17) volgende waarden zijn ook als percentages uitgedrukt ten opzichte van de rekenwaarde van de vloeikracht.

tabel 18 Trekkracht in koppelwapening volgens vergelijking (17) voor $\varnothing 12-150$ en $\varnothing 16-150$

		$\varnothing 12-150$ $l_{\text{eff}} = 300 \text{ mm}$		$\varnothing 16-150$ $l_{\text{eff}} = 450 \text{ mm}$	
		[kN/m]	[%]	[kN/m]	[%]
$f_{yd} A_s$		328	100	583	100
C30/37					
diepte [mm]	20	131	40	178	31
	25	183	56	249	43
	30	240	73	328	56
	35	303	92	413	71
C35/45					
diepte [mm]	20	145	44	197	34
	25	202	62	276	47
	30	266	81	362	62
	35	335	102	457	78

De diepte van de tralieligger is bij de proefstukken bepaald uit de dikte de breedplaat minus de som van de toegepaste dekking aan de onderzijde van de breedplaat en de dikte van de wapening in de breedplaat waarop de tralieliggers zijn geplaatst. De feitelijke diepte van de tralieliggers in de proefstukken zal iets variëren. Echter deze spreiding zal ook in de praktijk aanwezig zijn. Voor het bepalen van de diepte van de tralieliggers in de praktijk kan daarom dezelfde methode worden gehanteerd als hiervoor beschreven.

5.6 Verankering wapening in de breedplaat

Bij het uitgevoerde experimentele onderzoek is, evenals bij het uit de literatuur bekende onderzoek, geen bezwijkvorm bekend waarbij de verankering van de wapening in de breedplaat bepalend is. Voor de verankering van de wapening geldt dat in het algemeen de benodigde wapeningshoeveelheid, en veelal ook de diameter, kleiner is dan die van de koppelwapening. De verankering is derhalve minder kritisch. Ook is de lengte van de beschikbare verankering groter dan de verankeringlengte van de koppelwapening na de eerste tralieligger. Bij de wapening in de breedplaat loopt de verankeringlengte namelijk van het einde van de koppelwapening tot de naad van de breedplaat.

Verankering van de wapening in de breedplaat wordt daarom niet beschouwd als relevant bezwijkmechanisme.

5.7 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn de resultaten van het uitgevoerde experimentele onderzoek geanalyseerd. Hieruit wordt geconcludeerd dat het bezwijken van de breedplaatvloer ter plaatse van een langnaad tussen twee breedplaten in het geval van positieve buiging bepaald kan worden volgens de uitgangspunten van artikel 6.1 van NEN-EN 1992-1-1 waarbij de trekkracht in de koppelwapening wordt begrensd door:

- I. de rekenwaarde van de vloeigrens: $f_{yd} A_{s,kop}$
- II. de rekenwaarde van de capaciteit van het aansluitvlak om de trekkracht in de koppelwapening over te dragen aan de wapening in de breedplaat, hiervoor mag de grootste waarde van de volgende twee modellen worden gehanteerd:
 - a. een model dat de schuifsterkte van het aansluitvlak beschrijft;
 - b. een model dat de uittrekweerstand van de aanwezige tralieliggers beschrijft.

De betreffende rekenmethode zijn uitsluitend toepasbaar in het geval er het aansluitvlak doorkruisende wapening aanwezig is op een positie van ten minste 100 mm voor het einde van de koppelwapening en de diepte van de onderzijde van de eventuele tralieligger in de breedplaat ten minste gelijk is aan 15 mm.

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

$$F_{R,kop,a,d} = v_{Rd,i} A_{eff} \quad (18)$$

waarin:

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

$$v_{Rd,i} = k_1 \left[c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_C} + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha \right]$$

$$A_{eff} = b l_{eff}$$

$$k_1 = 1,1 \quad \text{voor zelfverdichtend beton}$$

$$= 1,2 \quad \text{voor traditioneel beton;}$$

bij aanwezigheid van gewichtsbesparende elementen moet het deel van het oppervlak dat hierdoor niet effectief kan zijn, op A_{eff} in mindering zijn gebracht;

c_{v1} is een factor afhankelijk van het wel of niet bewerkt zijn van het oppervlak van de breedplaat, volgens tabel 19;

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

$$\rho = A_s / A_{eff}$$

A_s is het oppervlak van de doorsnede van de aansluitvlak doorkruisende wapening;

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 19;

α is de kleinste hoek tussen de beschouwde aansluitvlak doorkruisende wapening en het vlak van het aansluitvlak, zie figuur 51,
 $\geq 45^\circ$
 $\leq 135^\circ$

b is de breedte van de beschouwde doorsnede;

l_{eff} is de grootste lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening, gezien vanaf de naad.

tabel 19 Coëfficiënten voor de oppervlakte

Oppervlakte ruwheid	c_{v1}	μ_v
ruw (bewerkt)	0,15	0,7
glad (niet bewerkt)	0,075	0,6

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.

ad b) De maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger volgt uit:

$$F_{R,kop,b,d} = 2 f_{ctd,breedplaat} diepte^{1,5} k_2 k_3 \quad (19)$$

waarin:

$F_{R,kop,b,d}$ is de maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger, in kN/m;

$f_{ctd,breedplaat}$ is de rekenwaarde van de treksterkte van het beton van de breedplaat, in MPa;

diepte is de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat in mm, zie figuur 55;

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

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

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

$\varnothing_{\text{koppel}}$ is de diameter van de koppelwapening die bepalend is voor l_{eff} , in mm.

Nadrukkelijk wordt gesteld dat deze rekenregels bedoeld zijn voor het toetsen van breedplaat-
vloeren in bestaande constructies. Zij mogen niet worden gebruikt voor het ontwerp van nieuwe
constructies.

6 Enkele andere aspecten bij de constructieve beoordeling

6.1 Inleiding

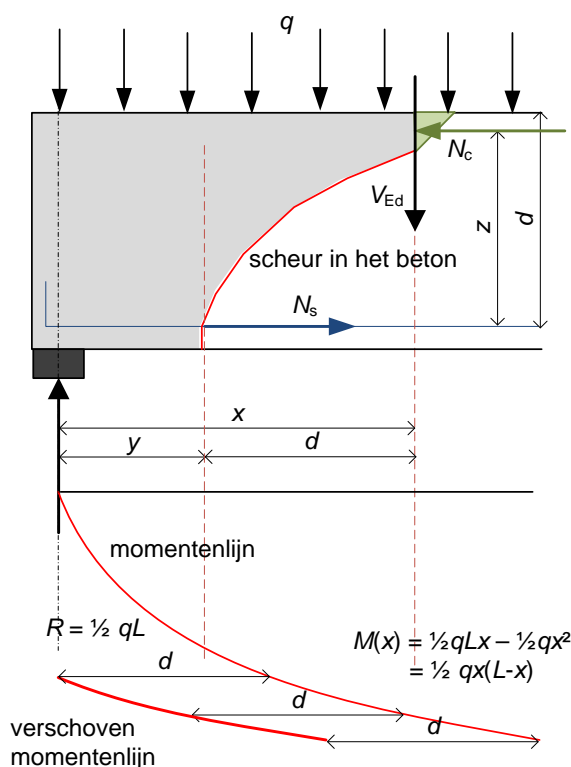
In het voorgaande is de focus vooral gericht op de situatie waarbij de langснаad tussen twee breedplaten gelegen is nabij de plaats waar de buigende momenten maximaal zijn. De dwarskracht in de beschouwde doorsnede is dan verwaarloosbaar klein. Vaak zijn langsnaden echter te vinden op posities waar sprake is van een combinatie van moment en dwarskracht. In paragraaf 6.2 wordt ingegaan op de invloed van de dwarskracht op de toets van de momentweerstand ter plaatse van de naad en de wijze waarop de dwarskrachtweerstand bij de naad tussen de breedplaten moet zijn bepaald.

Ook is aangenomen dat positieve momenten optreden bij langsnaden tussen twee breedplaten. Het is echter mogelijk dat ook aan de kopse zijde van de breedplaat sprake is van een positief moment. Een kopse zijde van een breedplaat kan aansluiten op de kopse zijde van de aansluitende breedplaat maar ook op de langs zijde van een aansluitende breedplaat. Het bepalen van de momentweerstand ter plaatse van een kopnaad is beschreven in paragraaf 6.3

Tot slot is in paragraaf 6.4 ingegaan op de situatie in het geval van brand.

6.2 Invloed van dwarskracht

Om de invloed van de dwarskracht op de krachtsoverdracht in het aansluitvlak te beschouwen, kan gebruik worden gemaakt van de bekende theorie waarbij de evenwichtssituatie na het ontstaan van een diagonale scheur in de ligger wordt beschouwd, zie figuur 58.

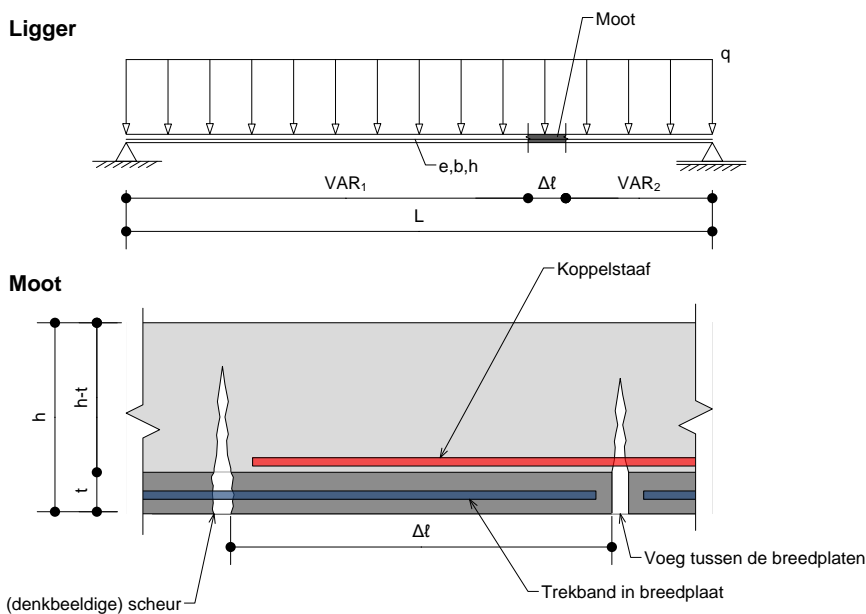


figuur 58 Achtergronden verschoven momentenlijn

Hieruit volgt dat de kracht in de wapening op een afstand y vanaf de oplegging, bepaald wordt door het moment dat wordt bepaald op een afstand x vanaf de oplegging. Uitgaande van een scheur onder circa 45° is de afstand tussen beide posities gelijk aan d . De momentenlijn dient, als geen dwarskrachtwapening is toegepast, over een afstand d te zijn verschoven.

De schuifspanningen ten gevolge van de dwarskracht bevinden zich, als geen dwarskrachtwapening is toegepast, vooral in de drukzone en middels aggregate interlock in de scheur en hebben geen directe invloed op de grootte van de kracht in de koppelwapening. Hieruit kan worden afgeleid dat de invloed van de dwarskracht op de krachten en spanningen in het aansluitvlak tussen de koppelwapening en de wapening in de breedplaat voldoende wordt beschouwd als rekening wordt gehouden met de voorgeschreven verschuiving van de momentenlijn. Evident dient de doorsnede ter plaatse van de naad, rekening houdend met de gereduceerde nuttige hoogte te worden getoetst op de weerstand tegen dwarskracht.

Aanvullend hierop is een model opgesteld waarbij in de beschouwde ligger twee scheuren zijn verondersteld. Eén ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten en één aan het einde van de koppelwapening, zie figuur 59.

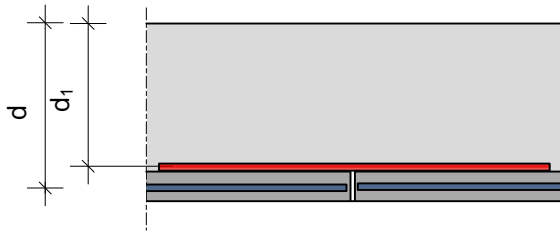


figuur 59 Model voor het bepalen van de invloed van de dwarskracht na het ontstaan van twee buigscheuren

De uitwerking van dit model, waarbij de diverse krachten die aangrijpen op de moot tussen de twee scheuren worden beschouwd, is opgenomen in bijlage E. Uit deze uitwerking blijkt eveneens dat de invloed van de dwarskracht voldoende wordt beschouwd als de momentenlijn over de voorgeschreven afstand wordt verschoven.

Tot slot wordt opgemerkt dat de dwarskrachtweerstand in de beschouwde sneden ter plaatse van de naad moet worden getoetst volgens NEN-EN 1992-1-1, artikel 6.2.2. of 6.2.3, uitgaande van de geometrie ter plaatse van de naad tussen de twee breedplaten. De effectieve hoogte van de doorsnede moet daarbij dus betrokken zijn op de koppelwapening die in de druklaag is aangebracht, zie d_1 in

figuur 60, en de eigenschappen van het beton zijn de eigenschappen van het beton dat in de druklaag is toegepast.

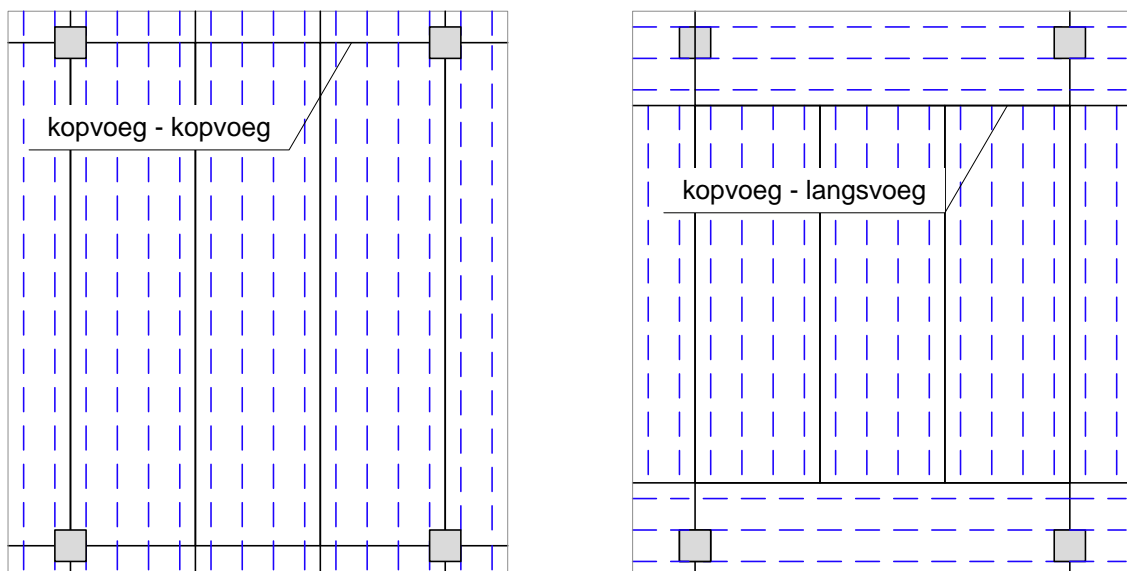


figuur 60 Nuttige hoogte d_1 bij het toetsen van de dwarskracht

Aanvullend wordt opgemerkt dat regels voor het toetsen van dwarskracht, zowel in het geval van positieve als negatieve buiging, zijn opgenomen in CUR-Aanbeveling 99 Strokvloeren [7].

6.3 Kopvoegen

Zoals gesteld kan er bij kopvoegen sprake zijn van verschillende configuraties, zie figuur 61. Dit heeft vooral invloed op de positie en oriëntatie van de tralieliggers in de breedplaten en bij de voeg. Bij een naad met twee kopse einden van een breedplaat lopen aan beide zijde van de naad de tralieliggers door tot het einde van de plaat, of in ieder geval tot nabij het einde van de plaat. Bij een naad waarbij een kopseinde aansluit op een langs zijde van een andere breedplaat is er aan één zijde van de naad sprake van een tralieligger die doorloopt tot de naad en kan aan de andere zijde de tralie, geplaatst parallel aan de naad, op een relatief grote afstand van de naad aanwezig zijn.



figuur 61 Breedplaat indelingen met verschillende aansluitingsconfiguraties

Voor het toetsen van momentweerstand van ter plaatse van een naad moet aan beide zijde van de naad, de verankering van de koppelwapening en de overdracht van de kracht in de koppelwapening aan de in de breedplaten opgenomen wapening worden gecontroleerd. Als de beschouwde zijde een langснаad betreft, moeten hiervoor de regels zoals beschreven in 5.7 worden gehanteerd.

Voor het toetsen van de kopse zijde van de breedplaat moet de verankering als volgt worden getoetst:

de verankeringslengte van de koppelwapeningstaven moet voldoen aan: (20)

$$l_{b,kop} = 1,2 l_{b,rqd} + 150 \text{ mm}$$

- waarin:

$l_{b,rqd}$ is de verankeringslengte volgens 8.4.3 van NEN-EN 1992-1-1

- het aansluitvlak tussen de druklaag en de breedplaat moet worden getoetst volgens 6.2.5 van NEN-EN 1992-1-1, waarbij:

$$\circ v_{Edi} = \frac{F_{s,koppel,d}}{A_{eff}} \quad (21)$$

waarin:

$F_{s,koppel,d}$ is de rekenwaarde van de trekkracht in de koppelwapening;

$A_{eff} = b l_{eff}$

verminderd met het oppervlak van eventueel aanwezige gewichtsbesparende elementen;

b is de breedte van de beschouwde doorsnede;

l_{eff} is de lengte van de koppelwapening gemeten vanaf de naad verminderd met de afstand van het einde van de breedplaat tot het begin van de tralieligger.

o A_s wordt bepaald door de doorsneden van alle diagonalen van de tralieliggers en andere het aansluitvlak doorkruisende wapening die zich in het beschouwde oppervlak bevinden;

o de hoek α moet liggen tussen 45° en 135° , zie figuur 51.

- de verankeringslengte van de wapeningsstaven die zijn opgenomen in de breedplaat moet voldoen aan de eisen in 8.4.3 van NEN-EN 1992-1-1

In afwijking van het gestelde in 6.2.5 is de grootte van de hoek α aangepast. Opgemerkt moet worden dat de term $\cos \alpha$ in vergelijking 6.25 van het betreffende artikel bij een hoek groter dan 90° negatief wordt. Indien de wapening door het aansluitvlak uitsluitend bestaat uit diagonale uit symmetrische tralieliggers, dan kan vergelijking 6.25 worden herschreven als:

$$v_{Rdi} = c f_{ctd} + \mu \rho f_{yd} \sin \alpha \leq 0,5 v f_{cd} \quad (22)$$

6.4 Omstandigheden bij de belastingssituatie brand

In het geval van brand moet de constructie van het brandcompartiment waar de brand woedt, weerstand blijven bieden om het voldoende lang mogelijk te maken om het gebouw veilig te kunnen verlaten en de brandweer de mogelijkheid te geven de brand te bestrijden. Daartoe wordt bij gewapende betonconstructies een voldoende grote betondekking op de wapening toegepast. Het beton beschermt dan de wapening tegen een te snelle toename van de temperatuur ten gevolge waarvan de sterkte van het wapeningsstaal afneemt. Op deze wijze wordt vaak aan de gestelde eisen voldaan zonder dat er een herverdeling van veldmoment naar steunpuntsmoment(en) nodig is. In de situaties waar dit het geval is, is bij het beschouwen van bestaande breedplaatvloerconstructies geen extra toets nodig, behoudens een eventuele controle of de constructie is gebouwd zoals hij ontworpen is.

In enkele gevallen is er een andere benadering gekozen. Bij deze benadering, die alleen kan worden toegepast bij statisch onbepaalde constructies, wordt geaccepteerd dat door een temperatuursverhoging in de wapening de momentweerstand in het midden van de overspanning gereduceerd wordt. Vervolgens wordt aangenomen dat de doorsnede met het gereduceerde moment wel over voldoende vervormingscapaciteit bezit zodat extra momentweerstand bij de steunpunten geactiveerd kan worden. Voor de situaties waarbij voor deze benadering is gekozen, moet aannemelijk worden gemaakt dat de hiervoor benodigde vervormingscapaciteit in het veld, ondanks de aanwezigheid van het kritische vloerdetail, aanwezig is. Is dat niet het geval, dan moeten passende maatregelen genomen worden voor het garanderen van de weerstand bij brand. Dit kan zijn versterken van het kritische detail, op een wijze die voldoende bestand is tegen de effecten van brand, of andere brandwerende maatregelen.

7 Naden met een relatief geringe over te brengen buigtrekkracht

7.1 Inleiding

Zoals uit de beschrijving van de breedplaatvloeren in de hoofdstukken 2 en 8 blijkt, treedt bij veel naden in breedplaatvloeren in de praktijk een positief buigend moment op. Naar verwachting zal dit in verreweg de meeste gevallen slechts gaan om verdeelwapening of wapening voor lastspreiding en is de daarbij over te brengen trekkracht van de ene breedplaat naar de andere breedplaat relatief gering. De vraag dringt zich op of het noodzakelijk is om voor breedplaatvloeren in bestaande constructies al die naden ook afzonderlijk te controleren, dan wel of het mogelijk is om generiek voor bepaalde naden aan te geven dat die niet nader beschouwd hoeven te worden. Daartoe zijn een aantal beschouwingen gedaan, die in dit hoofdstuk zijn gerapporteerd. Er is een voorstel gedaan voor een grenswaarde van de over te brengen trekkracht, waarvoor geldt dat bij een lagere over te brengen trekkracht de naad niet nader beschouwd hoeft te worden.

De gedeeltelijke instorting van de parkeergarage van Eindhoven Airport is ontstaan bij een naad waar een groot positief buigend moment moest worden overgebracht en het legplan zodanig was dat bij bezwijken van die naad het vloerdeel direct zou bezwijken. Omdat de grootste risico's zich voordoen bij naden met een groot positief buigend moment, is de grootte van het buigend moment ook meegenomen in het stappenplan van 2017 [5], door een gemiddelde rekenkundige schuifspanning van 0,4 MPa als grens aan te houden, en bij het experimentele onderzoek, waar proeven met koppelwapening $\varnothing 12$ mm en hoger is toegepast. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar naden waar een gering positief buigend moment moet worden overgebracht en dientengevolge veelal ook koppelwapening met een geringere diameter dan $\varnothing 12$ is toegepast. Omdat de krachtswerking in de koppelwapening niet alleen afhangt van de grootte van het positieve buigend moment, maar ook met de hoogte van de vloer (druklaag), wordt de beschouwing uitgevoerd voor naden met een door de koppelwapening geringe over te brengen trekkracht.

In 7.2 is ingegaan op de situatie zoals die bij koppelwapening met geringe diameters naar verwachting in de praktijk van bestaande betonconstructies zal voorkomen. In 7.4 worden een aantal uit de literatuur bekende proefresultaten vergeleken met het rekenmodel voor de afschuifsterkte dat in 5.5.2 is beschreven. In 7.4 worden de resultaten van verschillende methoden met elkaar vergeleken waarna, op basis van deze vergelijking, in 7.5 aanbevelingen worden gedaan voor configuraties van koppelwapening waarbij geen verder onderzoek meer nodig is.

7.2 Situatie bij koppelwapening met geringe diameter

Het berekeningsmodel voor de afschuifsterkte van het aansluitvlak is afgeleid in hoofdstuk 5 bij situaties waarbij de koppelwapening over een aanzienlijke afstand voorbij de tralieligger doorloopt. De toepassing van het berekeningsmodel is toegestaan tot een situatie waarbij de koppelwapening 100 mm voorbij de tralieligger doorloopt. Bij de uitgevoerde proeven met de koppelwapening $\varnothing 12$ en hoger was dat altijd 250 mm of meer. Het afgeleide berekeningsmodel maakt ook gebruik van de lengte van de koppelwapening achter de tralieligger, terwijl het gebied voor de tralieligger in het model niet wordt meegenomen. De vraag is hoe de uitvoering in de praktijk zal zijn geweest bij koppelwapening met een diameter kleiner dan $\varnothing 12$ en hoe die situaties beschouwd kunnen worden. Daartoe wordt navolgend eerst beschreven waarvan uitgegaan mag worden voor wat betreft de situatie in de praktijk en waarom.

Voor een beeld van wat naar verwachting de praktijktoepassingen zullen zijn in het geval van koppelwapening kleiner dan Ø12 mm (gekeken is naar Ø8 mm en Ø10 mm), is gekeken naar hetgeen in de diverse regelgevingsdocumenten in de loop der tijd is aangegeven over koppelwapening en tralieliggers. Het overzicht daarvan is in hoofdstuk 2 weergegeven.

Op basis van de verzamelde informatie in 2.4 is het verantwoord om voor de lengte van de koppelwapening uit te gaan van:

$$l_{di} = 1,2 l_d A_{s,ben}/A_{s,aan} + 150 \text{ mm} \quad (23)$$

waarin:

l_{di} is de lengte in mm waarover de staven in en op de breedplaat elkaar overlappen;

l_d is de laslengte in mm volgens de voor het ontwerp van betonconstructies geldende norm (art. 9.8 van NEN 6720).

Als eenvoudigheid halve voor de gemiddelde laslengte l_d uitgegaan wordt van 34 maal de diameter van de koppelwapening, dan wordt voor de lengte van de koppelwapening gerekend vanaf de naad als functie van de diameter de waarde gevonden, zoals die in tabel 20 is weergegeven. In dezelfde tabel is ook de daarbij behorende totale lengte van de koppelwapening ($2 l_{di}$) weergegeven, alsmede de lengte van de koppelwapening, zoals die op tekeningen van een producent voor de lengte van de koppelwapening is aangetroffen. Bij verschillende producenten zijn bij benadering dezelfde lengtes voor de koppelwapening waargenomen. Zoals is te zien, verschillen de berekende lengtes uitgaande van $l_d=34\varnothing$ weinig met de door producenten aangegeven lengtes. Het lijkt slechts een kwestie van afronding te zijn. Voor de navolgende beschouwingen wordt het verantwoord geacht om uit te gaan van de lengtes, zoals in de laatste kolom van tabel 20 is weergegeven.

tabel 20 Relatie tussen lengte en diameter van de koppelwapening

Diameter koppelwapening \varnothing (mm)	Lengte koppelwapening l_{di} (mm) vanaf naad uitgaande van $l_d=34\varnothing$	Totale lengte koppelwapening (mm)	Lengte koppelwapening (mm) zoals op tekening van producent
8	476	953	1000
10	558	1116	1150
12	640	1279	1250
16	803	1606	1550
20	966	1932	1950
25	1170	2340	2500

Het zal duidelijk zijn dat bij de kleinere diameters (Ø8 mm en Ø10 mm) van de koppelwapening, de lengte waarover de koppelwapening nog voorbij de tralieligger doorloopt, geringer is dan bij de grotere diameters. Om een indruk te krijgen van hoe dat in de praktijk in de meeste gevallen zich zal voordoen, is het nodig om te weten wat als algemene regel kan worden aangehouden voor de afstand van de rand van de breedplaat tot aan de tralieligger. Op basis van hetgeen daarvoor in 2.4 is aangegeven en informatie die is ontvangen van diverse producenten, is het verantwoord om daarvoor een afstand van 400 mm aan te houden. Dit betekent dat bij koppelwapening Ø10 mm deze altijd nog 175 mm en bij koppelwapening Ø8 mm nog altijd 100 mm voorbij de tralieligger doorloopt. Opgemerkt moet worden dat in de onderhavige beschouwingen uitgegaan is van gewapende breedplaten en de uiteinden van voorgespannen breedplaten. Vanaf 600 mm vanaf het einde van de breedplaten kan het zijn dat geen tralieligger aanwezig is in het geval van voorgespannen breedplaten.

Uit bevindingen opgedaan bij diverse observaties bij bestaande breedplaatvloerconstructies in de afgelopen periode blijkt dat ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten, regelmatig in beperkte mate delaminatie optreedt. Dat delaminatie optreedt is betrekkelijk eenvoudig vast te stellen door met een lichte hamer tegen de onderkant van de vloer te tikken. Daar waar delaminatie aanwezig is, wordt een doffere, minder hoge klank waargenomen. De lengte waarover de delaminatie zich voortzet, is in het algemeen beperkt. Hierna wordt voor het beschouwen van de constructieve kwaliteit van de koppelwapening met beperkte diameters uitgegaan van een over de lengte van de naad gemiddeld aanwezige delaminatie van 100 mm.

7.3 Experimentele resultaten bij koppelwapening met kleine diameters

In diverse van de in hoofdstuk 3 beschreven bronnen zijn 4-puntsbuigproeven beschreven waarbij koppelwapening met kleine diameters en relatief kleine lengten zijn toegepast. Daarbij zijn zowel situaties waarbij tralieliggers of ander soortige aansluitvlak doorkruisende wapening aanwezig zijn en situaties waarbij die verbindingswapening in het geheel ontbreekt in het gebied waarin de koppelwapening aanwezig is. Bij deze proeven is, gelijk aan de in hoofdstuk 4 beschreven proeven, zowel bezwijken door vloeien van de koppelwapening als bezwijken ten gevolge van afschuiven van het aansluitvlak opgetreden. In bijlage F is een inventarisatie van deze proeven opgenomen.

De resultaten van de proeven is vergeleken met vergelijking (11) voor de schuifsterkte van het aansluitvlak volgens Revisie D3 voor Eurocode 2 (EN1992-D3), dat ook in paragraaf 5.5.2 is beschreven. Uitgaande van de rekenwaarde van de schuifsterkte, luidt de vergelijking als volgt:

$$\tau_{Rdi} = c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha \quad (24)$$

Hierin is:

- τ_{Rdi} de rekenwaarde voor de afschuifsterkte;
- f_{ck} de karakteristieke waarde voor de laagste waarde van de druksterkte van de breedplaat of de druklaag;
- γ_c materiaalfactor;
- ρ is de wapeningsverhouding van de aansluitvlak doorkruisende wapening;
- f_{yd} is de rekenwaarde van de vloeigrens van het wapeningsstaal.
- α hoek van de benen van de tralieligger;
- c_{v1} en μ factoren afhankelijk van de ruwheid van het aansluitvlak (tabel 21).

tabel 21 Coëfficiënten voor vergelijking 8.55 van rev.EN1992 - D3

Oppervlakte ruwheid	c_{v1}	μ_v
Ruw (bewerkt)	0,15	0,7
Glad (niet bewerkt)	0,075	0,6

De afschuifweerstand van het aansluitvlak volgt vervolgens uit:

$$F_{Rv} = A_{aansl} \tau_{Rdi} \quad (25)$$

waarin:

A_{aansl} is het oppervlakte van het aansluitvlak,
 $= b (l_{\text{di}} - 100 \text{ mm})$

De lengte van het aansluitvlak is met 100 mm verminderd vanwege de in 7.2 beschreven delaminatie.

De resultaten van de vergelijking zijn gegeven in figuur F-1 en figuur F-2 in bijlage F. Hieruit blijkt dat het model bij een situatie zonder tralieliggers een waarde geeft die 2 tot 5 maal kleiner is dan de in de proef gevonden waarde van de trekkracht in de koppelwapening. Deze verhouding is een redelijke verhouding tussen een gemiddeld in proeven gevonden gedrag en een rekenwaarde van een bezwijkwaarde.

Er is één proefserie met tralieliggers waarbij bezwijken van het aansluitvlak gevonden is, dit is de proefserie van Gudmand-Høyer [19]. Bij deze proeven is de verhouding tussen de in de proef vastgestelde waarde en de waarde die volgt uit het model slechts gelijk aan 1,1. Dit is een te lage verhouding. Een reden hiervoor zou het volgende kunnen zijn. De tralieligger, enkelvoudig uitgevoerd, heeft diagonalen Ø8 en die vertegenwoordigen relatief veel doorsnede voor de verbindingswapening tussen de breedplaat en de druklaag. De verankering van de verbindingswapening is echter beperkt door de betrekkelijk geringe diepte van de tralieligger en mogelijk een geringe kwaliteit van de las tussen de diagonalen en de langsdraad.

Uit de vergelijking wordt geconcludeerd dat vergelijking (11) in ieder geval voldoende betrouwbaar in staat is om de afschuifsterkte van het aansluitvlak te beschrijven in het geval er geen verbindingswapening tussen de breedplaat en de druklaag aanwezig is.

7.4 Vergelijking berekeningsmethoden bij koppelwapening met geringe diameter

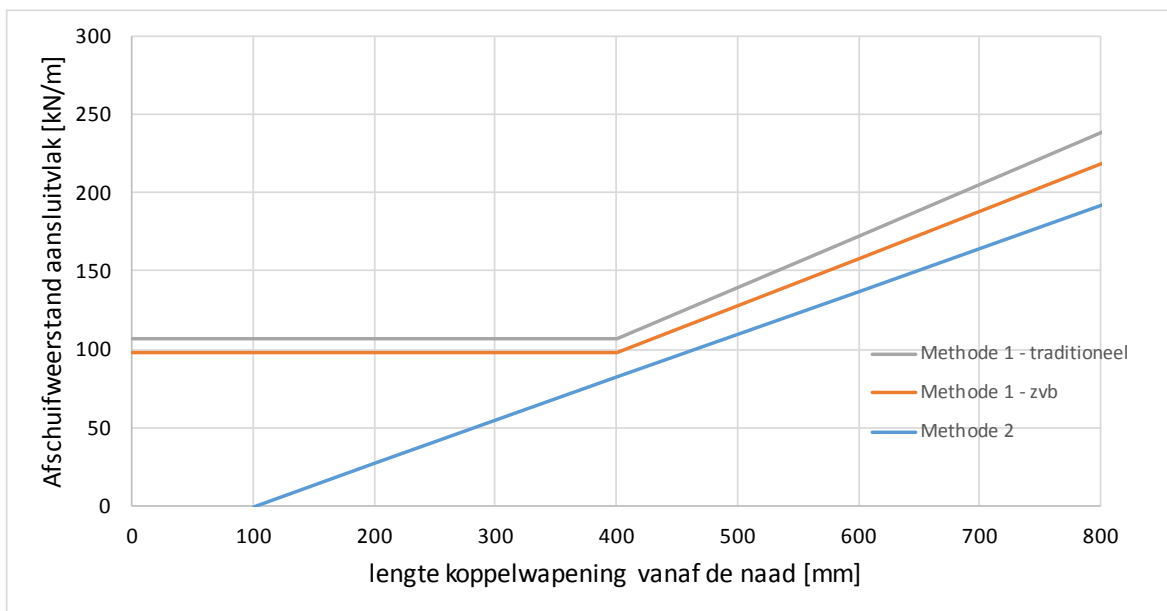
Hierna worden de resultaten van twee berekeningsmethoden voor het bepalen van de afschuifweerstand van het aansluitvlak, en zo voor de maximale trekkracht in de koppelwapening, met elkaar vergeleken.

Het eerste model, is het model dat in 5.5.2 is beschreven en waarbij naast de betonbijdrage ook de bijdrage van de tralieliggers (of andere verbindingswapening) is meegenomen. De betonbijdrage is beperkt door alleen het effectieve deel van het aansluitvlak mee te nemen, dit is het deel tussen het haft van de eerste tralieligger en het einde van de koppelwapening.

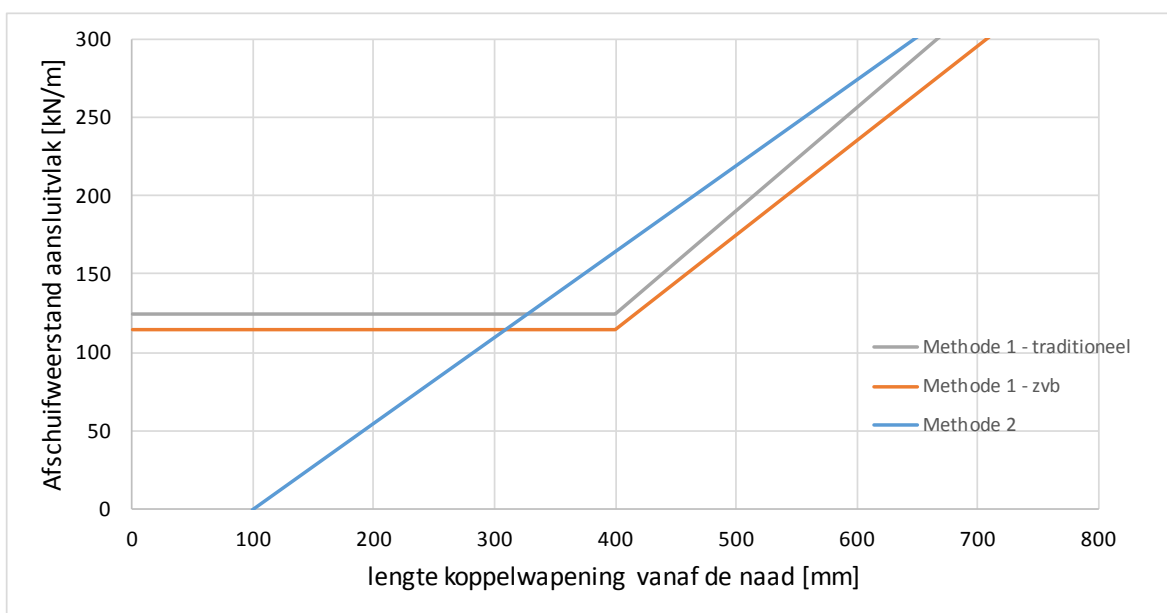
Uitgangspunt hierbij zijn tralieliggers met diagonalen met een diameter van 5 mm, een horizontale systeem maat van 200 mm (20 diagonalen per meter lengte) en een hoek α van 60° geplaatst op een afstand van 400 mm vanaf de naad. De totale staaldoorsnede is dan gelijk aan $393 \text{ mm}^2/\text{m}$.

Het tweede model is het model dat hiervoor in 7.3 is beschreven en waarbij alleen de bijdrage van het beton wordt beschouwd, rekening houdend met 100 mm gemiddelde delaminatie. De bijdrage van eventuele verbindingswapening wordt hier volledig verwaarloosd.

De resultaten van de vergelijking, uitgevoerd voor een laagste druksterkte van $f_{\text{ck}} = 30 \text{ MPa}$, is getoond in figuur 62 voor een glad oppervlak van de breedplaat en in figuur 63 voor een ruw, bewerkt oppervlak van de breedplaat.



figuur 62 Vergelijking van twee methoden voor de bepaling van de afschuifweerstand van het aansluitvlak bij een glad, niet bewerkt oppervlak



figuur 63 Vergelijking van twee methoden voor de bepaling van de afschuifweerstand van het aansluitvlak bij een ruw, bewerkt oppervlak

De horizontale lijn bij methode 1 geeft de weerstand van die ontleend wordt aan de tralieligger. De weerstand van het beton neemt pas toe bij een lengte van de koppelwapening gelijk aan 400 mm. Dit is de aangenomen afstand tot het hart van de eerste tralieligger. Pas bij staven langer dan 400 mm gaat het beton een bijdrage leveren. De beperking van het toepassingsgebied van methode 1, leidt er toe dat deze slechts toepasbaar is bij een lengte van de koppelwapening vanaf de naad gelijk aan 500 mm. Er mag dus geen capaciteit ontleend worden aan de bijdrage van het staal alleen zonder eisen te stellen aan de lengte van de koppelstaven.

Uit beide figuren blijkt dat beide methoden in het domein van Ø8 en Ø10 staven (lengte 500 tot 575 mm) bij de relevante lengten van de koppelstaven leiden tot een vergelijkbare waarde voor de afschuifweerstand van het aansluitvlak. Mede op basis hiervan wordt het acceptabel geacht het in 5.5.2 beschreven model voor het bepalen van de afschuifweerstand van het aansluitvlak toe te passen bij beperkte effectieve lengte van 100 mm. Getalswaarde van de afschuifweerstand die volgen uit het model zijn gegeven in tabel 22

tabel 22 Waarden van model 5.5.2 voor Ø8 en Ø10 bij een massieve breedplaatvloer

Staafdiameter		8	10
	$l_{\text{koppelstaaf}}$ [mm]	500	575
Traditioneel beton	Maximale kracht in koppelstaaf	[kN]	[kN]
C20/25	Glad	133	153
	Ruw	178	218
C30/37	Glad	139	164
	Ruw	190	239
ZVB	Maximale kracht in koppelstaaf	[kN]	[kN]
C20/25	Glad	122	141
	Ruw	163	200
C30/37	Glad	128	150
	Ruw	174	219
$l_{\text{koppelstaaf}}$ is halve lengte van de gehele koppelstaaf, lengte aan één zijde van de naad			

7.5 Voorstel voor aanpak van naden met geringe over te brengen trekkracht

Om beoordeling van de koppelwapening met een geringe diameter eenvoudig mogelijk te maken wordt getracht om aan te geven dat bij bepaalde configuraties van koppelwapening, zoals die zijn aangegeven op de beschikbare tekeningen, kan worden afgezien van een verdere rekenkundige toets.

De koppelwapening op tekening is praktisch gekozen of afgeleid van een rekenwaarde van het moment op die locatie ten gevolge van de fundamentele belastingscombinatie. Dit kan de fundamentele belastingscombinatie volgens NEN 6702 of volgens NEN-EN 1990 zijn. De belastingscombinaties voor veiligheidsklasse 3 van NEN 6702 en CC2 van NEN-EN 1990 zijn vergelijkbaar, met $\gamma_G = 1,2$ en $\gamma_Q = 1,5$.

De weerstand moet bij de bestaande constructie worden getoetst aan de fundamentele belastingscombinatie bij het afkeurniveau in NEN 8700, met $\gamma_G = 1,1$ en $\gamma_Q = 1,15$. Daarnaast mag de waarde van de veranderlijke belasting nog iets worden gereduceerd voor de beperkte referentieperiode van 15 jaar. Uitgaande van $y_0 = 0,5$ voor kantoorgebouwen, leidt dit volgens A.1.1(2) van de NB bij NEN-EN 1990 tot een reductiefactor van 0,93.

Voor twee situaties is een vergelijking gemaakt tussen de rekenwaarde van de gelijkmatige belasting bij nieuwbouw en bij bestaande bouw. De vergelijking is uitgezet voor verschillende vloerdik-ten, bij de volgende twee situaties:

- 1 een rustende belasting van 2,0 kN/m² en een in NEN-EN 1991-1-1 minimaal voorgeschreven veranderlijke vloerlast voor kantoren van 2,5 kN/m²;
- 2 een rustende belasting van 1,0 kN/m², voldoende voor een afwerkvloer van 50 mm, en een veranderlijke vloerlast van 4,0 kN/m².

De vergelijking is numeriek uitgewerkt in tabel 23. Daarin is voor beide situaties de verhouding be- paald tussen de rekenwaarde van de belasting bij bestaande bouw en nieuwbouw. Op basis van de tabel blijkt dat hiervoor een waarde van 0,82 aangehouden kan worden.

tabel 23 Vergelijking rekenwaarde van de belasting bij nieuwbouw en bestaande bouw (ni- veau afkeur)

h [mm]	Situatie 1				Situatie 2			
	p _Q = 2,5 kN/m ²				p _Q = 4,0 kN/m ²			
	p _G [kN/m ²]	p _d [kN/m ²]		ver- houding	p _G [kN/m ²]	p _d [kN/m ²]		ver- houding
nieuw- bouw		bestaande bouw	nieuw- bouw			bestaande bouw		
200	6,8	11,9	9,7	0,81	5,8	13,0	10,2	0,79
225	7,4	12,6	10,3	0,82	6,4	13,7	10,8	0,79
250	8,0	13,4	11,0	0,82	7,0	14,4	11,4	0,79
275	8,6	14,1	11,6	0,82	7,6	15,1	12,1	0,80
300	9,2	14,8	12,2	0,83	8,2	15,8	12,7	0,80
325	9,8	15,5	12,8	0,83	8,8	16,6	13,3	0,81
350	10,4	16,2	13,5	0,83	9,4	17,3	14,0	0,81
375	11,0	17,0	14,1	0,83	10,0	18,0	14,6	0,81
400	11,6	17,7	14,7	0,83	10,6	18,7	15,2	0,81

Op basis van deze verhouding is de weerstand in tabel 22 te verhogen. Als vervolgens wordt uitge- gaan van een rekenwaarde van de vloeigrens van 435 MPa, is de maximale hart-op-hart-afstand tussen de staven af te leiden. Deze waarden, afgerond op 5 mm, zijn gegeven in tabel 24.

tabel 24 Ondergrenswaarden voor hart-op-hart-afstand $\emptyset 8$ en $\emptyset 10$ koppelwapening bij mas-sieve breedplaatvloeren

		Staafdiameter	8	10
	$l_{\text{koppelstaaf}}$ [mm]		500	575
Traditio-neel be- ton	grenswaarde		[mm]	[mm]
C20/25	Glad		135	185
	Ruw		100	130
C30/37	Glad		130	170
	Ruw		95	115
ZVB	grenswaarde		[mm]	[mm]
C20/25	Glad		145	200
	Ruw		110	140
C30/37	Glad		140	185
	Ruw		105	130

Uit de tabel blijkt dat het onderscheid tussen C20/25 en C30/37 beperkt is. Als wordt geanticipeerd op enige doorgroei van de druksterkte van de druklaag – in het algemeen het onderdeel met de laagste druksterkte – is het acceptabel om voor de grenswaarden uit te gaan van de waarden die hier voor C30/37 zijn beschreven.

Hierna zijn in tabel 25 ook ondergrenswaarden gegeven voor $\emptyset 8$ en $\emptyset 10$ koppelwapening in het geval gewichtsbesparende elementen in de druklaag zijn aangebracht. Hierbij is aangenomen dat door de gewichtsbesparende elementen het effectieve oppervlak van het aansluitvlak met 20% is gereduceerd.

tabel 25 Ondergrenswaarden voor hart-op-hart-afstand $\emptyset 8$ en $\emptyset 10$ koppelwapening bij breed-plaatvloeren met gewichtsbesparende elementen

		Staafdiameter	8	10
	$l_{\text{koppelstaaf}}$ [mm]		500	575
Traditio-neel be- ton	grenswaarde		[mm]	[mm]
C30/37	Glad		135	185
	Ruw		100	130
ZVB	grenswaarde		[mm]	[mm]
C30/37	Glad		150	200
	Ruw		110	140

Tot slot wordt het volgende opgemerkt. Vanwege het brosse gedrag bij bezwijken in het geval er geen aansluitvlak door kruisende wapening aanwezig is en het zeer beperkt ductiele gedrag indien deze wapening wel aanwezig is, wordt er voor gekozen om de werkwijze waarbij op basis van de aanwezige configuratie van de koppelwapening van een verdere toets af te zien, uitsluitend toe te staan bij statisch onbepaalde vloervelden en constructies die niet behoren tot CC3. Dit is mede ook ingegeven door de beperkte marge tussen de rekenwaarde van de belasting bij de beoordeling van

bestaande CC3 constructies en de rekenwaarde van de belasting bij het ontwerp van deze constructies bij veiligheidsklasse 3 van NEN 6702.

7.6 Mogelijke voortzetting van het experimentele onderzoek

Op verzoek van de gehele klankbordgroep zal, in de periode na het uitbrengen van dit rapport, gewerkt aan een onderzoeksplan voor het uitvoeren van aanvullend experimenteel onderzoek. Dit onderzoek zal vooral gericht zijn op de situatie waarbij koppelwapening met kleine diameters en relatief korte lengte is toegepast. Het doel van het onderzoek zal zijn om, zo mogelijk, een onderbouw te vinden voor hogere grenswaarden dan die hiervoor in tabel 22 zijn beschreven.

Ten behoeve van dit plan zal eerst nader worden geïnventariseerd hoe het kritische detail bij toepassing van koppelstaven met kleine diameters bij verschillende projecten is uitgevoerd en zal vervolgens een proefopzet worden beschreven waarbij met deze specifieke uitvoeringen, maar ook met de mogelijkheid van het optreden van enige delaminatie rekening is gehouden.

Als het onderzoek wordt uitgevoerd, zal er naar worden gestreefd voor het einde van 2019 aanvullende informatie voor de beschreven situaties beschikbaar te hebben.

8 Nuanceringen bij het beoordelen van de constructieve veiligheid

8.1 Algemeen

De hiervoor uitgewerkte rekenregels voor het bepalen van de rekenwaarde van de weerstand van bestaande breedplaatvloeren in het geval er sprake is van een primaire – voor het verkrijgen van evenwicht noodzakelijke – krachtsoverdracht over de naden tussen de breedplaatvloeren, zijn gebaseerd op de uitgangspunten die worden gehanteerd bij het beoordelen voor bestaande constructies volgens NEN 8700.

Bij de in die norm gehanteerde methodiek wordt bij het beoordelen van een bestaande constructie uitgegaan van een lager veiligheidsniveau dan gebruikelijk is bij het ontwerpen van nieuwbouwconstructies. Dit lagere veiligheidsniveau is gekozen omdat er minder onzekerheden zijn over de feitelijk aanwezige afmetingen en materiaaleigenschappen en omdat het relatief snel afkeuren van bestaande constructies leidt tot relatief hoge herstelkosten die maatschappelijk minder wenselijk zijn.

De partiele factoren in de Eurocode voor nieuwbouw in gevolgklasse CC2 komen overeen met de betrouwbaarheidsindex $\beta = 3,8$ voor een periode van 50 jaar. Voor de beoordeling van bestaande constructies is dit verlaagd naar $\beta = 2,5$ voor een periode van 15 jaar. De bij deze eis behorende kans is $P(\text{falen}) = \Phi(-\beta) = 0,006$.

Het lagere veiligheidsniveau wordt verkregen door in de toets waarbij de rekenwaarde van het effect van de belastingen wordt vergeleken met de rekenwaarde van de weerstand van de constructie, de rekenwaarde van het effect van de belastingen te verlagen. Dit wordt bereikt doordat in NEN 8700 voor het beschrijven van de fundamentele belastingscombinatie lagere partiële factoren voor de belastingen voor zijn geschreven dan in NEN-EN 1990 en daarbij ook de referentieperiode, die mede bepalend is voor de grootte van de veranderlijke belastingen, te beperken tot een minimum van 15 jaar.

De rekenwaarde voor de weerstand van de constructie wordt daarbij op hetzelfde niveau gehouden als bij nieuwbouw gebruikelijk is. Dat wil zeggen dat het betrouwbaarheidsniveau dat in de materiaalgelinkte Eurocodes, zoals NEN-EN 1992-1-1 Eurocode 2, voor de weerstand van een constructie is beschreven, wordt aangehouden. Dat is hiervoor in paragraaf 5.5, bij de bepaling van de rekenwaarde van de weerstand ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten, ook aangehouden.

Vanwege de hoge maatschappelijke kosten die bij een omvangrijke versterkingsoperatie zullen ontstaan, is het wenselijk dat afkeuring beperkt blijft tot die gevallen waar het echt vanuit risico-oogpunt onvermijdelijk is. Daarom wordt in dit hoofdstuk nader ingegaan op de gevolgen van het bezwijken van een deel van een breedplaatvloer en worden op die wijze enkele overwegingen gegeven voor een nadere risicoanalyse, die gebruikt kan worden bij situaties waarbij de eisen van NEN 8700 maar net worden overschreden. Op basis van een door specialist uitgevoerde risicoanalyse kan mogelijk beoordeeld worden dat in de beschouwde situatie toch aan het vereiste veiligheidsniveau wordt voldaan.

Bij de beoordeling van het risico moet gekeken worden naar de kans dat een gebeurtenis optreedt en de gevolgen van deze gebeurtenis. Het risico is het grootst als zowel de kans als de gevolgen relatief groot zijn.

8.2 Type en functie van het gebouw

Het is duidelijk dat de omvang en de functie van het gebouw waarin de constructie zich bevindt, van invloed is op de gevolgen van het bezwijken. Dit onderscheid wordt in de eisen voor constructies reeds onderkend door onderscheid te maken tussen verschillende gevolgklassen. In de voorschriften kennen we drie gevolgklassen: CC1, CC2 en CC3.

Constructies worden ingedeeld in CC1 als de gevolgen van het bezwijken gering zijn. Voorbeelden van gebouwen met constructies die in CC1 zijn ingedeeld, zijn bijvoorbeeld woningen en industriegebouwen van één of twee bouwlagen hoog.

Opgemerkt wordt dat CC1 nog verder onderverdeeld kan worden in CC1a en CC1b, waarbij constructies in CC1a mogen worden ingedeeld als verlies van mensenlevens is uitgesloten, en CC1b waarbij dit niet het geval is.

In het geval dat het bezwijken van een constructie leidt tot grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens en/of zeer grote economische schade moet de constructie zijn ingedeeld in CC3. Voorbeelden van gebouwen die moeten zijn ingedeeld in CC3 zijn gebouwen die hoger zijn dan 70 meter en ziekenhuizen of verzorgingshuizen van 4 bouwlagen of meer.

Een nadere definiëring van deze klassen bij het beoordelen van bestaande constructies is beschreven in bijlage B van NEN 8700. Het onderscheid tussen de verschillende gevolgklassen resulteert via een onderscheid in de grootte van de partiële factoren voor de belastingen in een verschillend niveau voor de rekenwaarde van het effect van de belasting.

Opgemerkt wordt dat constructies die zijn vergund voor april 2012 zijn ontworpen volgens de veiligheidsklasse indeling van NEN 6702. De hoogste veiligheidsklasse daarbij was veiligheidsklasse 3. Het belastingsniveau dat bij die veiligheidsklasse van toepassing was, is gelijk aan het niveau dat nu voor CC2 wordt aangehouden. Dit leidt ertoe dat bestaande constructies die nu voor de beoordeling ingedeeld worden in CC3, maar die vergund zijn voor april 2012 ontworpen zijn voor een relatief laag veiligheidsniveau. De marge tussen het belastingsniveau dat gold bij het ontwerp en het belastingsniveau dat moet worden aangehouden bij de beoordeling van de bestaande constructie is in die gevallen relatief klein.

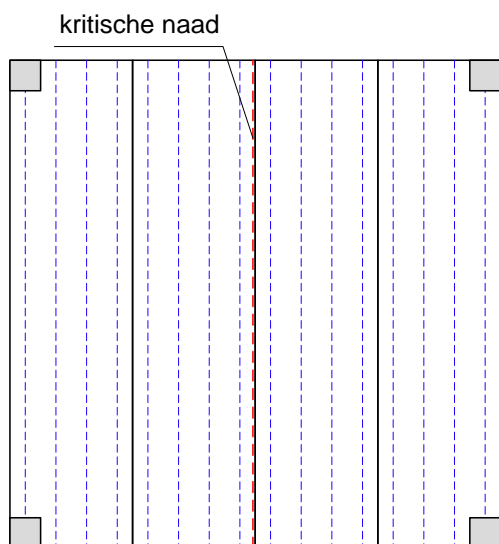
8.3 Type constructie en zijn gedrag bij het falen van het kritische vloerdetail

8.3.1 Inleiding

De gevolgen van het verlies van weerstand tegen positieve momenten in een puntvormig ondersteunde breedplaatvloer ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten zullen variëren bij de verschillende typen constructies. Hierbij speelt mee of een bepaalde constructie een statisch bepaalde constructie dan wel een statisch onbepaalde constructie betreft. Ook is van belang of het bezwijken van een beperkt deel van de vloer zich zal zetten over de gehele breedte van het vloerveld of dat er in de betreffende doorsnede een element aanwezig is met een hogere en meer ductiele weerstand.

8.3.2 Tafelconstructie

Een tafelconstructie, waarbij een enkel vloerveld wordt ondersteund door vier kolommen, is, als de inklemmingsweerstand van de kolommen wordt verwaarloosd, een voorbeeld van een statisch bepaalde constructie. Het bovenaanzicht van de constructie uit een enkel plaatveld, uitgevoerd als breedplaatvloer, ondersteund door 4 kolommen is geschetst in figuur 64.

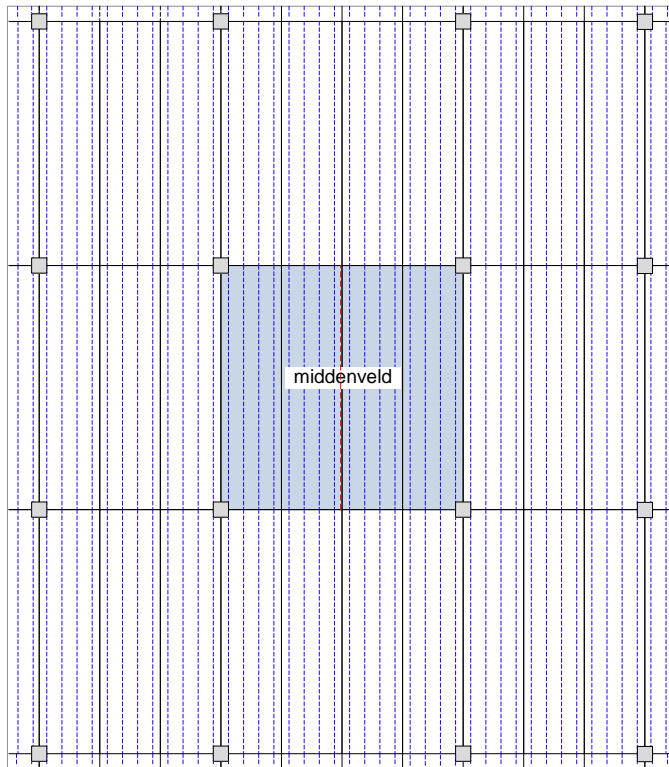


figuur 64 Enkel plaatveld ondersteund door 4 kolommen

Als bij deze constructie de maximale momentweerstand ter plaatse van de kritische naad wordt bereikt, is er geen enkele mogelijkheid om een weg te vinden voor een alternatieve belastingsafdracht en zo opnieuw een evenwichtssituatie te vinden. Het vloerveld zal na een beperkte waarschuwing, de mate waarin is afhankelijk van de ductiliteit van de betreffende doorsnede, bezwijken hetgeen tot grote risico's leidt voor de mensen die zich in de nabijheid van de vloer bevinden.

8.3.3 Middenveld van een puntvormig ondersteunde vloer

Bij een middenveld van een puntvormig ondersteunde vloer is er aan alle zijden van het beschouwde plaatveld sprake van een aangrenzend vloerveld, zie figuur 65. Dit leidt ertoe dat ter plaatse van de overgang tussen de aansluitende plaatvelden, ter plaatse van de stramienlijnen, relatief grote negatieve (steunpunts)momenten aanwezig zijn. De positieve momenten in het midden van het plaatveld zijn in dat geval fors kleiner dan bij de hiervoor beschreven tafelconstructie.

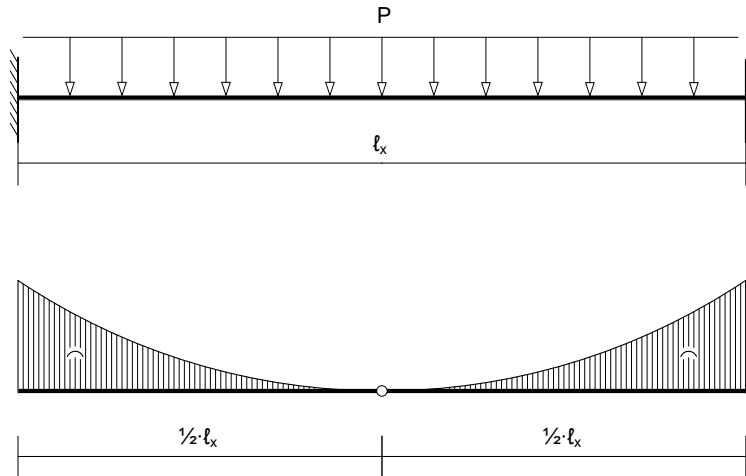


figuur 65 Middenveld van een grotere puntvormig ondersteunde vloer

Bij een ontwerp volgens de lineaire-elasticiteitstheorie zijn in de hiervoor geschetste situatie de steunpuntsmomenten over de lengte van de vloer gelijk aan $\frac{1}{12} p_d l_y l_x^2$ en de veldmomenten gelijk aan $\frac{1}{24} p_d l_y l_x^2$, waarbij:

- p_d is de grootte van de gelijkmatig verdeelde vloerbelasting;
- l_y is de breedte van de vloer bij de beschouwde overspanning;
- l_x is de lengte van de beschouwde vloeroverspanning.

Als bij deze constructie de maximale momentweerstand ter plaatse van de naad wordt bereikt, zal het negatieve moment ter plaatse van de steunpunten nog kunnen toenemen. In het extreme geval dat de momentweerstand in het midden van de vloer geheel is teruggevallen tot 0, en er geen voorwaarden meer zijn voor de rotatiecapaciteit ter plaatse van het detail, kan, onder voorwaarde dat de dwarskracht- en ponsweerstand voldoende is, een evenwichtssituatie worden gevonden als het steunpuntsmoment kan toenemen tot $\frac{1}{8} p_d l_y l_x^2$.



figuur 66 Momentverdeling in middenveld na het wegvallen van de momentweerstand in het midden van de overspanning

Het steunpuntsmoment neemt in deze situaties, bij eenzelfde belasting, dus met 50% toe. Om de gevolgen van het wegvallen van de momentweerstand te kunnen weerstaan moet worden nagegaan of de vloer bij de steunpunten, op de stramienlijnen, deze 50% hogere momenten kan weerstaan. Aanvullend moet worden nagegaan of het negatieve moment over de gehele lengte van de overspanning kan worden weerstaan.

Er zijn een aantal redenen waardoor het aannemelijk mag worden geacht dat in het geval van een middenveld, de vloer inderdaad in staat is deze momenten te weerstaan. Deze redenen zijn:

- er is een marge tussen de ontwerpbelasting en de belasting die aanwezig is op het moment van falen van het kritische vloerdetail; uitgaande van nieuwbouw volgens CC2 (of vk3) en bestaande bouw CC2, is bij de in paragraaf 7.5 beschreven situaties deze laatste belasting bij een vloerdikte van 300 mm gelijk aan 78% van de rekenwaarde van de belasting;
- er is een marge tussen de rekenwaarde van de sterkte van de wapening, bepalend voor de momentweerstand in een reguliere constructie van gewapend beton, en de feitelijke sterkte van de wapening; de rekenwaarde van de sterkte van de wapening is 87% van de karakteristieke sterkte en circa 80% van de gemiddelde sterkte.

Relevant is in welke mate in het geval van een alternatieve belastingsafdracht door een toename van het steunpuntsmoment en verwaarlozing van de momentweerstand in het veld, voldaan wordt aan de eisen voor bestaande bouw.

Dit wordt hierna verder beschouwd op basis van de twee in paragraaf 7.5 eerder beschreven situaties. Daarbij is afgeleid dat de rekenwaarde van de belasting bij een toets voor bestaande bouw gelijk is aan 82% van de rekenwaarde van de belasting bij een toets volgens nieuwbouw.

Op basis hiervan kan de verhouding tussen de minimaal benodigde weerstand van het steunpuntsmoment bij een beoordeling voor bestaande bouw ($M_{Rd,bb}$) en bij een beoordeling voor nieuwbouw ($M_{Rd,bb}$) worden bepaald:

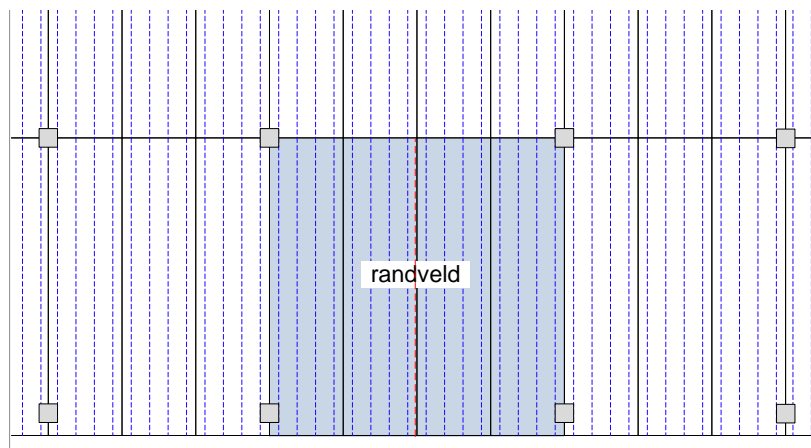
$$M_{Rd,nb} \geq 1/12 p_{d,nb} l_y l_x^2 = 0,083 p_{d,nb} l_y l_x^2.$$

$$M_{Rd,bb} \geq 1/8 p_{d,bb} l_y l_x^2 = 0,125 \cdot 0,82 p_{d,nb} l_y l_x^2 = 0,103 p_{d,nb} l_y l_x^2.$$

$$\frac{M_{Rd,bb}}{M_{Rd,nb}} = \frac{0,103}{0,083} = 1,24$$

Uit deze verhouding van 1,24 blijkt dat de alternatieve belastingsafdracht niet zonder meer voldoet aan de eisen van de fundamentele belastingscombinatie bij bestaande bouw. Echter in geval van een mogelijke verlaging van de veranderlijke last in combinatie met enige overdimensionering van de steunpuntswapening is niet uit te sluiten dat bij deze alternatieve belastingsafdracht wel wordt voldaan aan de eisen voor bestaande bouw. Als net niet wordt voldaan, geeft mogelijk een nadere risico-analyse waarbij op basis van probabilistiek de kansen van beide situaties worden beschouwd, mogelijk een oplossing om de bestaande situatie te accepteren.

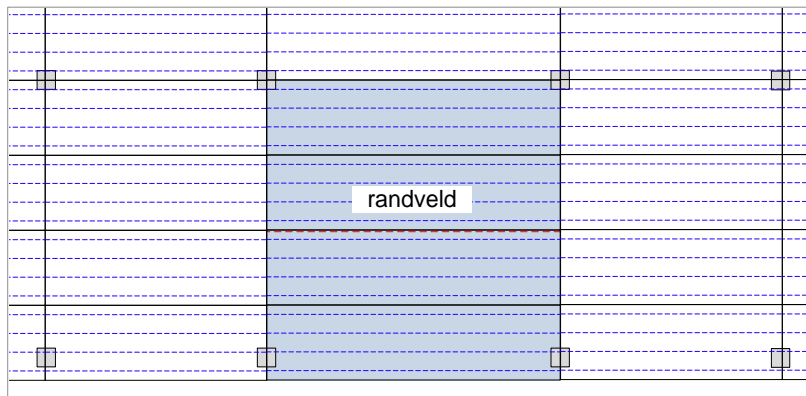
De voorgaande overweging kan ook gehouden worden voor een randveld waarbij de langsnaden tussen de breedplaten in de richting loodrecht op de rand zijn georiënteerd, zie figuur 67.



figuur 67 Een randveld waarbij de plaatnaden loodrecht op de rand zijn georiënteerd

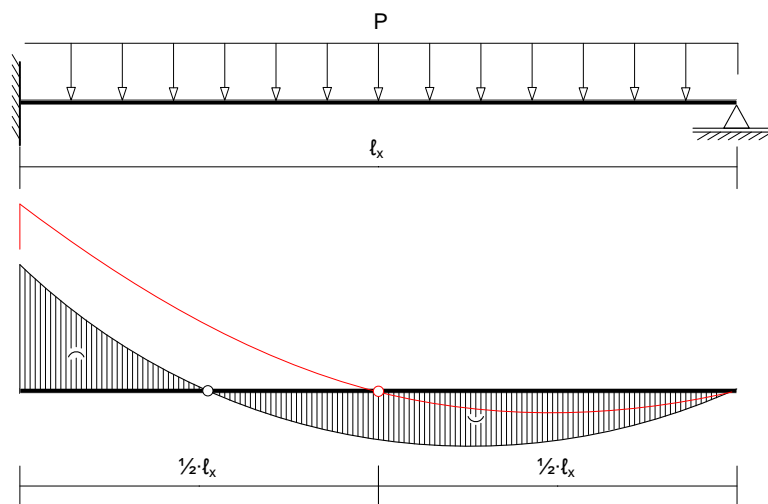
8.3.4 Eindveld van een puntvormig ondersteunde vloer en

In het geval dat de langsnaden tussen de breedplaten bij een eindveld evenwijdig aan de plaatrand liggen, zie figuur 68 is voorgaande overweging niet meer zonder meer toepasbaar.



figuur 68 Een randveld waarbij de plaatnaden evenwijdig aan de rand zijn georiënteerd

Als in het veld de momentweerstand van het detail wordt bereikt, zal vanwege de beperkte rotatiecapaciteit de momentweerstand snel terugvallen. Hierna wordt aangenomen dat in het veld de momentweerstand terugvalt tot nul, waarbij wel een overdracht van dwarskrachten mogelijk blijft. De grootte van het steunpuntsmoment kan dan worden bepaald met het schema dat in figuur 69 is aangegeven.



figuur 69 Momentverdeling in eindveld na het wegvallen momentweerstand in het veld

De grootte van het steunpuntsmoment wordt bepaald door het evenwicht van het linker deel, waarbij de dwarskracht in het veld zorgt voor een forse toename van het steunpuntsmoment:

$$M_{Rd,bb} \geq \frac{1}{8} p_{d,bb} l_y l_x^2 + V_v l_y l_x / 2 = \frac{1}{8} p_{d,bb} l_y l_x^2 + \frac{1}{4} p_{d,bb} l_y l_x l_x / 2 = \frac{1}{4} p_{d,bb} l_y l_x^2 = 0,20 p_{d,nb} l_y l_x^2$$

Bij het ontwerp zal het steunpuntsmoment gelijk zijn aan $\frac{1}{10}$ tot $\frac{1}{8} p_d l^2$. Hierna wordt aangenomen dat het steunpuntsmoment over de breedte van het veld gelijk is aan:

$$M_{Rd,nb} \geq 0,11 p_{d,nb} l_y l_x^2$$

Op basis van dezelfde vergelijking als bij het hiervoor beschreven middenveld kan de verhouding tussen het steunpuntsmoment na het wegvallen van de capaciteit en het steunpuntsmoment volgens het ontwerp worden bepaald:

$$\frac{M_{Rd,bb}}{M_{Rd,nb}} = \frac{0,20}{0,11} = 1,81$$

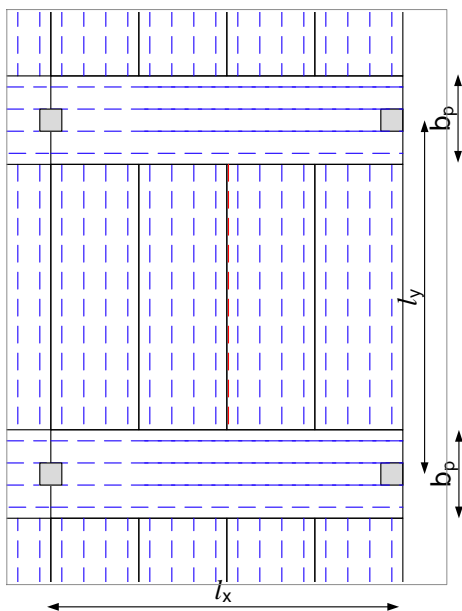
De waarde voor de verhouding tussen de momenten is fors groter dan bij een middenveld. Een verhouding van 1,81 kan niet geheel worden opgenomen door verlaging van de veranderlijke last en de eventueel aanwezige overgedimensioneerde steunpuntwapening. Het zal niet mogelijk zijn dat een alternatieve belastingsafdracht wordt gevonden die voldoet aan de eisen voor bestaande bouw.

Vanwege de geringe marge tussen de voorgeschreven belasting bij het toetsen van de bestaande constructie en de karakteristieke belasting, is het op basis van deze verhouding ook aannemelijk dat de constructie van het eindveld zal bezwijken, als het kritische detail faalt. Wel is het aannemelijk dat gelet op de capaciteit van het steunpunt er wel sprake zal zijn van enig waarschuwend gedrag.

Een gelijk gedrag zal gevonden kunnen worden als een hoekveld wordt beschouwd. Dit onafhankelijk van de oriëntatie van de breedplaten.

8.3.5 Eindveld met specifieke breedplaatindeling

Als de breedplaatindeling van het beschouwde eindveld is zoals geschetst in figuur 70, zal na het bereiken van de momentweerstand ter plaatse van de langsnaad tussen de breedplaten in het midden van het veld, de rotatie van de doorsnede in het veld enigszins beperkt blijven doordat een snelle toename van de rotatie verhinderd wordt door de wapening in de breedplaten die tussen de kolommen overspannen.



figuur 70 Eindveld met specifieke breedplaatindeling

Hierna wordt het gedrag van dit vloerveld beschouwd bij het bereiken van de maximale momentweerstand bij het detail. Hiervoor is ingegaan op de aanwezige momentweerstand volgens het ontwerp:

$$\begin{aligned} \text{ter plaatse van het steunpunt:} & \quad M_{R_s} = 0,11 p_{d,nb} l_y l_x^2 \\ \text{ter plaatse van het veld:} & \quad M_{R_v} = 0,07 p_{d,nb} l_y l_x^2 \\ & \quad m_{R,v} = 0,07 p_{d,nb} l_x^2 \end{aligned}$$

$$\text{de momentensom is gelijk aan:} \quad \Sigma M_{R,ont} = 0,125 p_{d,nb} l_y l_x^2$$

Aangenomen wordt dat de momentweerstand ter plaatse van het detail gelijk is aan ηm_{R_v} . Waarbij η de factor voor de gereduceerde momentweerstand is vanwege de gebrekkige detaillering en m_{R_v} is de volgens het ontwerp benodigde momentweerstand in het veld per meter breedte.

Als wordt aangenomen dat de momentweerstand in het veld gelijkmatig is verdeeld over de gehele breedte dan kan de momentweerstand in het veld voor het beschouwde eindveld, rekening houdend met het gebrek bij het kritische detail, bij een beoordeling voor de bestaande bouw als volgt kunnen worden beschreven:

$$M_{R_v,bb} = \eta m_{R_v} (l_y - b_p) + m_{R_v} b_p$$

Als wordt gesteld dat:

$$\alpha_p = b_p / l_y$$

dan kan de momentweerstand in het veld als volgt worden uitgedrukt:

$$\begin{aligned} M_{R_v,bb} &= m_{R_v} l_y (\eta + (1-\eta)\alpha_p) \\ &= 0,07 (\eta + (1-\eta)\alpha_p) p_{d,nb} l_y l_x^2 \end{aligned}$$

De som van de momentenweerstand van het vloerveld inclusief het gebrek kan vervolgens worden uitgedrukt als functie van de rekenwaarde van de vloerbelasting, de overspanningen en de factoren η en α_p :

$$\begin{aligned} \Sigma M_{R,geb} &= \frac{1}{2} M_{R_s} + M_{R_v,geb} \\ &= \frac{1}{2} 0,11 p_{d,nb} l_y l_x^2 + 0,07 (\eta + (1-\eta)\alpha_p) p_{d,nb} l_y l_x^2 \\ &= [0,055 + 0,07(\eta + (1-\eta)\alpha_p)] p_{d,nb} l_y l_x^2 \end{aligned}$$

De momentensom bij een beoordeling bestaande bouw, in de situatie dat het mechanisme is gestart is gelijk aan:

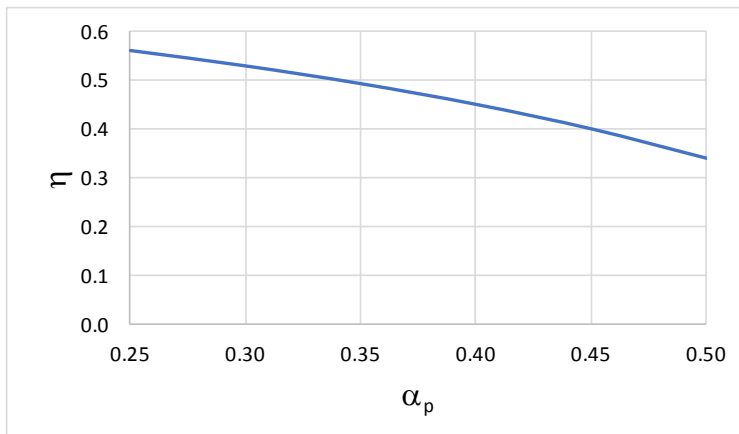
$$\Sigma M_{Ed,bb} = 0,125 p_{d,bb} l_y l_x^2 = 0,125 \cdot 0,82 p_{d,nb} l_y l_x^2 = 0,102 p_{d,nb} l_y l_x^2$$

Uit gelijkstelling van beide momentensommen is een relatie af te leiden tussen de factoren η en α_p . waarbij nog zou kunnen worden voldaan aan de eisen voor bestaande bouw:

$$\eta = \frac{\alpha_p - 0,67}{\alpha_p - 1}$$

In de grafiek in figuur 71 is deze verhouding grafisch weergegeven. Hieruit blijkt dat bij reële strokenbreedte van 30% van de stramenmaat het mogelijk is om bij een forse reductie van de moment-

weerstand van het kritische detail, bij deze specifieke breedplaatindeling toch een belastingsafdracht te vinden waarbij de constructie waarschijnlijk zal voldoen aan de eisen voor bestaande bouw. In deze situatie dienen aanvullend kritische naden wel te zijn getoetst op moment- en dwarskrachtweerstand.



figuur 71 Verhouding tussen de relatieve breedte van de strook (α_p) en de relatieve gereduceerde momentweerstand in het veld (η)

8.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk is een korte toelichting gegeven bij het beoordelen van constructies aan de eisen voor bestaande bouw volgens NEN 8700. Aangegeven is dat het veiligheidsniveau hierbij iets beperkt is ten opzichte van het bij nieuwbouw vereiste niveau. Hierbij moet worden opgemerkt dat het verschil tussen constructies die zijn ontworpen voor veiligheidsklasse 3 in NEN 6702 en nu beoordeeld moeten worden voor CC3, beperkt is.

Ook is het constructief gedrag van een aantal vloervelden met verschillende randvoorwaarden beschouwd nadat het kritische vloerdetail gefaald heeft. Hieruit volgt dat een statisch bepaalde constructie zal bezwijken en dat ook bij constructies die enkelvoudig statisch onbepaald zijn, zoals een hoekveld of een randveld waarbij de langsnaden parallel lopen aan de vloerrand onvoldoende capaciteit aanwezig is om een alternatieve afdracht van de belasting mogelijk te maken. Een uitzondering hierop wordt gevonden bij een ideaal middenveld en een randveld waarbij de plaatnaden in de richting loodrecht op de vloerrand aanwezig zijn. In die situaties is een alternatieve belastingsafdracht mogelijk, die eventueel aan de eisen voor bestaande bouw voldoet.

Dit laatste is zeker het geval bij een specifieke breedplaatindeling, zoals beschreven in paragraaf 8.3.5. Vanwege de doorgaande breedplaten naast de kritische naad, is het mogelijk om de kromming bij het kritische vloerdetail beperkt te houden en zodoende gebruik te blijven maken van de gereduceerde momentweerstand bij het kritische detail.

Tot slot wordt opgemerkt dat in het geval zowel bij de reguliere belastingsafdracht als bij de alternatieve belastingsafdracht juist niet aan de eisen voor bestaande bouw wordt voldaan, een mogelijke oplossing kan worden gevonden door het uitvoeren van een risicoanalyse waarbij door een probabilistische benadering getracht kan worden om aan te tonen dat de gecombineerde kans op bezwijken voldoende klein is.

9 Concept voor aanbevelingen voor rekenregels voor de beoordeling van bestaande constructies

9.1 Stappenplan, bepalingmethoden en rekenregels

Op basis van het beschouwen van de ontwikkeling in de tijd van het toepassen van breedplaatvloeren als een constructie met in twee richtingen een primaire krachtafdracht, het toepassen van 'moderne' betonmengsels, het achterwege laten van het opruwen van de breedplaatvloeren en het gebouwtype waarin deze constructies worden toegepast, wordt geadviseerd met name bestaande breedplaatvloerconstructies in utiliteitsgebouwen die zijn opgeleverd na 1999 te beoordelen. Voorbeelden van utiliteitsgebouwen zijn kantoren, ziekenhuizen, schoolgebouwen en parkeergarages.

Gelijk aan de aanpak bij de eerste risico beoordeling eind 2017 wordt ook nu een stappenplan geïntroduceerd. Dit stappenplan is geschetst in figuur 73. Het stappenplan is een leidraad voor een gestructureerde manier om de beoordeling van bestaande breedplaatvloerconstructies volgens de aanbeveling uit te voeren. Het toetsen van deze constructies volgens een andere procedure, maar met in achtname van de bepalingmethoden en rekenregels beschreven in respectievelijk stap 5 en stap 6, is zeker toegestaan.

De opzet van het stappenplan is zo dat de inspanning die benodigd is om relevante informatie te verzamelen gefaseerd is en dat tussen de verschillende fasen beoordelingspunten zijn ingevoegd om na te gaan of een vervolg van het onderzoek noodzakelijk is. Tot en met de eerste toets kunnen de werkzaamheden worden uitgevoerd door een bouwtechnisch adviseur. Bij het verder doorlopen van het stappenplan is het noodzakelijk dat een constructeur wordt ingeschakeld.

Hierna wordt een toelichting gegeven bij het stappenplan.

Stap 1 - Verzamelen van eerste informatie

Om inzicht te krijgen in de constructieve opzet, het type vloer dat is toegepast en te kunnen beoordelen of in de vloer het kritische vloerdetail aanwezig kan zijn, moet eerst relevante informatie worden verzameld.

De meeste relevante informatie zal zijn opgenomen op tekeningen van de vloerconstructie. Informatie over de constructieve opzet, het bouwjaar van het gebouw en over het eventueel aanwezig zijn van breedplaatvloeren in het gebouw kan worden ontleend aan de tekeningen van de constructie die door de constructeur zijn vervaardigd. Het verdient aanbeveling om de conclusies op basis van de tekeningen te verifiëren middels een observatie in het gebouw. Het is namelijk mogelijk dat in een late fase van het ontwerp alsnog gekozen is voor een ander vloersysteem dan bijvoorbeeld op de besteks- of DO-tekeningen is getekend.

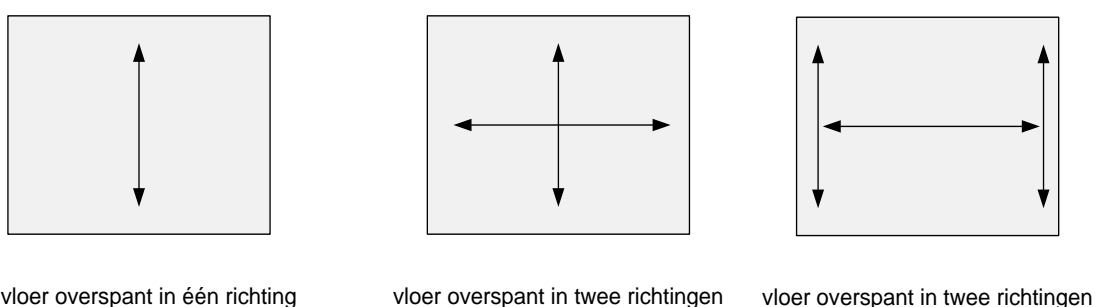
Als de tekeningen niet in het bezit zijn van de eigenaar van het gebouw, kunnen zij mogelijk worden gevonden in het archief van de gemeentelijke diens van Bouw- en Woningtoezicht, bij de aannemer of de constructeur.

Of breedplaatvloeren zijn toegepast en de wijze waarop, kan ook worden bepaald door een observatie in het gebouw uit te voeren. Bij het gebruik van breedplaatvloeren zijn aan de onderzijde van de vloer vaak naden zichtbaar met een hart-op-hart-afstand van 2,4 meter of meer. Bij een hart-op-hart-afstand tussen de naden van 1,2 meter is er in het algemeen sprake van een kanaalplaatvloer.

Als de onderzijde van de constructieve vloer duidelijk zichtbaar is (de vloer aan de onderzijde dus niet is voorzien van stucwerk of een andere afwerking) en er geen naden zichtbaar zijn, dan is de vloer geheel ter plaatse gestort.

Het kritische vloerdetail komt voor daar waar in breedplaatvloeren ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten sprake is van een primaire krachtsoverdracht. Dit kan het geval zijn bij breedplaatvloeren die in twee richtingen de belasting afdragen of bij vloeren die in één richting dragen en waarbij de overspanning groter is dan de lengte van de toegepaste breedplaat zodat er aan het kopsse einde van de breedplaat krachten in de breedplaatvloer overgedragen moeten worden.

Of er sprake is van vloerconstructies die door de constructeur zijn beoogd in twee richtingen af te dragen kan worden ontleend aan op constructietekeningen van de vloeren aangegeven overspanningsrichtingen, zie figuur 72. Bij twijfel over dit aspect wordt geadviseerd advies in te winnen bij een constructeur.



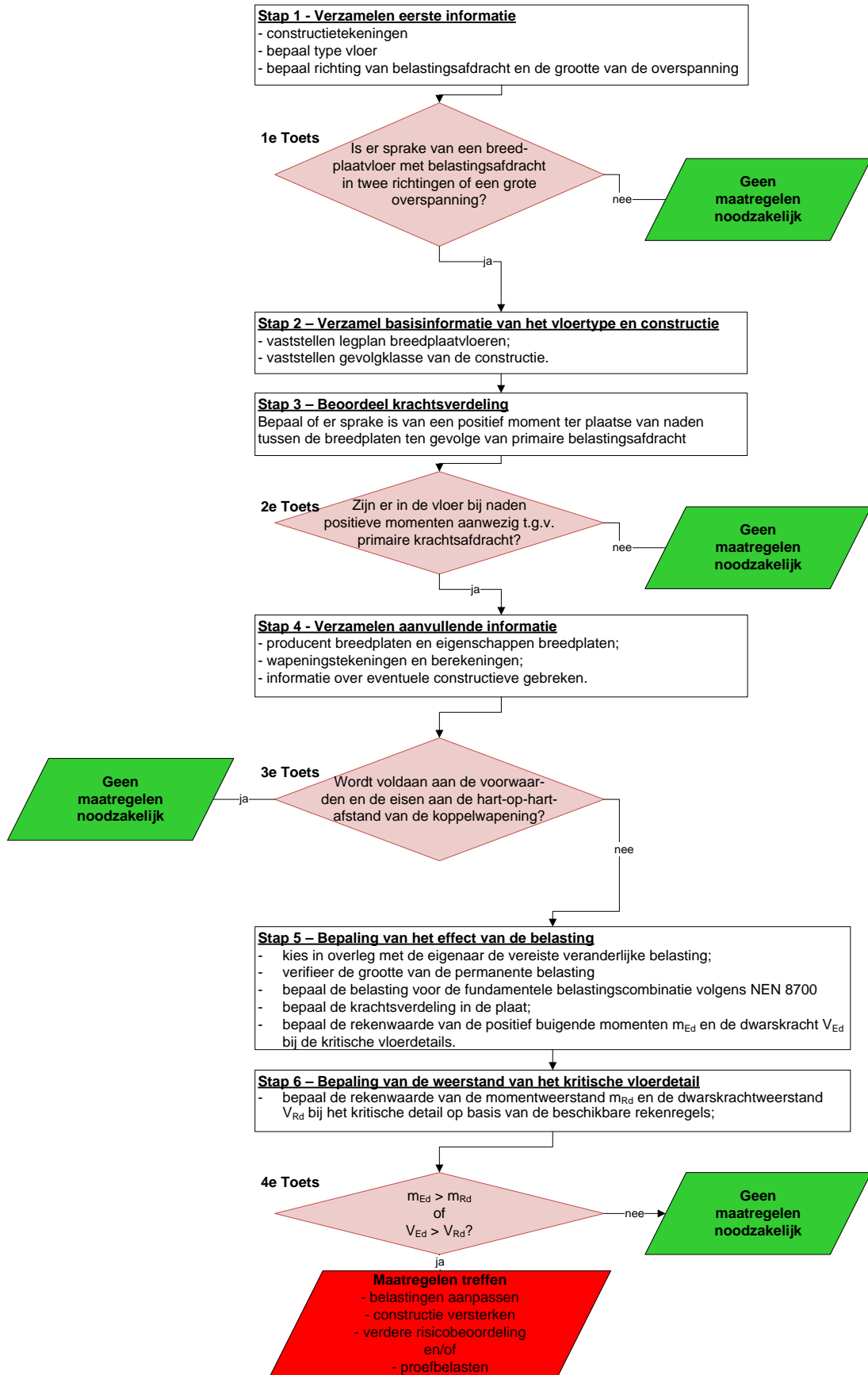
figuur 72 Indicatie van overspanningsrichting van een vloer op constructietekening

Verwacht mag worden dat bij breedplaatvloeren die in één richting overspannen en waarbij de overspanning korter is dan 10 meter, de toegepaste breedplaten voldoende lang zijn. Bij deze vloeren zal geen naad aanwezig zijn waarover een primaire krachtafdracht plaatsvindt.

1e Toets

De eerste toets is bedoeld om na te gaan of de beschouwde vloer een breedplaatvloer betreft waarin ter plaatse van de naden tussen de breedplaten een primaire krachtafdracht aanwezig kan zijn. Dit kan het geval zijn bij breedplaatvloeren die zijn ontworpen om in twee richtingen af te dragen of waarbij de overspanning groter is dan 10 meter.

Deze toets wordt gebruikt om vloeren van een ander type en breedplaatvloeren waarbij evident geen sprake is van een belastingsafdracht ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten uit te sluiten



figuur 73 Stappenplan voor het onderzoek naar constructieve veiligheid van breedplaatvloeren

Stap 2 - Verzamelen van basisinformatie van de breedplaatvloer en de constructie

Nadat duidelijk is dat de vloer ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten mogelijk krachten moet overdragen, moet dit meer gedetailleerd worden beschouwd. Hierbij moet worden nagegaan of de beschouwde primaire krachtsafdracht leidt tot positieve momenten ter plaatse van naden tussen twee breedplaten.

Met de primaire krachtsafdracht wordt bedoeld dat de grootte van de momentensom in de beschouwde richting niet kan worden verkleind door een herverdeling van de belastingsafdracht zodat de momentensom in de andere richting zal toenemen. Het kunnen weerstaan van de momentensom in de beschouwde richting is dus van essentieel belang voor het kunnen verkrijgen van een evenwichtssituatie.

Om te kunnen nagaan of er bij de naden sprake is van positieve momenten is het noodzakelijk dat de locaties van de naden tussen de breedplaten bekend zijn. Deze locaties kunnen worden afgeleid uit het zogenaamde legplan. Dit is een tekening van de plattegrond van de vloer waarop de indeling van de breedplaten is weergegeven. Als deze tekening niet beschikbaar is, kan het legplan worden bepaald door het uitvoeren van een observatie ter plaatse.

Bij het beoordelen van constructies wordt onderscheid gemaakt tussen constructies waarbij het bezwijken relatief geringe gevolgen heeft en constructies waarbij het bezwijken grote gevolgen heeft. Voor dit onderscheid worden constructies ingedeeld in gevolgklassen, CC1, CC2 en CC3. Deze indeling dient te worden gedaan op basis van de aanwijzingen in bijlage A van NEN 8700. Bij het toenemen van het nummer neemt de gevolgen van het bezwijken van de constructie toe.

Het is toegestaan om bij constructies die moeten zijn ingedeeld in een hoge gevolgklasse, bij het beschouwen van een enkel constructie-element, wanneer de gevolgen bij het bezwijken van dit element beperkt zijn, het betreffende element in een lagere gevolgklasse in te delen. Dit is bijvoorbeeld gangbaar bij het toetsen van gevelementen die geen verticale belasting dragen. Voor de hier beschouwde breedplaatvloeren wordt een verlaging van de gevolgklasse niet aanbevolen. Dit omdat het mogelijk is dat na het bezwijken van een enkele vloer, ten gevolge van de impact van deze vloer op de onderliggende vloer, de onderliggende vloer niet acceptabele schade oploopt.

Gebouwen die zijn vergund voor april 2012 zijn ontworpen op basis van een andere veiligheidsbeschouwing dan die nu, bij het ontwerp volgens NEN-EN 1990 of beoordeling volgens NEN 8700 wordt gebruikt. Constructies ontworpen volgens de TGB 1990 (NEN 6702) zijn wel ingedeeld in veiligheidsklassen, de indeling hiervan wijkt echter af van de indeling die nu in NEN 8700 wordt gebruikt. In dat kader wordt er op gewezen dat constructies die ontworpen zijn voor veiligheidsklasse 3 van NEN 6702 ingedeeld kunnen worden in CC2 of CC3. In het laatste geval is de marge tussen de tijdens het ontwerp aan gehouden rekenwaarde van de belastingen en de nu, bij de beoordeling aan te houden rekenwaarde van de belastingen beperkt.

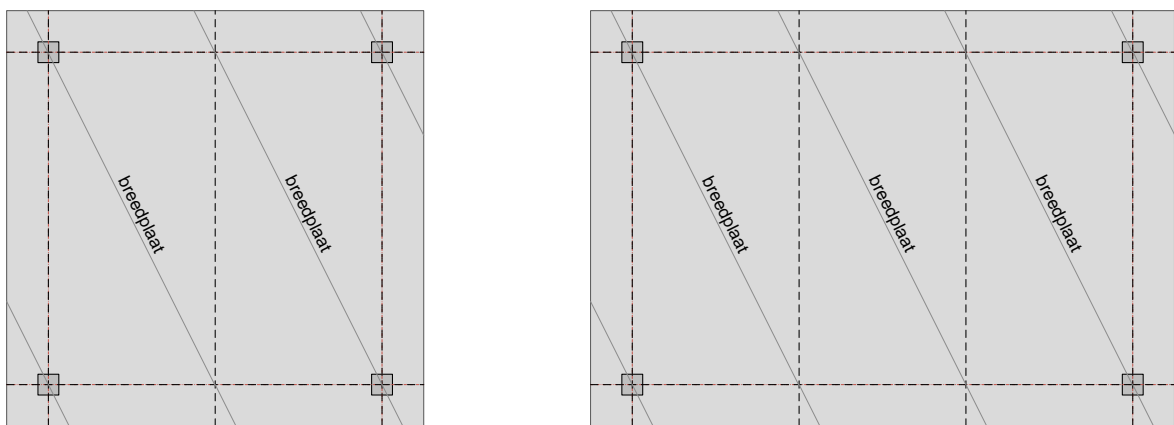
Stap 3 – Beoordeel krachtsverdeling

Nagegaan moet worden of er in de breedplaatvloeren, ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten sprake is van een positief moment dat veroorzaakt wordt door de primaire krachtsafdracht.

In het geval de afzonderlijke breedplaten aan beide uiteinden direct dragen op dragende wanden of betonnen liggers zal geen sprake zijn van positieve momenten ter plaatse van langsnaden ten gevolge van de primaire krachtsafdracht. In alle andere gevallen, bijvoorbeeld wanneer de breedplaten afdragen op kolommen, eventueel via verstijfde vloerstroken of stalen liggers, moet een constructeur bepalen of er sprake is van positieve momenten ter plaatse van naden.

Voorbeelden van breedplaatvloeren waarbij een positief moment, in het algemeen in combinatie met een dwarskracht, bij een naad tussen twee breedplaten kan optreden, zijn:

- Puntvormig ondersteunde vloeren waarbij sprake is van een primaire krachtsafdracht in twee richtingen (figuur 74);
- Lijnvormig ondersteunde vloeren met een naad tussen twee breedplaten die evenwijdig aan de lijnvormige ondersteuning loopt;
- Speciale situaties, bijvoorbeeld in de buurt van een grote sparing in de vloer.



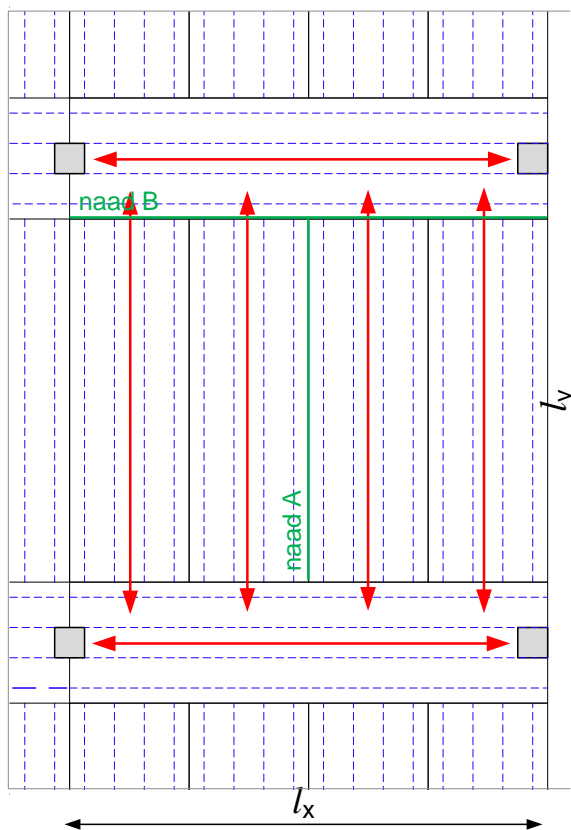
figuur 74 Puntvormig ondersteunde vloeren waarbij een significant positief moment bij een plaatnaad kan optreden. De stippellijnen geven de naden weer tussen de afzonderlijke breedplaten.

Bepalend of er sprake is van een kritisch vloerdetail is vervolgens de situatie waarbij de momentweerstand ter plaatse van de naad tussen de breedplaatvloeren wordt ontleend aan koppelwapening die op de breedplaten is aangebracht en die vervolgens zijn kracht afdraagt aan in de breedplaat opgenomen wapening. Dit is vaak het geval bij relatief korte koppelwapening.

Van een kritisch vloerdetail is bijvoorbeeld geen sprake in situaties bij een trapgat waarbij de op de breedplaat aangebrachte wapening op zichzelf voldoende weerstand geeft en niet hoeft te zijn 'geplast' aan wapening in de breedplaat en situaties waarbij in een breedplaatvloer een verzwaarde strook wordt gecreëerd doordat op de breedplaten een strook met doorgaande wapeningsstaven is aangebracht.

Tot slot wordt gewezen op het volgende. Op basis van de normen verdient het de voorkeur om de krachtsverdeling in een vloer te bepalen conform de lineaire-elasticiteitstheorie. Er zijn echter vloeren ontworpen op basis van een evenwichtssysteem volgens het kinderbint-moerbint principe, zie figuur 75. De breedplaatvloer wordt daarbij gezien als een verzameling balken die de belasting maar in één richting – evenwijdig aan de langsnaden van de breedplaten - afdragen. Deze benadering komt regelmatig voor bij strokenvloeren. Dit zijn vloeren waarbij in één richting een vloerstrook, die over de kolommen doorloopt, dikker is uitgevoerd dan de overige delen van de vloer. In

figuur 75 is dit bijvoorbeeld de strook die in de richting van l_x overspant. Als de krachtsverdeling op deze wijze is bepaald, dan vindt er tussen de langsnaden van de breedplaten die in de richting van l_y overspannen, naad A, geen primaire krachtsoverdracht plaats. Bij naad B, de naad tussen het kopse einde van de breedplaten en de langsnaad van de strook, is wel sprake van een primaire krachtafdracht. Daar moet de weerstand tegen zowel het moment en als de dwarskracht worden getoetst. De grootte van het positieve moment bij naad B zal vaak beperkt zijn. Dit laatste hoeft niet het geval te zijn bij eindvelden, daar kan het moment bij naad B van een significante grootte zijn. Aanvullend wordt opgemerkt dat de overige wapening in de breedplaatvloer voldoende moet zijn zodat de uit deze schematisering volgende momenten en dwarskrachten door de constructie kunnen worden weerstaan.



figuur 75 Breedplaatvloer met krachtsverdeling op basis van kinderbint-moerbint principe

2e Toets

De tweede toets is bedoeld om meer precies na te gaan of het kritische vloerdetail, zoals beschreven in dit rapport, in de beschouwde vloerconstructie aanwezig is. De definitie voor een dergelijke constructie is beschreven in hoofdstuk 1 van dit rapport: 'Een bestaande breedplaatvloerconstructie waarbij in de richting haaks op de voegen tussen twee breedplaten sprake is van een primaire krachtsoverdracht, die geborgd wordt door koppelwapening die op de breedplaten is aangebracht en die zijn krachten over moet dragen op in de breedplaten opgenomen wapening'.

Stap 4 – Verzamelen van aanvullende informatie

Als er sprake is van een vloer met het kritische vloerdetail dan is het noodzakelijk om meer informatie te verzamelen. Dit kan via de constructeur van het beschouwde werk, de producent van de toegepaste breedplaatvloeren en/of de aannemer. Een deel van de informatie van diverse producenten is vindbaar via: <https://betonhuis.nl/constructief-prefab/breedplaat-zelfverdichtend-beton>

Bronnen voor aanvullende informatie zijn bijvoorbeeld de wapeningstekeningen, de berekening van de constructie, specifieke informatie over de breedplaten zoals of de bovenzijde van de breedplaten is bewerkt, de sterkte van het beton, de toegepaste betonsoort en of de breedplaten gewapend zijn met betonstaal of dat ze voorgespannen zijn. Let op, deze zaken kunnen in de praktijk anders zijn dan in de berekening is aangehouden of op tekeningen is weergegeven. De betonsterkte van de breedplaten is bijvoorbeeld regelmatig hoger dan in de berekening is aangehouden om de productie van de breedplaten te vereenvoudigen.

Bij de aannemer kan mogelijk informatie worden verkregen over het uitvoeringsproces en of zich daarbij afwijkende situaties of omstandigheden hebben voorgedaan. Relevante informatie is bijvoorbeeld de wijze waarop de verschillende vloeren tijdelijke zijn ondersteund tijdens de uitvoering en of er sprake is geweest van exceptionele weercondities.

Tot slot moet ook bij de eigenaar worden nagegaan of en hoe er eventuele aanpassingen van de constructie, verbouwingen, wijzigingen van functie hebben plaatsgevonden.

Aanbevolen wordt de beschikbaar gekomen informatie van de breedplaatvloeren zodanig te archiveren, dat dit in de toekomst weer eenvoudig beschikbaar kan zijn. Zo blijft ook in de toekomst duidelijk hoe met het onderhavige probleem is omgegaan en tot welke consequenties dit eventueel heeft geleid.

Er wordt dringend geadviseerd om bij constructies middels een observatie ter plaatse de juistheid van de ontvangen informatie nader te beoordelen. Hierbij kan tevens worden gekeken of het feitelijke gebruik van de constructie overeenkomt met de uitgangspunten die in de berekening van de constructie zijn gehanteerd en of er eventueel sprake is van overmatige delaminatie, grote vervormingen of niet verklaarbare scheurvorming. Ook kan daarbij worden nagegaan of er verschillende gegevens van dezelfde constructie beschikbaar zijn en welke dan de juiste zijn.

Het verdient ook aanbeveling om de aanwezige permanente belasting, veroorzaakt door het eigen gewicht van de constructie, de afwerking van de vloer, het plafond, aanwezige installaties en eventuele scheidingswanden te verifiëren. Scheidingswanden die in het reguliere gebruik van de constructie niet verplaatst kunnen worden, moeten beschouwd worden als permanente last. Scheidingswanden die tijdens het reguliere gebruik wel verplaatst kunnen worden, moeten zijn beschouwd als een veranderlijke last.

Er is sprake van overmatige delaminatie als de gemiddelde breedte van het gedelamineerde oppervlak, gemeten in de richting loodrecht op de naad, bij een breedplaat meer bedraagt dan 10 centimeter.

3e Toets

Bij de derde toets wordt nagegaan of op basis van relatief eenvoudige criteria kan worden geconcludeerd dat het risico bij de beschouwde voldoende klein is, zodat geen maatregelen noodzakelijk zijn. Dit is mogelijk als voldaan wordt aan de volgende vier voorwaarden:

- de vloer is een statisch onbepaalde vloerconstructie;
- de constructie is ingedeeld in CC1 of CC2;
- de breedplaten in de vloerconstructie zijn niet voorgespannen;
- de breedplaten en koppelwapening in de vloerconstructie zijn overeenkomstig de normen geproduceerd en aangebracht.

Als niet aan al deze vier voorwaarden wordt voldaan, mag een toets op de hoeveelheid koppelwapening alleen, niet leiden tot een conclusie dat geen maatregelen noodzakelijk zijn, en dienen de onderzoekwerkzaamheden te worden voortgezet met stap 5.

De voorwaarde dat de constructie statisch onbepaald moet zijn, komt voort uit het voorkomen van een bros bezwijken zonder enige vorm van waarschuwing. Bij een statisch onbepaalde constructie zal, mits ook ter plaatse van de negatieve momenten met de invloeden van het in twee richtingen dragen bij de dimensionering en detaillering voldoende rekening is gehouden, ten minste enige waarschuwing plaatsvinden. Het verdient dan ook aanbeveling het ontwerp te beoordelen op de wijze waarop de weerstand tegen negatieve momenten is verzorgd.

Bij het gebruik van voorgespannen breedplaten is het aanbrengen van tralieliggers over de gehele lengte van de plaat niet voorgeschreven. Ook bij dit type platen moeten daarom de onderzoekwerkzaamheden, als er sprake is van primaire krachtsafdracht over de naden waarbij tralieliggers ontbreken, worden voortgezet.

Als de gewapende breedplaten en de koppelwapening overeenkomstig de normen zijn geproduceerd en aangebracht, dan voldoet de lengte van de koppelstaven die over de naad zijn aangebracht aan:

- $\text{Ø}8 \geq 1000 \text{ mm}$
- $\text{Ø}10 \geq 1150 \text{ mm}$

en is in de breedplaat op maximaal een afstand van 400 mm van de langsnaad een tralieligger aanwezig. Bij kopnaden is de afstand tussen het einde van de plaat en het begin van de tralieligger beperkt tot 250 mm.

Als aan de vier voorwaarden wordt voldaan, mag van een verdere toets worden afgezien als de hart-op-hart-afstand tussen de koppelstaven groter is dan of gelijk is aan de in tabel 26 gegeven waarden.

tabel 26 Ondergrenswaarden voor hart-op-hart-afstand $\varnothing 8$ en $\varnothing 10$ koppelwapening

		massieve vloer		vloer met gewichtsbesparende elementen	
		$\varnothing 8$	$\varnothing 10$	$\varnothing 8$	$\varnothing 10$
grenswaarde hart-op-hart-afstand koppelwapeningsstaven		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Traditioneel beton	Glad	130	170	135	185
	Ruw	95	115	100	130
ZVB	Glad	140	185	150	200
	Ruw	105	130	110	140

Stap 5 – Bepaling van het effect van de belasting

Als de belastingen bekend zijn, moet de fundamentele belastingscombinatie volgens NEN 8700 worden bepaald. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de partiële factoren bij afkeuren. De veranderlijke belasting kan beperkt verder worden gereduceerd als rekening wordt gehouden met de voorgeschreven minimale referentieperiode, gelijk aan 1 jaar voor constructies in CC1a en 15 jaar in de andere gevallen, en de combinatiefactor ψ_0 die voor de betreffende veranderlijke belasting is voorgeschreven in bijlage A van NEN 8700. De grootte van de reductie kan bepaald worden volgens A.1.1(2) van de NB bij NEN-EN 1990. Voor een kantoorfunctie ($\psi_0 = 0,5$) is deze reductiefactor 0,93.

De krachtsverdeling kan worden bepaald op basis van de lineaire elasticiteitstheorie. De bepalingmethode van eindige elementenprogramma's is in het algemeen gebaseerd op deze theorie. Ook kan gebruik gemaakt worden van tabellen. Ook deze zijn in het algemeen gebaseerd op de lineaire elasticiteitstheorie. Bij het bepalen van de krachtsverdeling dienen de aansluitingen van de vloer met andere constructieve elementen middels de juiste randvoorwaarden voor het beschouwde model te zijn beschouwd. Een voorbeeld van tabellen die kunnen worden gebruikt zijn de tabellen 19 tot en met tabel 26 in NEN 6720 (VBC 1995).

Herverdeling van de krachtsverdeling waarbij de grootte van de positieve momenten wordt beperkt door de steunpuntsmomenten hoger aan te nemen dan uit een lineaire berekening volgt, is niet toegestaan. De reden hiervoor is dat de vervormingscapaciteit van het kritische vloerdetail beperkt kan zijn. Analyses waarbij een bepaalde mate van deze herverdeling wordt toegepast, kunnen daarom leiden tot een niet reële krachtsverdeling in de beschouwde vloer.

Een uitzonderlijke situatie waarbij gebruik kan worden gemaakt van enige herverdeling van momenten in dwarsrichting, is beschreven in paragraaf 8.3.5. Daar wordt door de specifieke indeling van de breedplaten de toename van de kromming in het kritische vloerdetail ter plaatse van een langnaad, beperkt door de aanwezige doorgaande breedplaten in de andere richting.

Als alternatief is het bepalen van een krachtsverdeling op basis van een kinderbint-moerbint principe toegestaan, als daarbij op een correcte wijze rekening is gehouden met de invloed van de randvoorwaarden voor het betreffende vloerveld.

Voor het bepalen van de maatgevende momenten ter plaatse van de naden tussen de breedplaten moet rekening zijn gehouden met het voorgeschreven verschuiven van de momentenlijn om het effect van een eventuele dwarskracht in rekening te brengen. De resultaten van eindige elementenprogramma's mogen worden gemiddeld over de breedte van de middenstroken en de breedte van kolomstroken. Voor de definitie van midden- en kolomstroken wordt verwezen naar artikel 7.1.5.2 van NEN 6720.

Stap 6 – Bepaling van de weerstand van het kritische vloerdetail

De rekenwaarde van de momentweerstand van een breedplaatvloer ter plaatse van de langснаad tussen twee breedplaten in het geval van positieve buiging moet bepaald worden volgens de uitgangspunten van artikel 6.1 van NEN-EN 1992-1-1 waarbij de grootte van de trekkracht in de koppelwapening wordt begrenst door:

- I. de rekenwaarde van de vloeigrens: $f_{yd} A_{s,kop}$
- II. de rekenwaarde van de capaciteit van het aansluitvlak om de trekkracht in de koppelwapening over te dragen aan de wapening in de breedplaat, hiervoor mag de grootste waarde van de volgende twee modellen worden gehanteerd:
 - a. een model dat de schuifsterkte van het aansluitvlak beschrijft;
 - b. een model dat de uittrekweerstand van de aanwezige tralieliggers beschrijft.

De beschreven rekenmethoden zijn uitsluitend toepasbaar in het geval er het aansluitvlak doorkruisende wapening aanwezig is op een positie van ten minste 100 mm voor het einde van de koppelwapening en de diepte van de onderzijde van de eventuele tralieligger in de breedplaat ten minste gelijk is aan 15 mm.

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

$$F_{R,kop,a,d} = v_{Rd,i} A_{eff}$$

waarin:

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

$$v_{Rd,i} = k_1 \left[c_{v1} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_C} + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha \right]$$

is de schuifsterkte van het effectieve aansluitvlak in MPa

$$A_{eff} = b l_{eff}$$

bij aanwezigheid van gewichtsbesparende elementen moet het deel van het oppervlak dat hierdoor niet effectief kan zijn, op A_{eff} in mindering zijn gebracht;

$$k_1 = 1,1 \quad \text{voor zelfverdichtend beton}$$

$$= 1,2 \quad \text{voor traditioneel beton};$$

c_{v1} is een factor afhankelijk van het wel of niet bewerkt zijn van het oppervlak van de breedplaat, volgens tabel 27;

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

$$\gamma_C = 1,5$$

$$\rho = A_s/A_{eff}$$

- A_s is het oppervlak van de doorsnede van de aansluitvlak doorkruisende wapening;
 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 27;
 α is de kleinste hoek tussen de beschouwde aansluitvlak doorkruisende wapening en het vlak van het aansluitvlak, zie figuur 51,
 $\geq 45^\circ$
 $\leq 135^\circ$
b is de breedte van de beschouwde doorsnede;
 l_{eff} is de grootste lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening, gezien vanaf de naad, zie figuur 76.

tabel 27 Coëfficiënten voor de oppervlakte

Oppervlakte ruwheid	c_{v1}	μ_v
ruw (bewerkt)	0,15	0,7
glad (niet bewerkt)	0,075	0,6

ad b) De maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger volgt uit:

$$F_{R,kop,b,d} = 2 f_{ctd,breedplaat} \text{ diepte}^{1,5} k_2 k_3$$

waarin:

$F_{R,kop,b,d}$ is de maximale trekkracht in de koppelwapening gebaseerd op het uittrekken van de tralieligger, in kN/m;

$f_{ctd,breedplaat}$ is de rekenwaarde van de treksterkte van het beton van de breedplaat, in MPa;

diepte is de diepte van de onderzijde van de tralieligger in de breedplaat in mm, zie figuur 55;

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

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

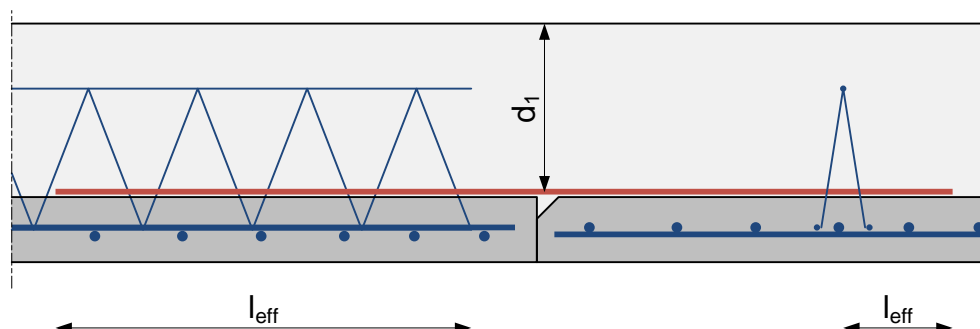
l_{eff} is de grootste lengte van de aanwezige koppelwapening vanaf het hart van de eerste tralieligger of andere aansluitvlak doorkruisende wapening, in mm, zie figuur 76;

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

De diepte van de tralieligger mag zijn bepaald uit de dikte de breedplaat minus de som van de toegepaste dekking aan de onderzijde van de breedplaat en de dikte van de wapening in de breedplaat waarop de tralieliggers zijn geplaatst.

In het geval de naad van de breedplaat zich aan de kopse zijde van de breedplaat bevindt, moet de verankering van de koppelwapening daar worden getoetst zoals beschreven in 6.3 van dit rapport.

Daarbij is aangegeven dat aangenomen moet worden dat het deel van het aansluitvlak dat een bijdrage levert aan de betonweerstand wordt gevormd door de breedte van de plaat en de afstand tussen het begin van de tralieliggers en het einde van de koppelstaven, zie figuur 76.



figuur 76 Effectief oppervlak bij een aansluiting bij de kopse zijde van de breedplaat

De rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand van een breedplaatvloer ter plaatse van een naad tussen twee breedplaten moet worden getoetst volgens NEN-EN 1992-1-1, artikel 6.2.2. of 6.2.3, uitgaande van de geometrie ter plaatse van de naad. De effectieve hoogte van de doorsnede moet daarbij dus betrokken zijn op de koppelwapening die in de druklaag is aangebracht, zie d_1 in figuur 76. De eigenschappen van het beton zijn de eigenschappen van het beton dat in de druklaag is toegepast. Aanvullend wordt opgemerkt dat voor het toetsen van de dwarskrachtcapaciteit van breedplaatvloeren ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten in CUR-Aanbeveling 99 Strokenvloeren aanvullende rekenregels zijn opgenomen. Zie verder ook paragraaf 6.2 van dit rapport.

4e Toets

Bij deze toets wordt voor alle te beschouwen locaties nagegaan of de rekenwaarde van het effect van de belasting, uitgedrukt in een moment m_{Ed} en een dwarskracht V_{Ed} kleiner is dan of gelijk is aan de rekenwaarde van de weerstand van de doorsneden, uitgedrukt in m_{Rd} en V_{Rd} .

Als hieraan wordt voldaan, zijn geen maatregelen noodzakelijk. De constructie voldoet aan de eisen van NEN 8700 voor bestaande bouw.

Maatregelen treffen

Indien niet aan de vierde toets wordt voldaan, dienen maatregelen te worden genomen. Deze maatregelen kunnen bestaan uit:

- het aanpassen van de belastingen of
- het versterken van de constructie

De urgentie van de maatregelen moet worden vastgesteld door de constructeur en met de eigenaar worden besproken. De urgentie is afhankelijk van de mate waarin de constructie niet aan de geldende eisen voldoet. Bij het bepalen van de urgentie kan ook rekening worden met de mate van delaminatie die tijdens observaties is aangetroffen en de kans dat nog uit te voeren onderzoek naar de capaciteit van het kritische vloerdetail bij koppelstaven met kleine diameters en korte lengten tot gunstigere inzichten zal leiden.

Het aanpassen van de belasting is mogelijk als de ontwerpwaarde van de belasting hoger is dan het niveau dat in NEN 8701 is voorgeschreven voor de betreffende functie. Wel dient dan duidelijk

zijn vastgelegd dat de toelaatbare belasting tot een lagere waarde dan de ontwerpwaarde is gereduceerd. Het verlagen tot een belastingsniveau lager dan in NEN 8701 is beschreven, is uitsluitend toegestaan als dat gepaard gaat met beheersmaatregelen. Met die combinatie kan ook dan aan de eisen van het Bouwbesluit zijn voldaan.

Eventueel kan in combinatie met een tijdelijk verlagen van de belasting als alternatief een risico-analyse worden uitgewerkt waarbij overeenkomstig hoofdstuk 8 van het achtergrondrapport [36] wordt nagegaan hoe de constructie zich gedraagt bij het falen van het kritische detail en in welke mate er nog een tweede mogelijkheid is van belastingsafdracht. Het doel van deze risico-analyse is om op basis van gelijkwaardigheid aan te tonen dat aan het in het Bouwbesluit beschreven veiligheidsniveau wordt voldaan. Als dat lukt is, als de vloer overeenkomstig de eventuele aanwijzingen die volgen uit de risico-analyse wordt gebruikt, geen versterking van de vloer noodzakelijk.

Een tweede alternatief is het uitvoeren van een proefbelasting op basis van de uitgangspunten van NEN 8700. Een toelichting over de wijze waarop dit moet worden uitgevoerd, is opgenomen in bijlage G van dit rapport.

9.2 Vergelijking met het Stappenplan 2017

In [5] is het stappenplan 2017 beschreven. Op basis van dat stappenplan zijn in 2017 en 2018 bestaande breedplaatvloerconstructies beoordeeld.

Het stappenplan 2017 was bedoeld om op basis van de kennis die op dat moment beschikbaar was een onderscheid te maken tussen constructies met een hoog risico op bezwijken op een wijze gelijk aan de situatie bij de parkeergarage van Eindhoven Airport en constructies waarbij dit risico lager werd ingeschat. Inmiddels is, zoals in dit rapport is beschreven, meer informatie over het gedrag van dit type constructies bekend en kan het risico beter onderbouwd worden beschreven.

In het stappenplan 2017 is gefocust op het risico bij het gebruik van breedplaten vervaardigd van zelfverdichtend beton die aan de bovenzijde niet zijn bewerkt/opgeruwd. Deze beperking van de risicogroep was gebaseerd op het type breedplaat dat bij de bouw van de parkeergarage was gebruikt in combinatie met het feit dat bij andere soortgelijke constructies er geen constructieve schades bekend zijn. Uit het uitgevoerde onderzoek is gebleken dat deze beperking van de risicogroep niet kan worden gehandhaafd. Ook bij het gebruik van breedplaten van traditioneel beton en/of met een bewerkt oppervlak kan een onvoldoende weerstand ter plaatse van het kritische vloerdetail aanwezig zijn. Wel is het zo dat dit type breedplaten tot een beter resultaat kan leiden, echter het gebruik daarvan leidt niet impliciet tot een voldoende weerstand.

In het stappenplan 2017 is bij een verdere beoordeling gekeken naar de grootte van de gemiddelde schuifspanning in het aansluitvlak bij de fundamentele belastingscombinatie volgens NEN 8700. Deze was begrensd tot 0,40 MPa. De grenswaarde voor de schuifspanning was afgeleid uit de trekkracht in de koppelwapening bij de experimenten die ten behoeve van het onderzoek naar de oorzaak van het incident bij de parkeergarage is uitgevoerd [2]. In het nieuwe stappenplan is de weerstand van het aansluitvlak beschreven middels twee bezwijkmechanismen, waarvan het bezwijkniveau mede uit het extra uitgevoerde experimentele onderzoek is afgeleid. Dit betekent echter niet dat de resultaten van eerder uitgevoerde beoordeling niet meer bruikbaar zijn. De informatie die daarbij is gevonden is namelijk nog steeds noodzakelijk bij het doorlopen van het nieuwe stappenplan.

Het domein van de verzameling van gebouwen die met name beoordeeld moeten worden is nog steeds gelijk. Het betreft constructies die na 1999 zijn opgeleverd. Bij het stappenplan 2017 is gesteld dat woningen en woongebouwen buiten het domein vallen, bij het nu voorgestelde stappenplan is dit verwoord door te wijzen op de categorie utiliteitsgebouwen.

10 Aanbevelingen voor verder onderzoek en over het omgaan met het stappenplan

10.1 Aanbevelingen voor verder onderzoek

Het uitgevoerde onderzoek heeft zich met name toegespitst op de situatie waarbij ter plaatse van de naad tussen twee breedplaten in een breedplaatvloer een significant positief moment, eventueel in combinatie met een dwarskracht optreedt. De rekenregels die uit het uitgevoerde onderzoek zijn afgeleid, zijn uitsluitend bestemd voor het beoordelen van bestaande bouwconstructies.

Uit ervaringen opgedaan tijdens het uitgevoerde onderzoek en in overleg met de klankbordgroep en vertegenwoordigers van Horvat zijn de volgende aanbevelingen voor verder onderzoek naar voren gekomen:

1. Er dienen voor de in dit rapport beschreven toepassing van breedplaatvloeren zo spoedig mogelijk duidelijke rekenregels voor nieuwbouw te worden opgesteld. Deze rekenregels moeten zorgen dat het betreffende detail voldoende weerstand heeft om de effecten van de belasting te weerstaan en de constructie waarin het detail wordt toegepast een vervormingscapaciteit bezit die van een gelijke orde van grootte is als die van een gewapende betonvloer met overeenkomende afmetingen en materiaaleigenschappen.
2. Het wordt nuttig geacht om aanvullend experimenteel onderzoek uit te voeren naar de weerstand van het kritische vloerdetail in situaties waarbij koppelwapening met kleine diameters en bij behorende geringe lengten zijn toegepast. Bij het opzetten van een onderzoeksplan hiervoor moet voldoende rekening zijn gehouden met de diverse variaties in de uitvoering van het detail zoals dat in de Nederlandse praktijk in de afgelopen 20 jaar is toegepast.
3. De evolutie van breedplaatvloeren, zoals onder andere de toepassing in vloeren die in twee richtingen dragen, stelt aanvullende eisen aan de detaillering van deze vloeren. In dit rapport zijn deze aspecten ter plaatse van de positieve momenten dwars op de voeg uitgebreid onderzocht. Aanbevolen wordt om ook een onderzoek in deze te doen met betrekking tot de negatieve momenten en dwarskracht, zodat consistent en sluitend beeld met betrekking tot de hedendaagse toepassing van breedplaatvloeren verkregen wordt.

10.2 Fasering van de beoordeling van bestaande breedplaatvloerconstructies

Op basis van de bevindingen die in het rapport zijn beschreven en de wijze waarop de notitie 5-10-2017 in de maatschappij is ontvangen, kan geconcludeerd worden dat de impact van het onderhavige rapport significant zal zijn. Hierbij behoeft alleen maar gedacht worden aan de conclusie dat het kritische vloerdetail niet alleen zal voorkomen in vloerconstructies waarbij de breedplaten zijn vervaardigd van zelfverdichtend beton maar ook in die waarbij breedplaten vervaardigd van traditioneel beton zijn gebruikt. Deze laatste groep werd in het eerste stappenplan nog beoordeeld als 'voorlopig geen maatregelen nodig'. Nu zal blijken dat bij een aantal van dit type breedplaatvloeren wel maatregelen nodig zijn om het voorgeschreven niveau van constructieve veiligheid te bereiken.

Er bestaat bij de onderzoekers en binnen de klankbordgroep geen volledig inzicht in de aantallen gebouwen en vierkante meters vloeroppervlak waarop de bevindingen van dit rapport betrekking hebben. Aannemelijk is dat dat bij een significant deel van de vloeren maatregelen getroffen moeten worden.

Na het uitbrengen van het rapport kunnen partijen bij de reeds in beeld zijnde gebouwen met de rekenregels (gegeven bij stap 6 van het stappenplan) een definitieve beoordeling uitvoeren. Partijen worden opgeroepen snel ervaring op te doen met het gebruik van het stappenplan en de beoordeling. Deze ervaringen kunnen worden gedeeld met de klankbordgroep. Op basis van de verschillende ervaringen zal worden beschouwd of het nodig is het stappenplan, waarin de toepassing van de beoordelingsmethode en rekenregels zijn beschreven, te verduidelijken. Het is nadrukkelijk niet de bedoeling dat de rekenregels zelf nog worden gewijzigd.

Daarna zouden alle overige gebouwen kunnen worden onderzocht. Gezien de te verwachte grote opgave ligt een gefaseerde aanpak hiervoor voor de hand. Daarbij zullen eerst de gebouwen worden onderzocht waar de grootste gevolgen van mogelijk bezwijken zijn te verwachten. Voor deze gefaseerde aanpak wordt de volgende verdeling voorgesteld:

- Utiliteitsgebouwen die als eerste dienen te worden onderzocht te zijn:
 - hoge gebouwen (reiken tot meer dan 70 m boven het aangrenzend maaiveld)
 - gebouwen met verminderd zelfredzame personen met 4 of meer bouwlagen (dit zijn bijvoorbeeld ziekenhuizen, verpleegtehuizen of celgebouwen);
- Utiliteitsgebouwen die vervolgens kunnen worden onderzocht zijn:
 - gebouwen met verminderd zelfredzame personen met 3 of minder bouwlagen;
 - hotels en kantoorgebouwen met 5 of meer bouwlagen;
 - winkels of winkelcentra met 3 of meer bouwlagen;
 - onderwijsgebouwen met 2 of meer bouwlagen;
 - parkeergarages met 3 of meer bouwlagen;
- Tot slot kunnen de overige utiliteitsgebouwen worden beschouwd.

Deze verdeling is gebaseerd op de in NEN 8700 en NEN-EN 1991-1-7 beschreven differentiatie in gevolgklassen.

Referenties

- [1] TNO, “Onderzoek naar de technische oorzaak van de gedeeltelijke instorting van de in aanbouw zijnde parkeergarage P1 Eindhoven Airport, 2017 R11127,” Delft, 22-9-2017.
- [2] Adviesbureau Hageman, “Rapport 9663-1-0, Bezwijken parkeergarage Eindhoven Airport, Analyse naar de oorzaak,” Rijswijk, 25-9-2017.
- [3] Onderzoeksraad voor Veiligheid, “Bouwen aan constructieve veiligheid – Lessen uit instorting parkeergebouw Eindhoven Airport,” Den Haag, 2018.
- [4] TNO Bouw, “Veiligheidsbeoordeling bestaande bouw, Achtergrondrapport bij NEN 8700; 2008-D-R0015/B,” Delft, 2008.
- [5] Adviesbureau Hageman, “Onderzoek constructieve veiligheid breedplaatvloeren in bestaande bouwwerken opgeleverd na 1999 - Notitie 5-10-2017,” Rijswijk, 2017.
- [6] Adviesbureau Hageman, “Toelichting op informatiedocument beoordeling constructieve veiligheid breedplaatvloere - Notitie 21-12-2017,” Rijswijk, 2017.
- [7] CUR, “CUR-Aanbeveling 99 Strokenvloer,” Gouda, 2012.
- [8] CUR, “CUR-Aanbeveling 86 Bollenplaatvloeren,” Gouda, 2001.
- [9] NEN, “NEN 6720 Voorschriften Beton TGB 1990 (VBC 1995),” Delft, 1995.
- [10] D. Hordijk, H. Bennenk and S. d. Boer, “Invloed opruwmethode op schuifsterkte in aansluitvakken bij ZVB,” *Cement* 57(3), pp. 72-76, 2005.
- [11] KIWA, “BRL K211/02 Vrijdragende systeemvloeren van voorafvervaardigd constructief beton - model attest-met-certificaat - bekistingsplaatvloer,” Rijswijk, 1989.
- [12] KIWA, “BRL K 712/03 Tralieliggers,” 1989.
- [13] KIWA, “KOMO attest K2165/10 Breton bekistingsplaatvloer / Bubble Deck vloer,” Rijswijk, 1999.
- [14] KIWA, “KOMO attest K22722/01 Bubbledeck vloersystemen / Bubbledeck Nederland BV,” 2002.
- [15] KIWA, “KOMO attest K22722/04 Bubbledeck Bollenplaatvoersysteem / Bubbledeck International LWC B.V.,” 2015.
- [16] NEN, “NEN-EN 13747+A2 Voorafvervaardigde betonproducten - Breedplaatvloeren,” Delft, 2010.
- [17] NEN, “NVN 6725 Vrijdragende systeemvloeren van vooraf vervaardigd beton,” Delft, 2008.
- [18] T. Gudmand-Høyer, “Note on the moment capacity in a Bubble deck joint,” Technische Universiteit van Denemarken, oktober 2003.
- [19] T. Gudmand-Høyer, “Forsøh vedr. momentkapaciteten af en samling i BubbleDeck (vrij vertaald: Experimenten voor het bepalen van de momentcapaciteit van Bubbledeck platen) BYG·DTU SR-03-20,” Technische Universiteit van Denemarken, december 2003.
- [20] T. Gudmand-Høyer, “Forsøh vedr. momentkapaciteten af en samling i BubbleDeck (vrij vertaald: Experimenten voor het bepalen van de momentcapaciteit van Bubbledeck platen) BYG·DTU SR-03-21,” Technische Universiteit Denemarken, december 2003.
- [21] K. Lundgren, “Analysis of lap slice system in a lattice girder system,” Chalmers Technische universiteit, 2003.
- [22] K. Lundgren, “Joints in lattice girder structures,” Chalmers Technische universiteit, 2005.

- [23] K. Lundgren, "Lap splice over a grouted joint in a lattice girder system," *Magazine of concrete research* no. 10, pp. 713-727, december 2007.
- [24] J. Stehle, A. Kanellopoulos and B. I. karihaloo, "Performance of joints in reinforced concrete slabs for two-way spanning action," *Structures and buildings, volume 163*, pp. 197-209, juni 2011.
- [25] J. K. Weglarzy, "Untersuchungen zum Tragstoß von nachträglich mit ortbeton ergänzten zweiachsig gespannten stahlbeton-fergiteilplatten (PHD)," Universiteit Siegen, 5 mei 2014.
- [26] F. Fingerloos, J. Hegger and K. Zilch, "Eurocode 2 für Deutschland DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hockbau mit nationalem Anhang; kommentierte Fassung," no. Ernst & Sohn, 2012.
- [27] W. v. d. Silva, "Experimenteel onderzoek naar de verbinding tussen Bubbledeck platen (vereenvoudigde Nederlandse vertaling). Oorspronkelijke titel: Análise experimental do comportamento à flexão e ligação entre painéis de lajes tipo bubbledeck (master thesis)," Universiteit van Brasilia, 18 februari 2016.
- [28] T. Molken, I. Deygers and A. V. Gysel, "Behavior of joints in between filigree plank profiles subjected to bending: an experimental study," in *fib congress 2018*, Melbourne, 2018.
- [29] TU/e Bouwkunde - Structures Laboratory Eindhoven, "Meetrapport betreffende 4-puntsbuigproeven van BAM-Cobiax breedplaatproefstukken," Eindhoven, 2018.
- [30] TU/e Bouwkunde - Structures Laboratory Eindhoven, "Meetrapport 4-puntsbuigproeven voor het Betonhuis - Test breedplaatproefstukken," Eindhoven, 2018.
- [31] Adviesbureau Hageman, "Onderzoek constructieve breedplaatvloeren - Meetrapport 4-puntsbuigproeven op proefstukken met breedplaten van zelfverdichtend beton - Rapport 9780-2-0," Rijswijk, 2018.
- [32] SGS Intron, "Hechtsterkte en structuur hechtvlak vloerelementen - Rapport A101080/R20180363b," Sittard, 2019.
- [33] R. Eligehausen, "Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden," Stuttgart, 1979.
- [34] N. Randl, "Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010," *Structural Concrete*, vol. 14, no. 3, pp. 230-241, 2013.
- [35] N. Randl and M. Wicke, "Schubübertragung zwischen Alt- und Neubeton, Experimentelle Untersuchungen, theoretischer Hintergrund und Bemessungsansatz," *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. Heft 8, no. 95, pp. 461-473, 2000.
- [36] Adviesbureau Hageman, "Rapport 9780-1-0, Voorstellen voor en achtergronden bij rekenregels voor beoordeling van bestaande bouw," Rijswijk, 2019.
- [37] Adviesbureau Hageman, "Bijlagen bij rapport 9663-1-0, Bezuiden parkeergarage Eindhoven Airport, Analyse naar de oorzaak," 25-9-2017.
- [38] D. Hordijk, V. v. d. Wal and M. Vos-Pols, "Versterking breedplaatvloeren onderzocht, Onderzoek naar versterkingen met ingeboorde korte ankers," *Cement*, no. 1, 2019.

Bijlage A Samenvatting variabelen experimenten

Op de volgende pagina's zijn de variabelen en resultaten van de diverse in hoofdstuk 3 beschreven experimenten samengevat.

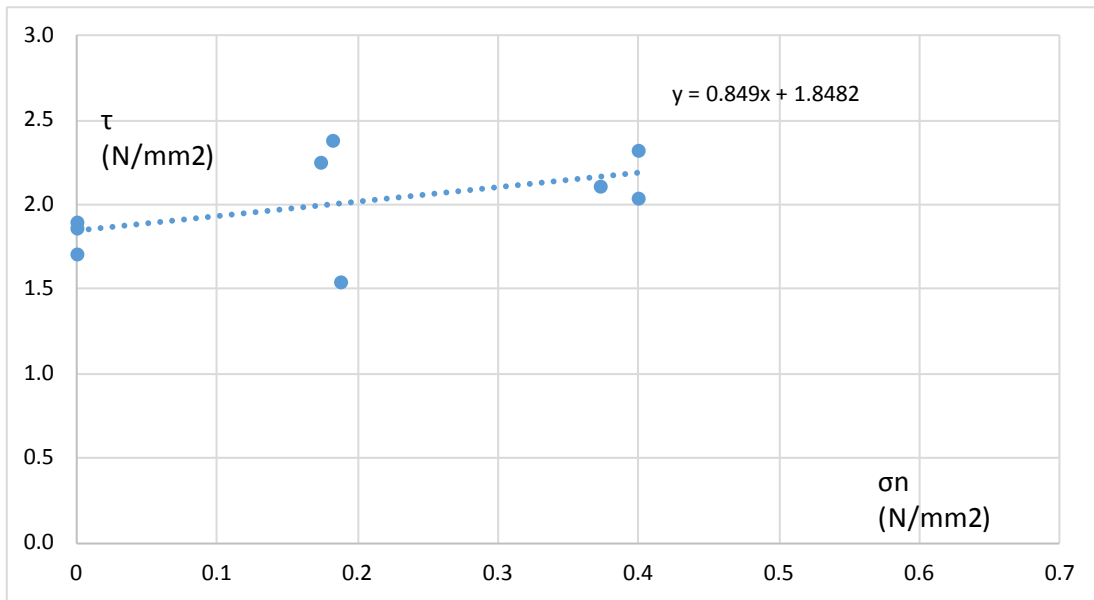
proefstuk	code	$f_{c,cube}$		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			bezwijken		
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A_s	ϕ_{max}	$d_{koppelwapening}$	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	$\phi_{onderstaaf}$	kracht per vijzel	verhouding aansluitvlakbezwijken	bezwijkvorm
		MPa	MPa	mm	mm	mm	%	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN		
1	VL18	70.0	22.7	450	70	800	81	1364	16	372	775	425	21	6	110		aansl/pull out
2	VA18	70.0	24.6	450	70	800	81	1364	16	372	775	425	21	6	118		aansl/pull out
3	VL34a	70.0	36.3	450	70	800	81	1364	16	372	775	425	21	6	120	0,86	aansl/pull out
4	KL18	70.0	22.6	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6	110	0,81	aansl/pull out
5	KA18	70.0	24.7	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6	113	0,73	aansl/pull out
6	KL34a	70.0	33.3	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6	107	0,84	aansl/pull out
7	KL34b	70.0	37.8	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	6	94	0,81	aansl/pull out
8	BC 1-1	81.4	44.8	450	70	800	69	1256	20	362	900	375	28	6	320		vloei
9	BC 1-2	80.9	40.6	450	70	800	69	1256	20	362	900	375	28	6	324	0,92	vloei
10	BC 1-3	83.0	31.6	450	70	800	69	1256	20	362	900	375	28	6	312	0,94	vloei
11	BC 2-1	86.2	45.9	450	90	800	69	1256	20	342	900	375	26	6	302		vloei
12	BC 2-2	86.5	41.1	450	90	800	69	1256	20	342	900	375	26	6	300		vloei
13	BC 2-3	86.2	44.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	375	26	6	300	0,92	vloei
14	BC 3-1	87.1	47.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	100	26	6	299	0,95	vloei
15	BC 3-2	90.4	50.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	100	26	6	258	0,88	aansl/pull out
16	BC 3-3	76.8	53.9	450	90	800	69	1256	20	342	900	100	26	6	304	0,87	vloei
17	BC 4-1	85.8	44.5	450	90	800	69	1256	20	342	600	100	26	6	270	0,77	aansl/pull out
18	BC 4-2	86.3	45.1	450	90	800	69	1256	20	342	600	100	26	6	263	0,84	aansl/pull out
19	BC 4-3	85.2	44.4	450	90	800	69	1256	20	342	600	100	26	6	275	0,91	aansl/pull out

proefstuk	code	$f_{c,cube}$		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			bezwijken		
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A_s	ϕ_{max}	$d_{koppelwapening}$	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	$\phi_{onderstaaf}$	kracht per vijzel	verhouding aansluitvlakbezwijken	bezwijkvorm
		MPa	MPa	mm	mm	mm	%	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN		
20	BC 5-1	91.0	50.3	450	90	800	69	1256	20	342	900	50	26	6	290	0,91	vloei
21	BC 5-2	89.4	52.5	450	90	800	69	1256	20	342	900	50	26	6	302	0,99	vloei
22	BC 5-3	92.2	51.5	450	90	800	69	1256	20	342	900	50	26	6	305	0,98	vloei
23	T1	62.2	38.3	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	102	0,78	aansl/pull out
24	T2	61.1	36.7	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	111	0,68	aansl/pull out
25	T3	61.0	36.9	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	108	0,77	aansl/pull out
26	T4	62.1	38.7	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	25	5	172	0,60	aansl/pull out
27	T5	60.9	39.1	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	25	5	156	0,87	aansl/pull out
28	T6	62.0	39.5	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	25	5	125	0,84	aansl/pull out
29	T10	41.0	46.3	300	70	1000	100	1407	16	222	700	400	25	5	108	0,72	aansl/pull out
30	T11	43.8	47.2	300	70	1000	100	1407	16	222	700	400	25	5	131	0,79	aansl/pull out
31	T12	43.5	46.9	300	70	1000	100	1407	16	222	700	400	25	5	99	0,99	aansl/pull out
32	T13	43.6	45.3	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	74	0,55	aansl/pull out
33	T14	41.5	48.6	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	54	0,94	aansl/pull out
34	T15	41.8	48.1	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	79	0,81	aansl/pull out
35	T19	39.1	17.1	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	79	0,78	aansl/pull out
36	T20	42.7	17.2	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	76	0,91	aansl/pull out
37	T21	38.2	18.3	250	70	1000	100	791	12	174	700	400	27	5	61	0,79	aansl/pull out
38	T22	50.4	28.0	300	70	1000	100	1407	16	222	850	100	25	5	183	0,93	aansl/pull out
39	T23	51.1	28.0	300	70	1000	100	1407	16	222	850	100	25	5	188	0,85	aansl/pull out
40	T24	51.2	28.3	300	70	1000	100	1407	16	222	850	100	25	5	169	0,95	aansl/pull out

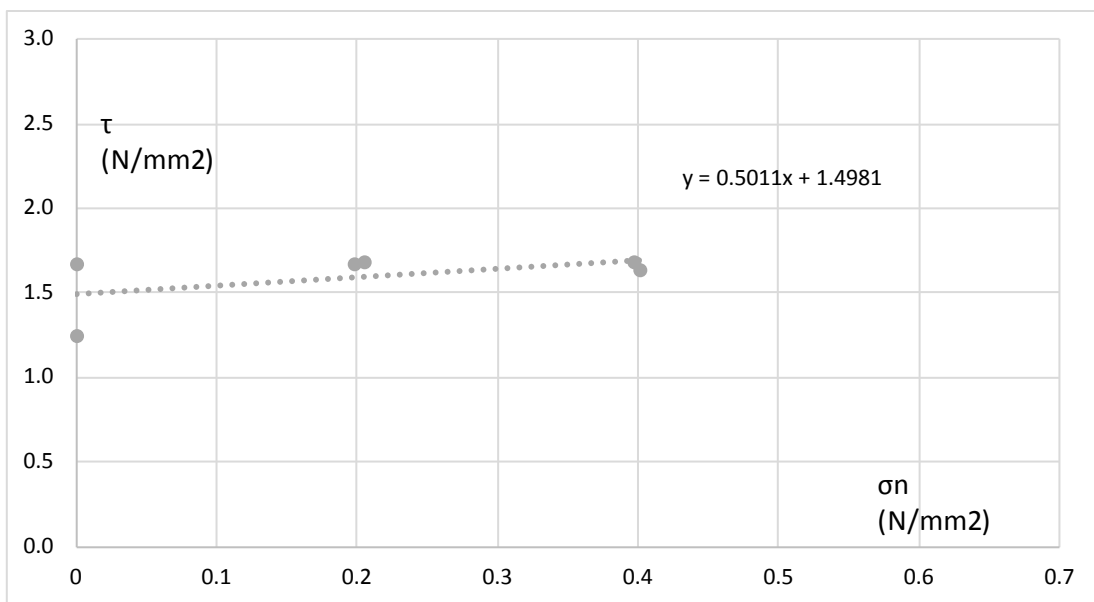
proefstuk	code	$f_{c,cube}$		afmetingen				koppelwapening				tralieligger o.g.			bezwijken		
		breedplaat	druklaag	totale hoogte	hoogte breedplaat	breedte	netto oppervlak	A_s	ϕ_{max}	$d_{koppelwapening}$	lengte vanaf de naad	afstand tot naad	diepte tralie	$\phi_{onderstaaf}$	kracht per vijzel	verhouding aansluitvlakbezwijken	bezwijkvorm
		MPa	MPa	mm	mm	mm	%	mm ²	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN		
41	R1	54.9	40.7	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	35	5	210	0,89	vloei
42	R2	57.8	43.6	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	35	5	225	0,91	vloei
43	R3	57.3	42.2	300	70	1000	100	1407	16	222	850	400	35	5	220	0,98	vloei
44	ZG1	86.1	38.2	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	104	0,96	vloei
45	ZG2	87.8	46.8	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	105	0,95	vloei
46	ZG3	90.7	43.5	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	116	0,95	vloei
47	ZR1	95.3	37.7	300	70	1000	100	791	12	224	700	450	27	5	82	0,95	pull out druklaag
48	ZR2	89.6	36.0	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	116	0,93	vloei
49	ZR3	96.5	39.2	300	70	1000	100	791	12	224	700	400	27	5	123	0,90	vloei
50	TF450BR	54.6	54.1	450	70	800	81	1608	16	372	775	425	21	5	122	1,57	aansl/pull out
51	TF280BG-19	60.5	50.9	280	70	800	64	961	16	202	775	300	21	5	64	1,53	aansl/pull out

Bijlage B Resultaten directe afschuifproeven

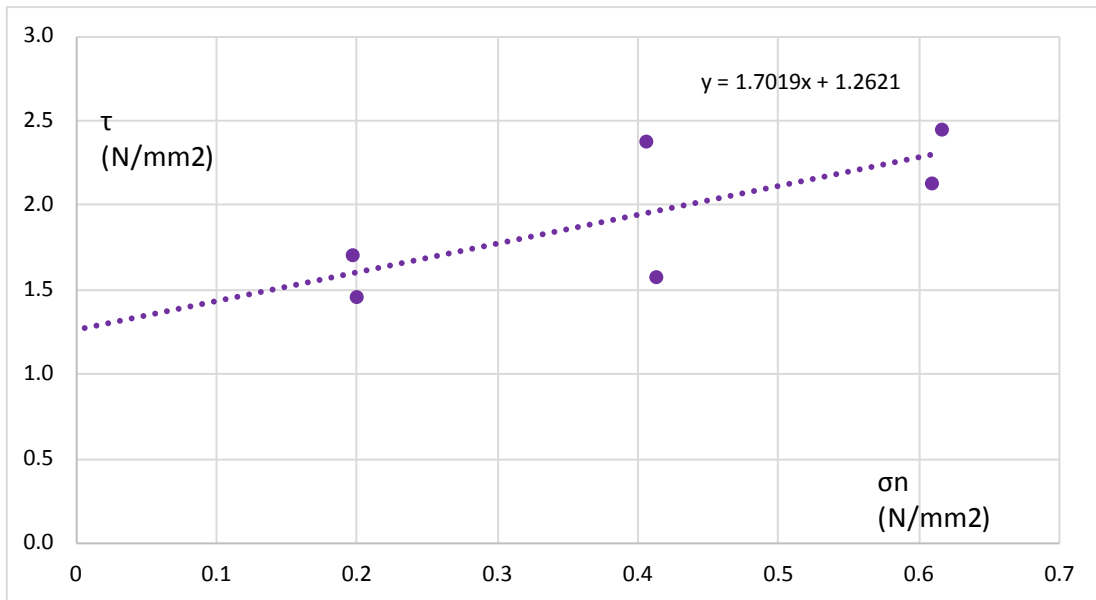
Hierna zijn voor verschillende configuraties van breedplaten en druklagen de resultaten van de directe afschuifproeven, uitgevoerd in het Structures Laboratory Eindhoven, samengevat in grafieken, zie figuur B-1 tot en met B-6. Daarbij is ook een lineaire benadering van de relatie tussen de schuifsterkte τ en de voordruk σ_n gegeven die in tabel 14 van het rapport zijn herhaald.



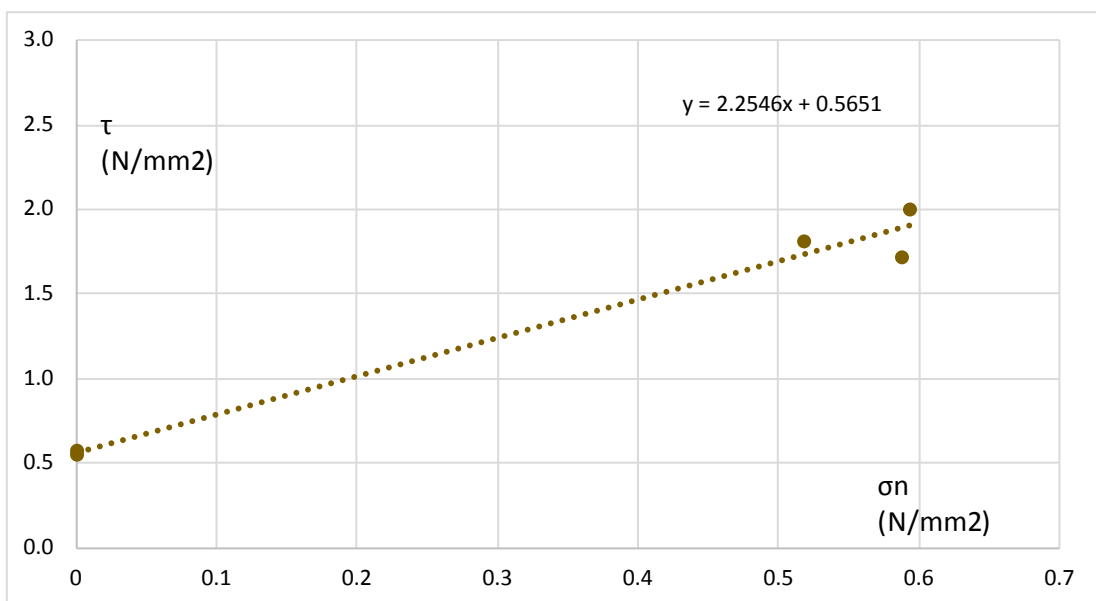
figuur B-1 Resultaten en interpretatie directe afschuifproef Cobiax proefstukken



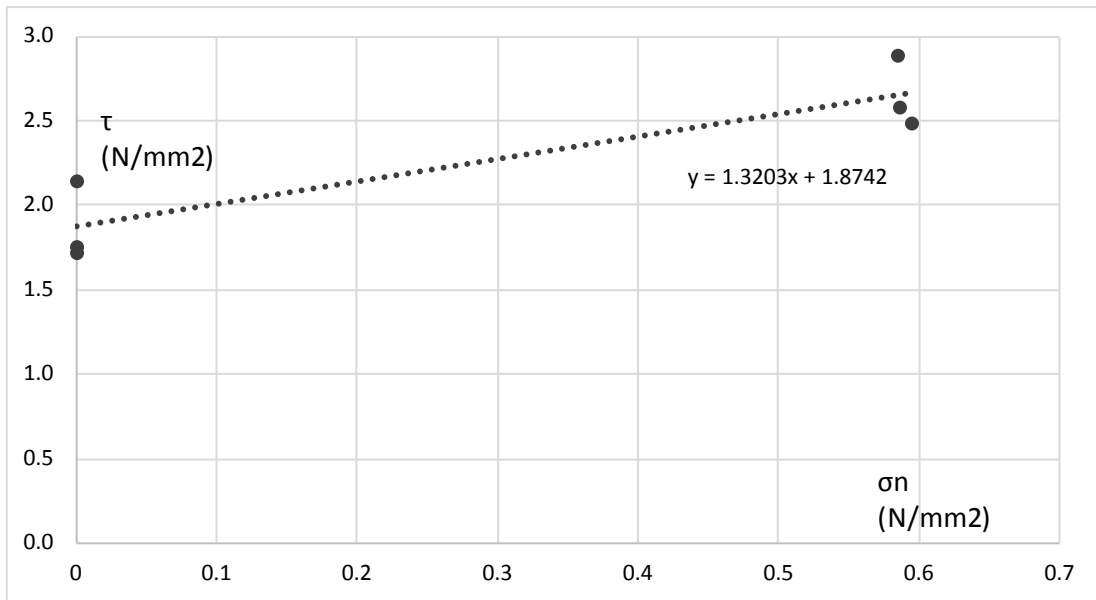
figuur B-2 Resultaten en interpretatie directe afschuifproef Betonhuis proefstukken onbewerkt



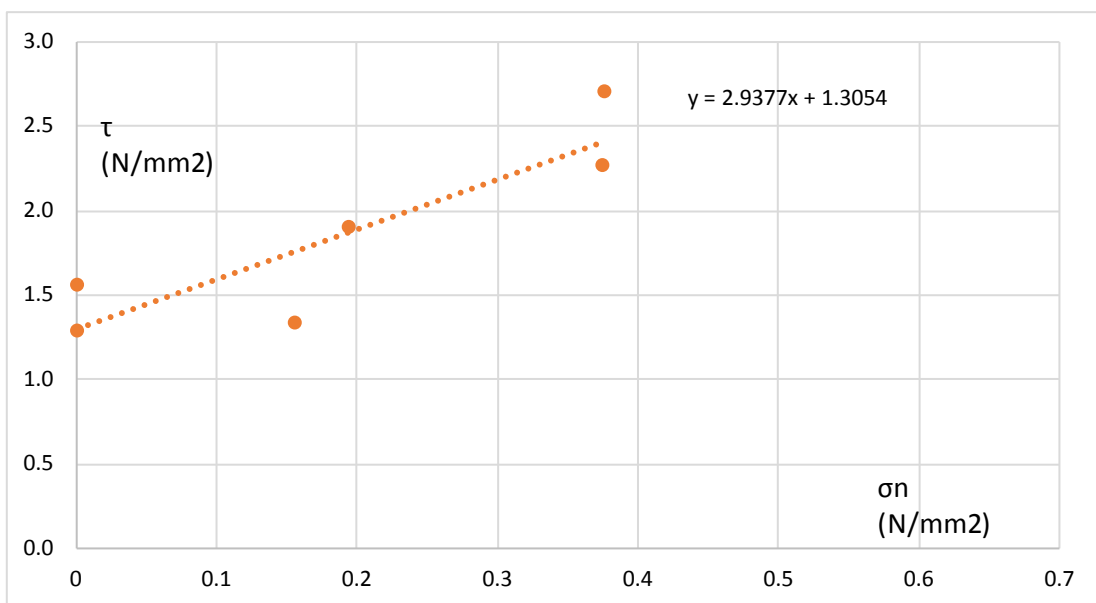
figuur B-3 Resultaten en interpretatie directe afschuifproef Betonhuis proefstukken ruw



figuur B-4 Resultaten en interpretatie directe afschuifproef zvb proefstukken glad



figuur B-5 Resultaten en interpretatie directe afschuifproef zvb proefstukken opgeruwd



figuur B-6 Resultaten en interpretatie directe afschuifproef Taskforce Versterken

Bijlage C Berekening en overzicht van bezwijkverhouding

In deze bijlage is voor proefstuk 26 – T4 een voorbeeldberekening van de krachtsverdeling in het proefstuk en de verhouding tussen het bezwijkmoment en de momentweerstand op basis van het vloeien van de koppelwapening opgenomen.

Daarna is een tabel gegeven waarin voor alle proefstukken de resultaten van deze berekening zijn samengevat.

Proefstuk 26 - T04

Materiaaleigenschappen

$f_{cm} := 38.7\text{MPa}$ gemiddelde druksterkte druklaag

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

Geometrie

$h := 300\text{mm}$ hoogte proefstuk

$b := 1000\text{mm}$ breedte proefstuk

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

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

$\varnothing_k := 16\text{mm}$ diameter koppelwapening

$n_k := 7$ aantal koppelstaven

$l_k := 850\text{mm}$ lengte koppelwapening vanaf de voeg

$\varnothing_b := 10\text{mm}$ diameter wapening in breedplaat

$n_b := 18$ aantal wapeningsstaven in breedplaat

$d_k := h - h_b - \frac{\varnothing_k}{2} = 222\cdot\text{mm}$ effectieve hoogte koppelwapening

$d_b := h - 35\text{mm} - \frac{\varnothing_b}{2} = 260\cdot\text{mm}$ effectieve hoogte wapening in de breedplaat

$l_t := 400\text{mm}$ afstand 1e tralieligger tot de voeg

Experimentele resultaten

$F_{\text{bezwijk}} := 172\text{kN}$	bezwijklast 4 puntsbuigproef (per lastpunt)
$\tau_0 := 1.5\text{MPa}$	initiële afschuifsterkte volgens directe afschuifproef (Croes)
$\mu := 0.5$	wrijvingscoëfficiënt volgens directe afschuifproef

Randvoorwaarden proefopstelling

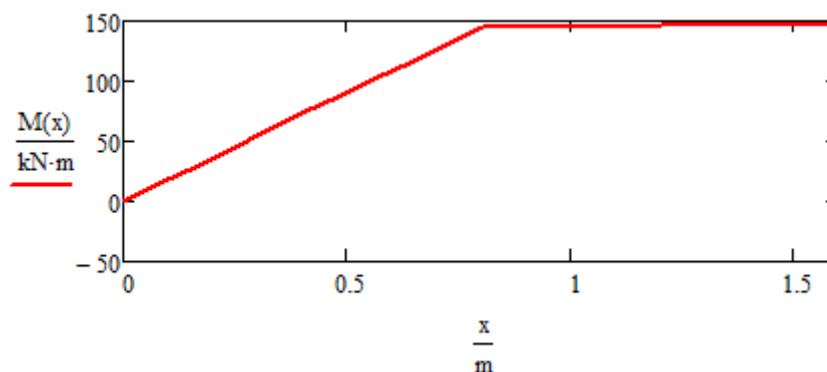
$$l_{\text{span}} := 3.2\text{m}$$
$$l_a := \frac{l_{\text{span}}}{4} = 0.8\text{m}$$
$$l_{\text{over}} := \frac{1 - l_{\text{span}}}{2} = 0.3\text{m}$$

Bepaling krachtsverdeling in proefstuk

$$q_{\text{eg}} := b \cdot h \cdot 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 7.2 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$
$$M_{\text{eg,max}} := \frac{1}{8} \cdot q_{\text{eg}} \cdot l_{\text{span}}^2 - \frac{1}{2} \cdot q_{\text{eg}} \cdot l_{\text{over}}^2 = 8.9 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$
$$M_{\text{bezwijk}} := M_{\text{eg,max}} + F_{\text{bezwijk}} \cdot l_a = 146.5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$
$$R_{\text{bezwijk}} := \frac{1}{2} \cdot q_{\text{eg}} \cdot l + F_{\text{bezwijk}} = 186 \cdot \text{kN}$$

Beschrijving van het buigende moment over de lengte van de overspanning l_{span}

$$M(x) := \frac{-1}{2} \cdot q_{\text{eg}} \cdot (l_{\text{over}} + x)^2 + R_{\text{bezwijk}} \cdot x - F_{\text{bezwijk}} \cdot \max(0, x - l_a)$$
$$x := 0, \frac{l_{\text{span}}}{40} \dots \frac{l_{\text{span}}}{2}$$



Bepaling momentweerstand op basis van vloeikoppelwapening

$$A_{sk} := n_k \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_k^2 = 1407 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{syk} := f_{ym} \cdot A_{sk} = 774 \cdot \text{kN}$$

$$x_{Rc} := \frac{4}{3} \cdot \frac{F_{syk}}{b \cdot f_{cm}} = 26.7 \cdot \text{mm}$$

$$z_k := d_k - \frac{7}{18} \cdot x_{Rc} = 212 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rk} := F_{syk} \cdot z_k = 163.8 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{ratio}_k := \frac{M_{\text{bezwijk}}}{M_{Rk}} = 0.894$$

Bepaling momentweerstand op basis van vloeibreedplaatwapening

$$A_{sb} := n_b \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \phi_b^2 = 1414 \cdot \text{mm}^2$$

$$F_{syb} := f_{ym} \cdot A_{sb} = 778 \cdot \text{kN}$$

$$x_{Rc} := \frac{4}{3} \cdot \frac{F_{syb}}{b \cdot f_{cm}} = 26.8 \cdot \text{mm}$$

$$z_b := d_b - \frac{7}{18} \cdot x_{Rc} = 250 \cdot \text{mm}$$

$$M_{Rb} := F_{syb} \cdot z_b = 194.1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\text{ratio}_b := \frac{M_{\text{bezwijk}}}{M_{Rb}} = 0.755$$

Bepaling bezwijkverhouding

$$\text{Bezwijkverhouding} := \max(\text{ratio}_k, \text{ratio}_b) = 0.894$$

Bepaling kracht en spanning in breedplaatwapening bij einde koppelwapening

$$E_{cm} := 22000 \text{ MPa} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0.3} = 33017 \cdot \text{MPa}$$

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

$$n_E := \frac{E_s}{E_{cm}} = 6.1$$

$$\rho_b := \frac{A_{sb}}{b \cdot d_b} = 5.44 \times 10^{-3}$$

$$k_x := \sqrt{(n_E \cdot \rho_b)^2 + 2 \cdot n_E \cdot \rho_b} - n_E \cdot \rho_b = 0.226$$

$$z_{eb} := d_b \cdot \left(1 - \frac{k_x}{3} \right) = 240 \cdot \text{mm}$$

$$F_{sb} := \frac{M \left(\frac{l_{span}}{2} - l_k \right)}{z_{eb}} = 563 \cdot \text{kN}$$

$$\sigma_{sb} := \frac{F_{sb}}{A_{sb}} = 398 \cdot \text{MPa}$$

Bepaling schuifspanning in volledig aansluitvlak

$$\tau_{gem} := \frac{F_{sb}}{b \cdot l_k} = 0.66 \cdot \text{MPa}$$

Bepaling schuifspanning in aansluitvlak achter tralieligger

$$\tau_{achter} := \frac{F_{sb}}{b \cdot (l_k - l_t)} = 1.25 \cdot \text{MPa}$$

Samenvatting van resultaten

$$\text{ratio}_k = 0.894$$

$$\text{ratio}_b = 0.755$$

$$\text{Bezwijkverhouding} = 0.894$$

$$\text{Kracht in kopelwapening: } \text{Bezwijkverhouding} \cdot (f_{ym} \cdot A_{sk}) = 692 \cdot \text{kN}$$

Hierna is een overzicht van alle waarden voor de bezwijkverhouding, de gemiddelde afschuifspanning in het gehele aansluitvlak (τ_{gem}) en de gemiddelde afschuifspanning in het aansluitvlak achter de eerste tralieligger (τ_{achter}). Tevens is per groep gelijke of nagenoeg gelijke proefstukken een gemiddelde waarde en de variatiecoëfficiënt beschreven.

proefstuk	code	bezwijkvorm	bezwijkverhouding	τ_{gem}	τ_{achter}		bezwijkverhouding	τ_{gem}	τ_{achter}
				MPa	MPa			MPa	MPa
1	VL18	aansl/pull out	0.383	0.42	1.14	gem	0.40	0.44	1.19
2	VA18	aansl/pull out	0.406	0.44	1.21	var	0.03	0.03	0.04
3	VL34a	aansl/pull out	0.405	0.45	1.22				
4	KL18	aansl/pull out	0.328	0.42	1.15	gem	0.31	0.41	1.06
5	KA18	aansl/pull out	0.334	0.43	1.17	var	0.08	0.08	0.12
6	KL34a	aansl/pull out	0.313	0.41	0.99				
7	KL34b	aansl/pull out	0.277	0.36	0.91				
8	BC 1-1	vloei	1.096	0.83	2.04	gem	1.10	0.83	2.04
9	BC 1-2	vloei	1.113	0.84	2.07	var	0.01	0.02	0.02
10	BC 1-3	vloei	1.083	0.81	2.00				
11	BC 2-1	vloei	1.099	0.83	2.04	gem	1.10	0.82	2.04
12	BC 2-2	vloei	1.095	0.82	2.04	var	0.00	0.01	0.00
13	BC 2-3	vloei	1.093	0.82	2.04				
14	BC 3-1	vloei	1.087	0.82	1.33	gem	1.04	0.79	1.28
15	BC 3-2	aansl/pull out	0.943	0.71	1.16	var	0.08	0.08	0.08
16	BC 3-3	vloei	1.101	0.83	1.35				
17	BC 4-1	aansl/pull out	0.988	1.27	2.22	gem	0.99	1.27	2.21
18	BC 4-2	aansl/pull out	0.963	1.24	2.16	var	0.02	0.02	0.02
19	BC 4-3	aansl/pull out	1.006	1.3	2.26				
20	BC 5-1	vloei	1.054	0.79	1.22	gem	1.08	0.81	1.25
21	BC 5-2	vloei	1.095	0.82	1.26	var	0.02	0.03	0.02
22	BC 5-3	vloei	1.105	0.83	1.28				
23	T1	aansl/pull out	0.95	0.52	1.20	gem	0.99	0.54	1.26
24	T2	aansl/pull out	1.03	0.56	1.30	var	0.04	0.04	0.04
25	T3	aansl/pull out	1	0.54	1.27				
26	T4	aansl/pull out	0.894	0.66	1.25	gem	0.79	0.58	1.10
27	T5	aansl/pull out	0.817	0.6	1.14	var	0.15	0.15	0.15
28	T6	aansl/pull out	0.666	0.49	0.92				
29	T10	aansl/pull out	0.583	0.56	1.30	gem	0.61	0.58	1.35
30	T11	aansl/pull out	0.695	0.67	1.55	var	0.13	0.14	0.13
31	T12	aansl/pull out	0.539	0.51	1.20				
32	T13	aansl/pull out	0.908	0.47	0.93	gem	0.85	0.44	0.87
33	T14	aansl/pull out	0.692	0.36	0.70	var	0.17	0.17	0.17
34	T15	aansl/pull out	0.956	0.5	0.98				

proefstuk	code	bezwijkvorm	bezwijkver- houding	τ_{gem}	τ_{achter}		bezwijkver- houding	τ_{gem}	τ_{achter}
				MPa	MPa			MPa	MPa
35	T19	aansl/pull out	1.010	0.5	0.99	gem	0.93	0.46	0.91
36	T20	aansl/pull out	0.976	0.49	0.96	var	0.12	0.12	0.12
37	T21	aansl/pull out	0.796	0.4	0.78				
38	T22	aansl/pull out	0.966	0.7	0.80	gem	0.95	0.69	0.79
39	T23	aansl/pull out	0.991	0.72	0.82	var	0.05	0.05	0.05
40	T24	aansl/pull out	0.896	0.65	0.74				
41	R1	vloei	1.077	0.77	1.46	gem	1.11	0.80	1.51
42	R2	vloei	1.147	0.82	1.55	var	0.03	0.03	0.03
43	R3	vloei	1.12	0.81	1.52				
44	ZG1	vloei	0.972	0.51	1.18	gem	1.01	0.53	1.22
45	ZG2	vloei	0.978	0.51	1.19	var	0.05	0.05	0.05
46	ZG3	vloei	1.067	0.56	1.30				
47	ZR1	pull out druklaag	0.785	0.4	1.11	gem	0.99	0.52	1.26
48	ZR2	vloei	1.068	0.56	1.30	var	0.20	0.20	0.11
49	ZR3	vloei	1.126	0.59	1.37				
50	TF450BR	aansl/pull out	0.339	0.45	1.22	gem	0.34	0.45	1.22
51	TF280BG-19	aansl/pull out	0.554	0.41	1.05	gem	0.55	0.41	1.05

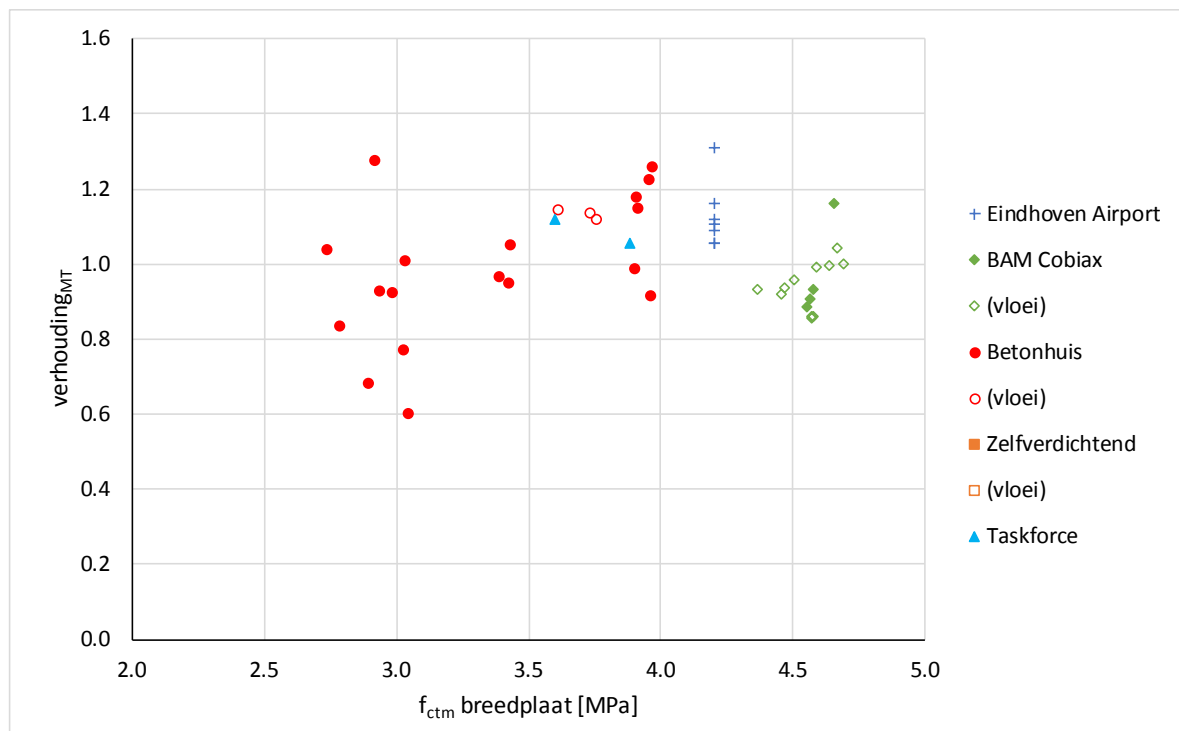
Bijlage D Invloed variabelen op verhouding_{MT}

In deze bijlage is de verhouding tussen diverse variabelen, beschouwd bij de uitgevoerde proeven, en het model voor het bepalen van de maximale trekkracht in de koppelwapening getoond. De grootte van de variabelen is hierbij vergeleken met de verhouding_{MT} waarvoor geldt:

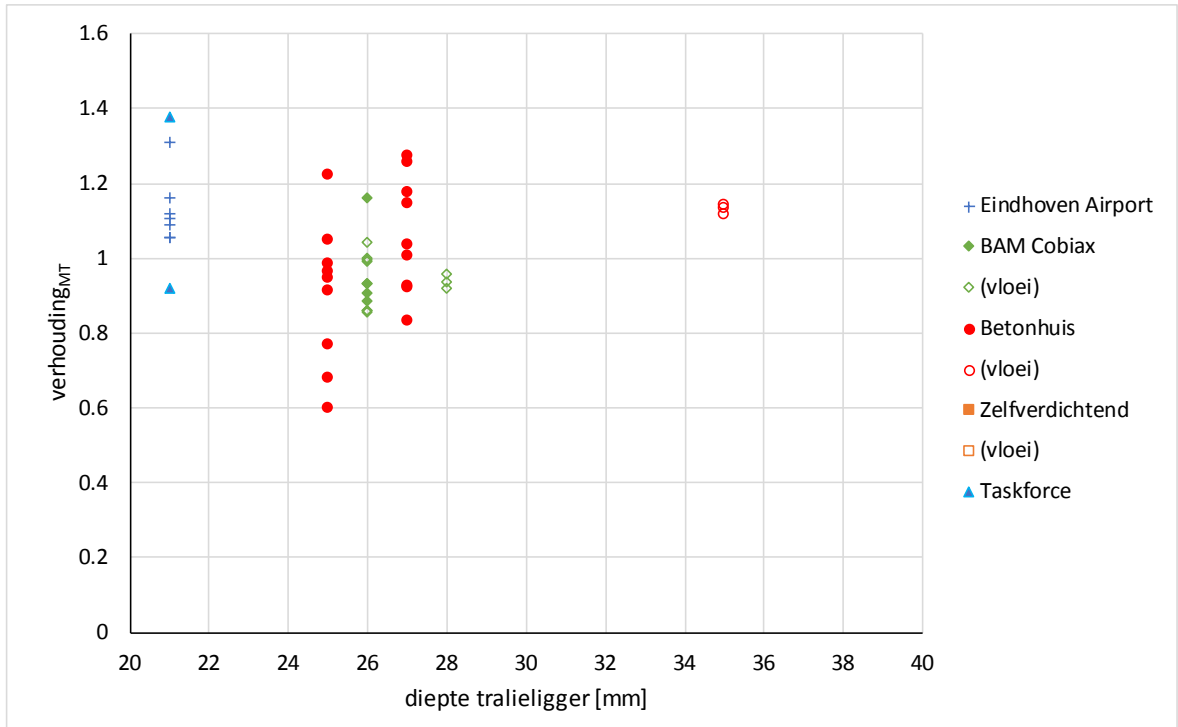
$$\text{verhouding}_{\text{MT}} = \frac{\text{Trekkracht}_{\text{model}}}{\text{Trekkracht}_{\text{proef}}} \quad (8)$$

Als de verhouding_{MT} groter is dan 1,0 dan leidt het model tot een hogere trekkracht dan tijdens de proef is opgetreden. In het geval van vloeï van de koppelwapening zou de verhouding_{MT} dus groter moeten zijn dan 1,0 omdat het uittrekken van de tralieligger dan niet maatgevend moet zijn.

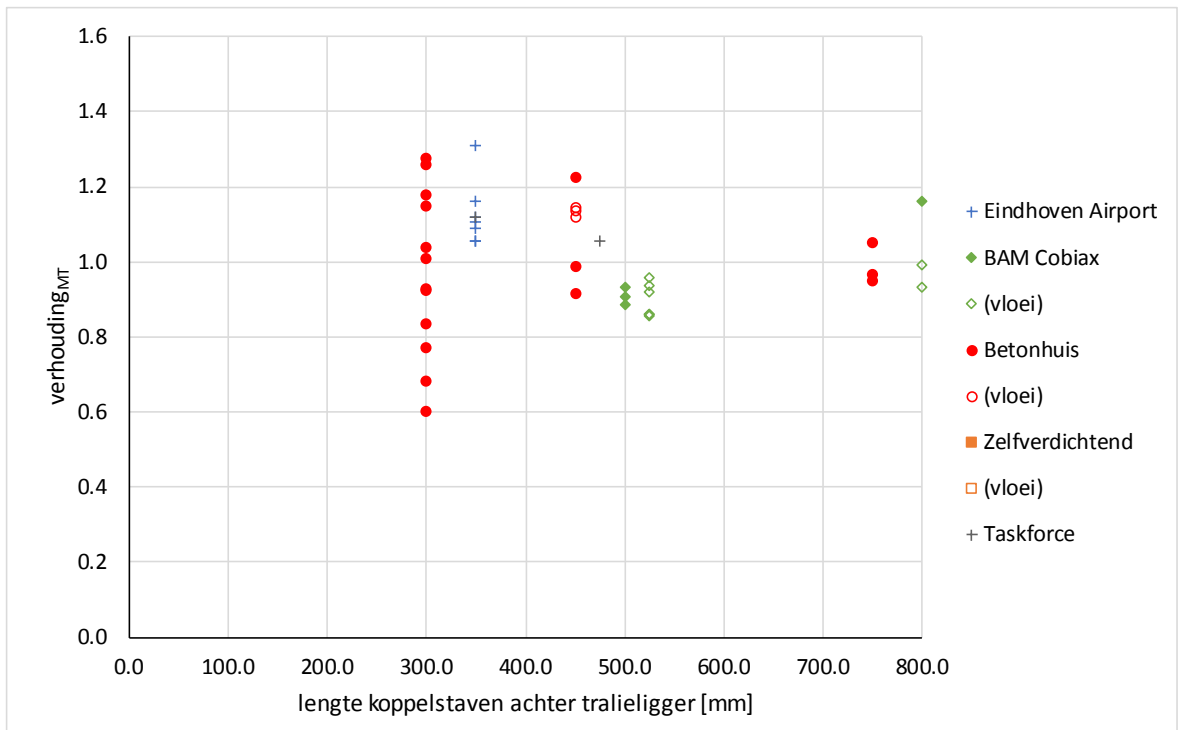
Uit de grafieken in de figuren D-1 tot en met D-7 blijkt dat als de verhouding_{MT} wordt beschouwd voor die situaties waarbij het bezwijken van het aansluitvlak en het uittrekken van de tralieligger is opgetreden, er geen duidelijke nadere relatie met de beschouwde variabele waarneembaar is.



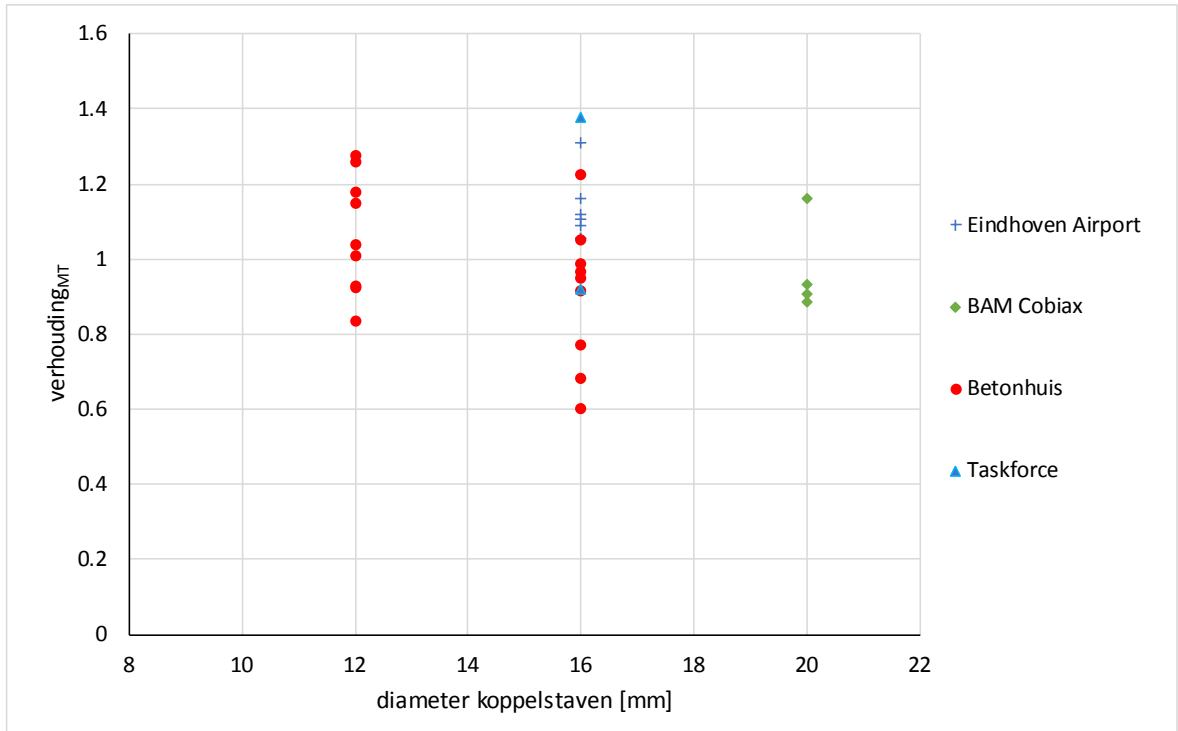
figuur D-1 Relatie gemiddelde treksterkte beton breedplaat en verhouding_{MT}



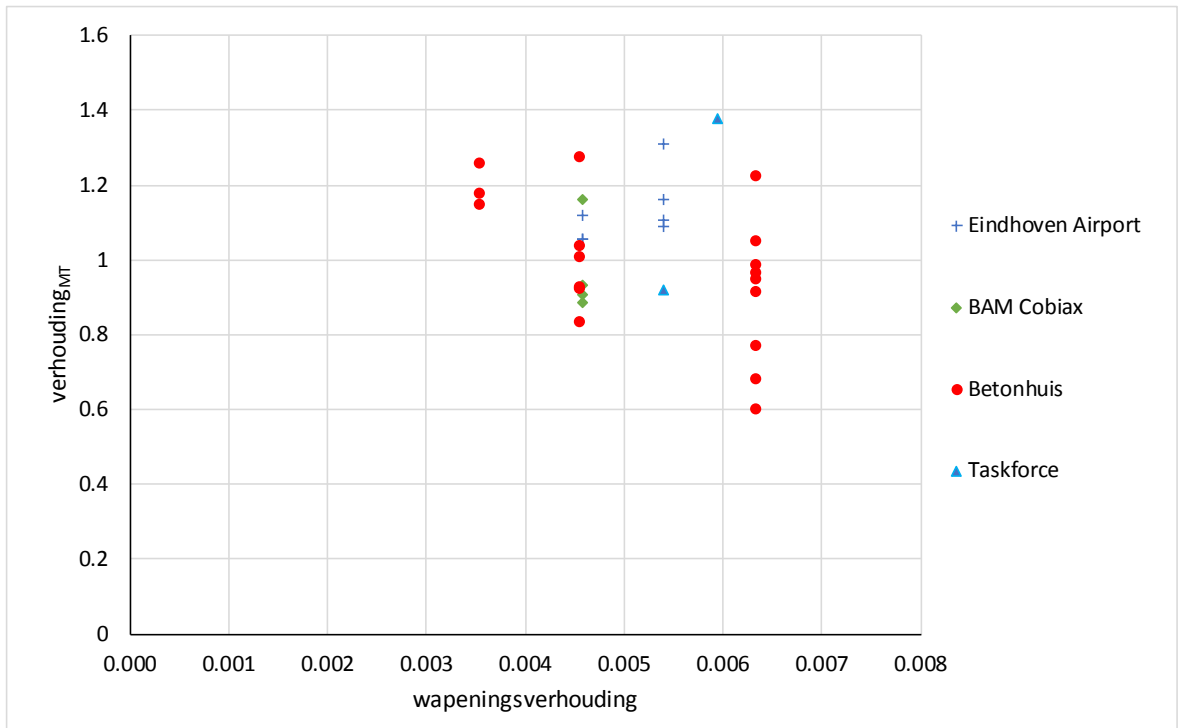
figuur D-2 Relatie diepte tralieligger in breedplaat en verhouding_{MT}



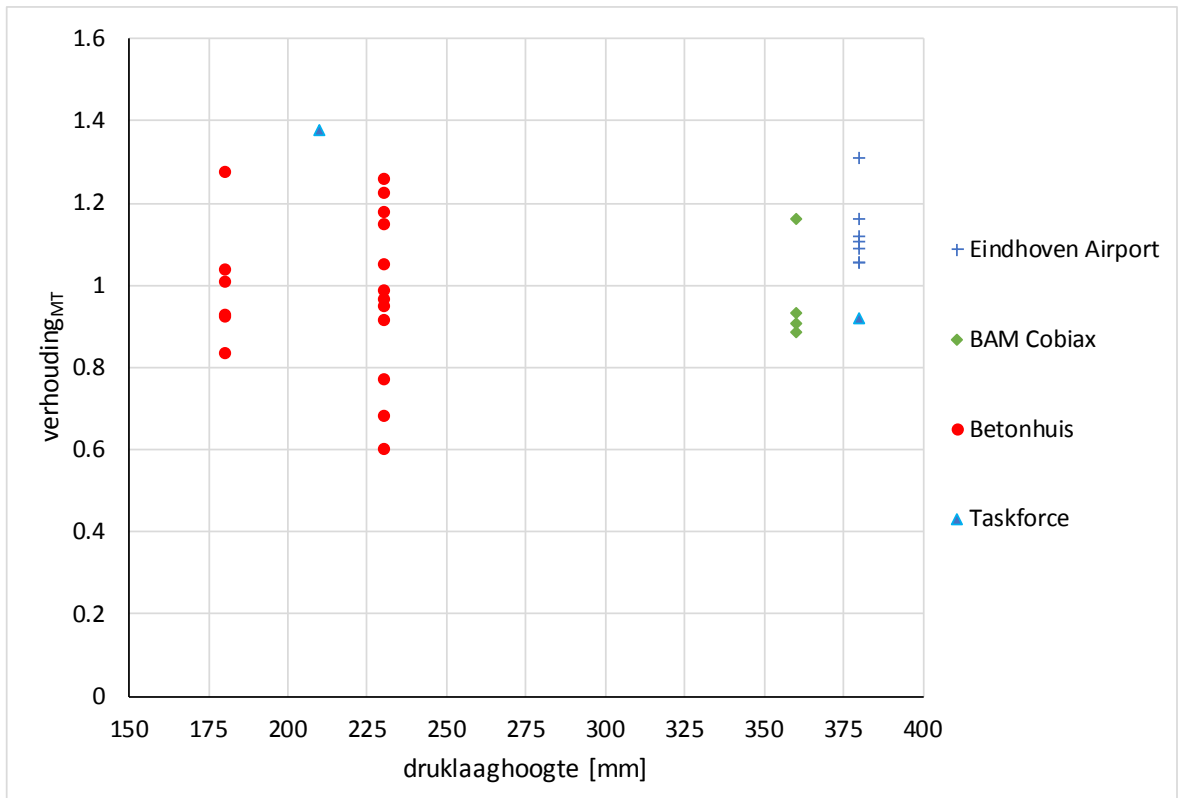
figuur D-3 Relatie lengte koppelwapening achter de tralieligger en verhouding_{MT}



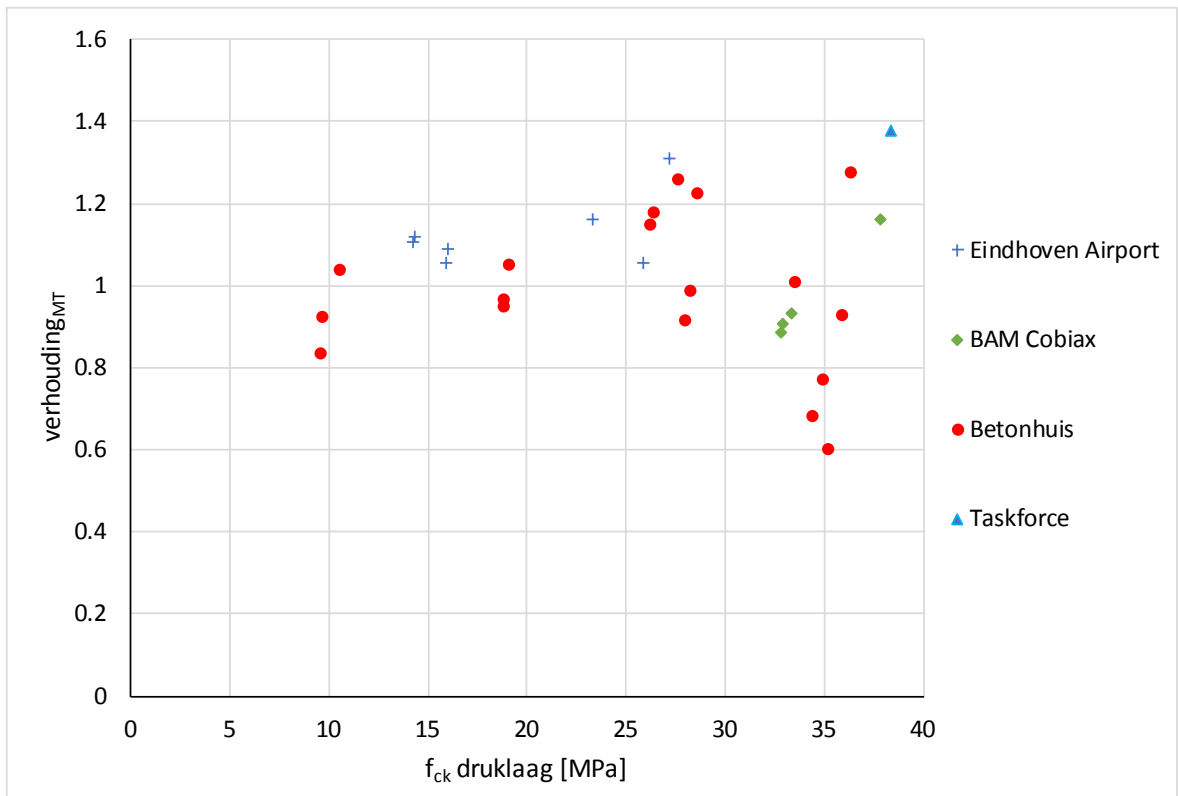
figuur D-4 Relatie diameter koppelwapening en verhouding $_{MT}$



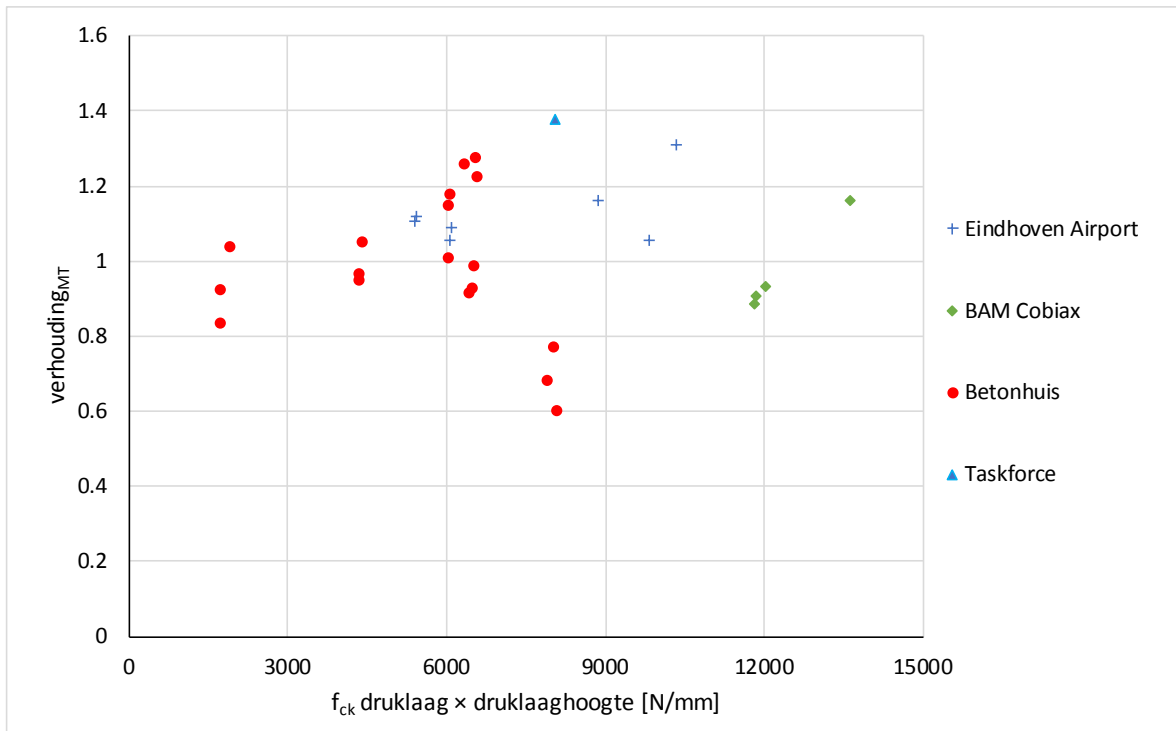
figuur D-5 Relatie wapeningsverhouding koppelwapening en verhouding $_{MT}$



figuur D-6 Relatie hoogte druklaag en verhouding_{MT}



figuur D-7 Relatie druksterkte beton druklaag en verhouding_{MT}

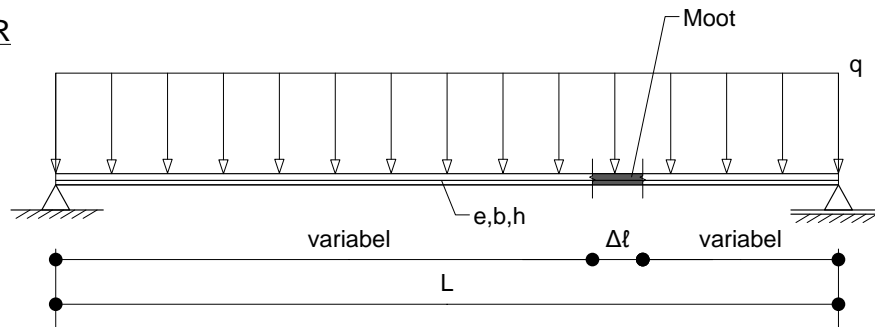


figuur D-8 Relatie product van hoogte en druksterkte druklaag en verhouding_{MT}

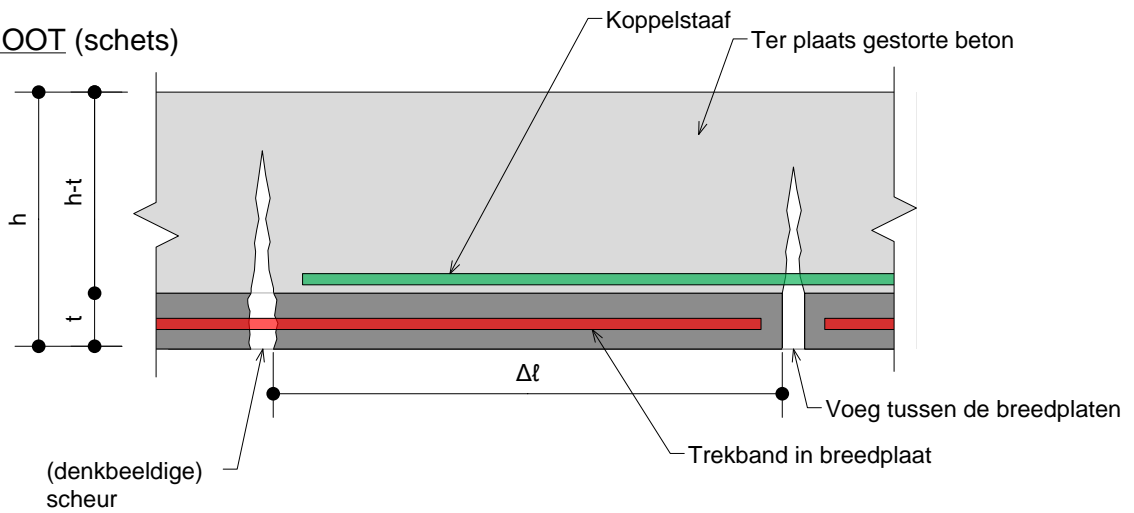
Bijlage E Invloed dwarskracht op krachten in aansluitvlak

E-1 Rekenmodel

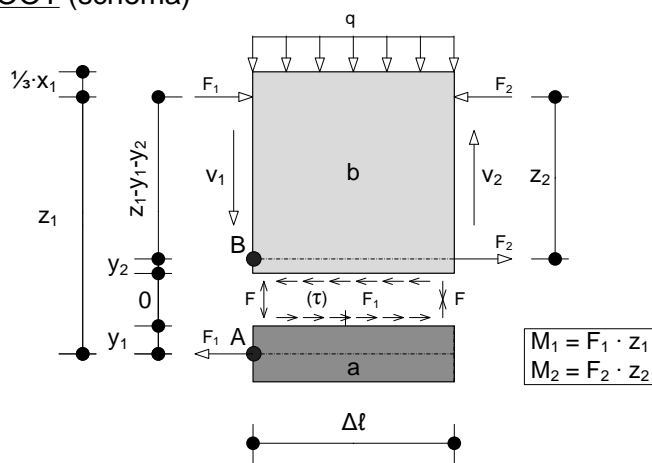
LIGGER



MOOT (schets)



MOOT (schema)



E-2 Oplossing

a) breedplaat

$$\sum F_z = 0$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum M_A = 0 \quad \curvearrowright$$

$$F = F$$

$$F_1 = F_1$$

$$F \cdot \Delta\ell = F_1 \cdot y_1$$

$$\Leftrightarrow F_1 = \frac{F \cdot \Delta\ell}{y_1}$$

$$\Leftrightarrow F = \frac{F_1 \cdot y_1}{\Delta\ell}$$

b) druklaag

$$\sum F_z = 0$$

$$\sum F_x = 0$$

$$\sum M_B = 0 \quad \curvearrowright$$

$$V_2 = V_1 + q \cdot \Delta\ell$$

$$F_1 - F_2 + F_2 - F_1 = 0 \quad F_1 = F_1$$

$$F_1 (z_1 - y_1 - y_2) + \frac{1}{2}q\Delta\ell^2 + F_1 \cdot y_2 - V_2 \cdot \Delta\ell - F_2 \cdot z_2 = 0$$

\Downarrow

$$F_1 (z_1 - y_1 - y_2 + y_2) + \frac{1}{2}q\Delta\ell^2 - V_2 \cdot \Delta\ell - \frac{y_1}{y_1} F \cdot \Delta\ell - F_2 \cdot z_2 = 0$$

\Downarrow

$$\frac{F \cdot \Delta\ell}{y_1} (z_1 - y_1 + y_1) + \frac{1}{2}q\Delta\ell^2 - V_2 \cdot \Delta\ell - F_2 \cdot z_2 = 0$$

Per definitie:

$$M_2 = F_2 \cdot z_2$$

\Downarrow

$$\frac{F \cdot \Delta\ell \cdot z_1}{y_1} + \frac{1}{2}q\Delta\ell^2 - V_2 \cdot \Delta\ell - M_2 = 0$$

\Downarrow

$$F = \frac{(V_2 \cdot \Delta\ell + M_2 - \frac{1}{2}q\Delta\ell^2)}{z_1 \cdot \Delta\ell} \cdot y_1$$

(afstroopkracht)

en

$$F_1 = \frac{V_2 \cdot \Delta\ell + M_2 - \frac{1}{2}q\Delta\ell^2}{z_1} = \frac{M_1}{z_1}$$

(trekband)

$$F = \frac{M_1}{z_1 \cdot \Delta\ell} \cdot y_1 = \frac{F_1}{\Delta\ell} \cdot y_1$$

Per definitie:

$$\tau = \frac{F_1}{b \cdot \Delta \ell}$$



$$\tau = \frac{V_2 \cdot \Delta \ell + M_2 - \frac{1}{2}q\Delta \ell^2}{z_1 \cdot b \cdot \Delta \ell}$$

(schuifspanning)

Per definitie:

$$M_1 = V_2 \cdot \Delta \ell + M_2 - \frac{1}{2}q\Delta \ell^2$$



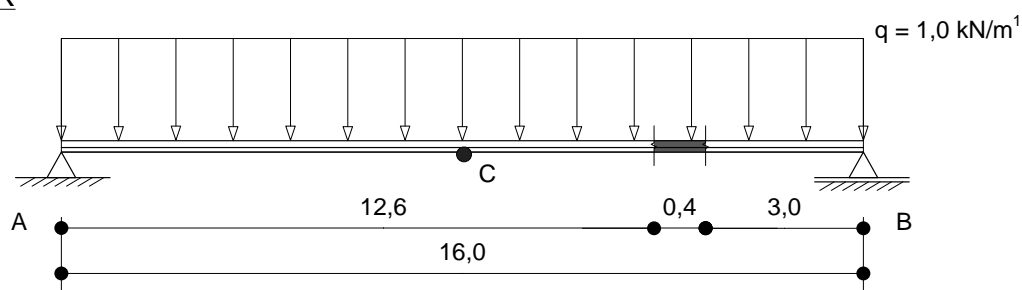
$$\tau = \frac{M_1}{z_1 \cdot b \cdot \Delta \ell}$$

(schuifspanning: relatie M_1 en τ)

(voor de bepaling van τ , moet de momentenlijn worden verschoven)
↔ M_1

E-3 Rekenvoorbeeld

LIGGER



$$V_A = V_B = \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 16 = 8,0 \text{ kN}$$

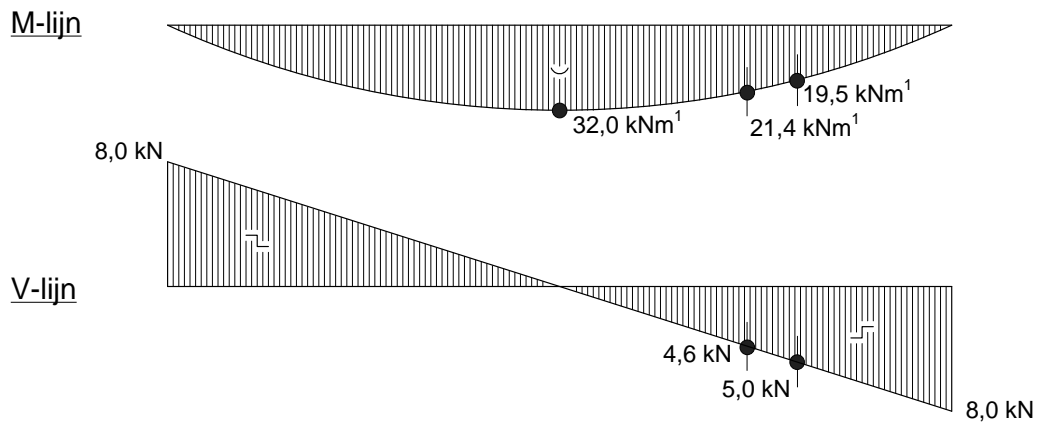
$$M_C = \frac{1}{8} \cdot 1,0 \cdot 16^2 = 32 \text{ kNm}^1$$

$$V_2 = 8,0 - 3,0 \cdot 1,0 = 5,0 \text{ kN}$$

$$V_1 = 8,0 - 3,4 \cdot 1,0 = 4,6 \text{ kN}$$

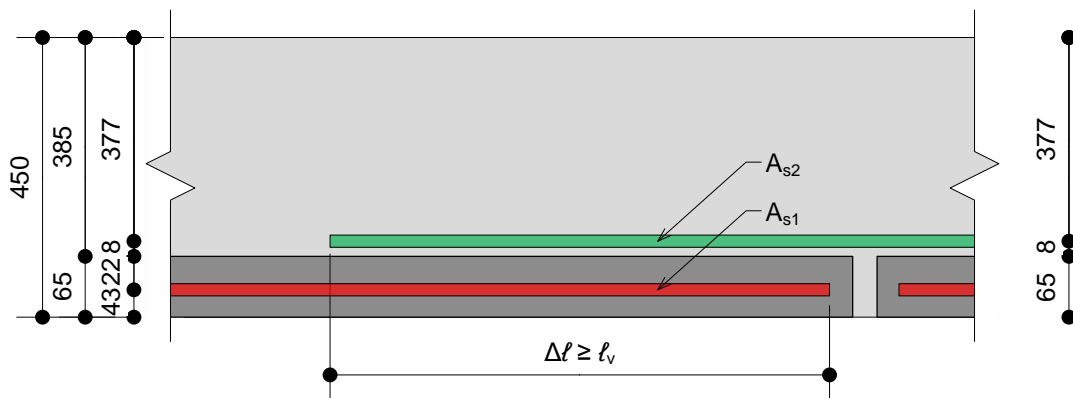
$$M_2 = 8,0 \cdot 3,0 - \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 3,0^2 = 19,5 \text{ kNm}^1$$

$$M_1 = 8,0 \cdot 3,4 - \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 3,4^2 = 21,4 \text{ kNm}^1$$

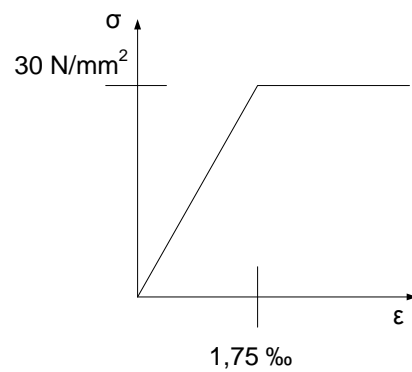
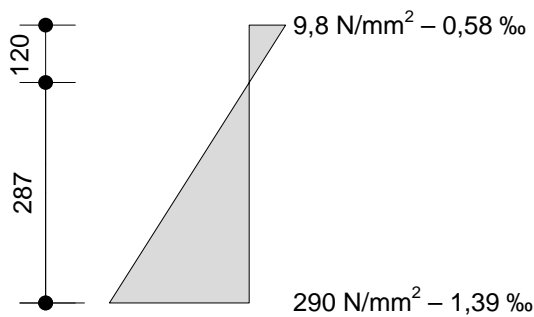


Verdere gegevens:

- $b = 100 \text{ mm}$;
- $h = 450 \text{ mm}$;
- $t = 65 \text{ mm}$;
- $\Delta l = 400 \text{ mm}$;
- C30/35
- $A_{s1} = A_{s2} = 201 \text{ mm}^2 (\text{\textcircled{16}})$



Links:



$$E_c = \frac{30 \text{ N/mm}^2}{1,75 \cdot 10^{-3}} = 17000 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{s1} = 290 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c1} = 9,8 \text{ MPa}$$

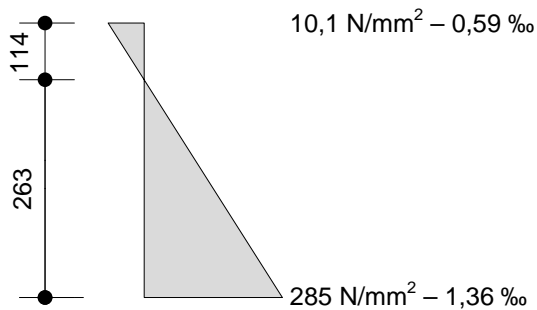
$$F_1 = 290 \cdot 0,201 = 58 \text{ kN} \quad F_1 = \frac{1}{2} \cdot 9,8 \cdot 100 \cdot 120 \cdot 10^{-3} = 59 \text{ kN}$$

($\leftrightarrow \approx 58,5 \text{ kN}$)

$$z_1 = 450 - 43 - \frac{1}{3} \cdot 120 = 367 \text{ mm}$$

$$M_1 = 58,5 \cdot 0,367 = 21,4 \text{ kNm} \quad (\text{voldoet})$$

Rechts:



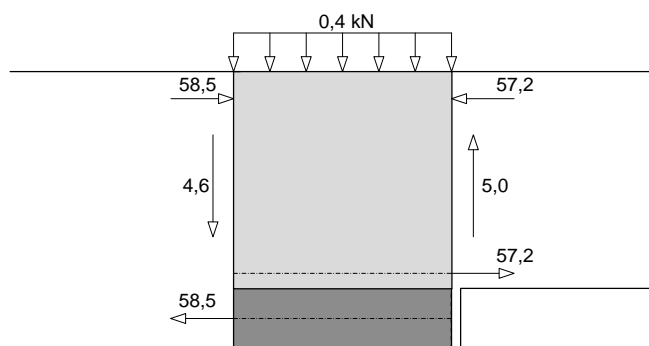
$$\sigma_{s2} = 285 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{c2} = 10,1 \text{ N/mm}^2$$

$$F_2 = 285 \cdot 0,201 = 57 \text{ kN} \quad F_2 = \frac{1}{2} \cdot 10,1 \cdot 100 \cdot 114 \cdot 10^{-3} = 57,5 \text{ kN}$$

($\leftrightarrow \approx 57,2 \text{ kN}$)

$$z_2 = 377 - \frac{1}{3} \cdot 114 = 339 \text{ mm}$$

$$M_2 = 57,2 \cdot 0,339 = 19,4 \text{ kNm} \quad (\text{voldoet})$$



Relaties met E-2-b:

$$F_1 = \frac{V_2 \cdot \Delta \ell + M_2 - \frac{1}{2} q \Delta \ell^2}{z_1} = \frac{5,0 \cdot 0,4 + 19,4 - \frac{1}{2} \cdot 1,0 \cdot 0,4^2}{0,367} = 58,1 \text{ kN}$$

$$F_1 = \frac{M_1}{z_1} = \frac{21,4}{0,367} = 58,3 \text{ kN}$$

$$F = \frac{F_1}{\Delta \ell} \cdot y_1 = \frac{58,1 \cdot 22}{400} = 3,2 \text{ kN}$$

$$\tau = \frac{58,1 \cdot 10^3}{100 \cdot 400} = 1,45 \text{ N/mm}^2 \quad \underline{\text{of}} \quad \tau = \frac{21,4 \cdot 10^6}{367 \cdot 100 \cdot 400} = 1,45 \text{ N/mm}^2$$

De dwarskrachten V_1 en V_2 hebben geen relatie met de schuifkracht en de normaalkrachten in het aansluitvlak.

Dus: $\tau = f(M_1, z_1, b, \Delta \ell)$

Bijlage F Proeven met koppelwapening met kleine diameters

In de literatuur zijn verschillende proeven beschreven op proefstukken met koppelwapening met een kleine diameter (< 12 mm) en relatief korte lengte.

Daar waar bij de beschrijving van de proefstukken in de tabel op de volgende pagina, geen maat is gegeven voor de afstand tussen de rand van de breedplaat en de tralieligger, was over de lengte van de koppelwapening geen wapening aanwezig die de breedplaat met de druklaag verbond. In dat geval is de wapeningsverhouding ρ gelijk aan 0.

De resultaten van de proeven worden vergeleken met de weerstand die volgt uit

$$\tau_{Rdi} = c_{v1} (f_{ck}^{0.5}) / \gamma_c + \rho f_{yd} \mu_v \sin \alpha_F$$

$$F_{model} = A_{netto,aansluitvlak} \tau_{Rdi}$$

In de figuren F-1 en F-2 is de verhouding tussen de uit de proeven afgeleide trekkracht in de koppelwapening en de weerstand die volgt uit het beschreven afschuifmodel gepresenteerd op de verticale as.

In figuur F-2 is deze verhouding uitgezet tegen de wapeningsverhouding maal $\sin \alpha$. De wapeningsverhouding waarbij, bij het bepalen van een ondergrenswaarde in hoofdstuk 7 is uitgegaan volgt uit:

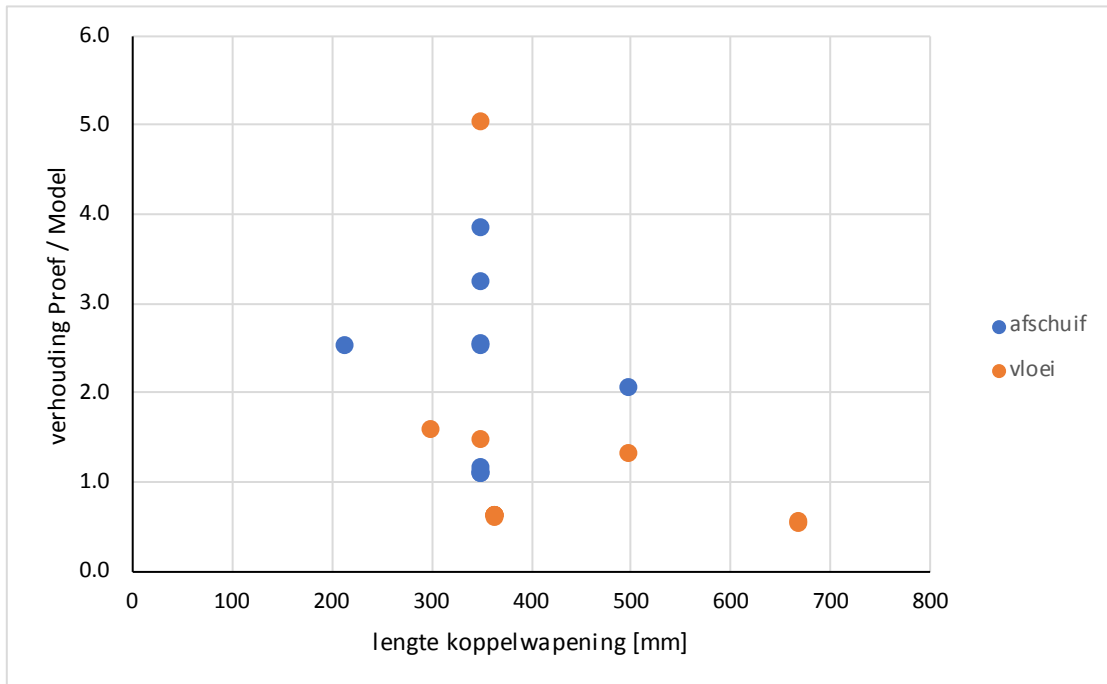
$$A_{sv} = 20 \text{ } \emptyset 5 = 20 \times 19,6 = 393 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$\rho \approx A_{sv} / (l_{kop} b) = 393 / (500 \cdot 1000) = 0,00079$$

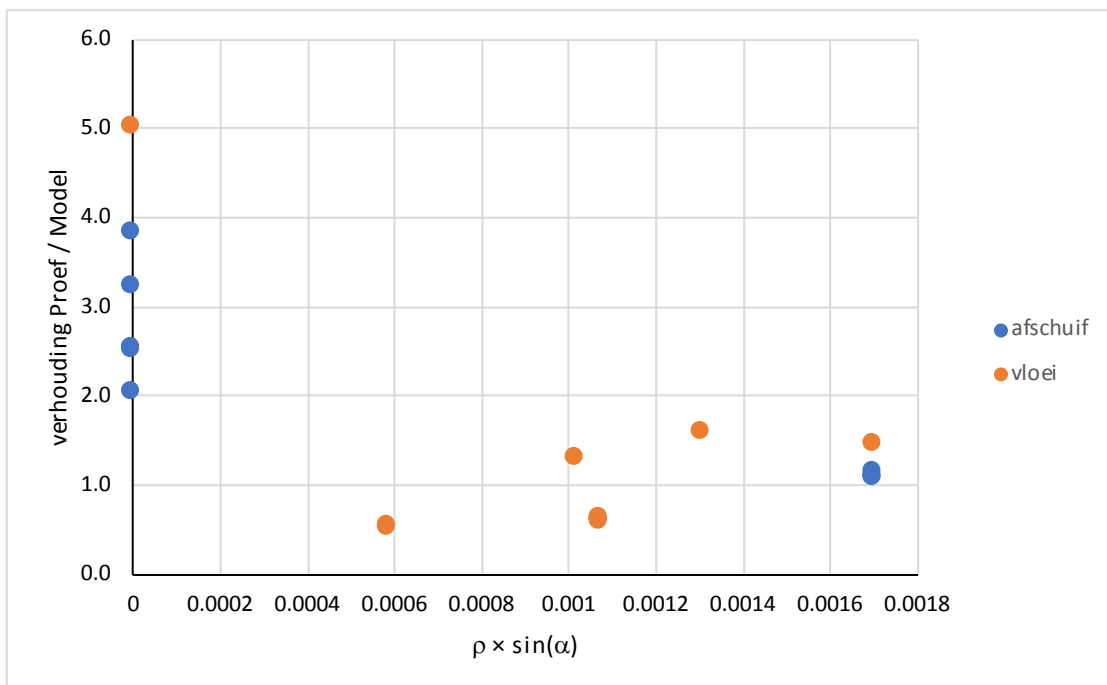
$$\rho \sin 60^\circ = 0,00068.$$

Uit de figuren blijkt dat bij een hoge waarde voor $\rho \sin \alpha$ proefstukken wordt gevonden die door afschuiving bezwijken en die een relatief lage waarde voor de verhouding tussen de proef en het model hebben. Als er geen verbindingswapening is toegepast is de verhouding tussen de proef en het model ten minste gelijk aan 2,0.

proefstuk	code	bron	Ø [mm]	l _{kop} [mm]	b [mm]	% ef- fectief	afstand tralie [mm]	f _{ck} [MPa]	sort beton	afwerking breedplaat	trekkracht in koppel- wapening [kN]	bezwijkvorm
52	GH1	[19]	8	350	1000	74	250	25.6	zvb	niet afgewerkt	179	aansl/pull out
53	GH2	[19]	8	350	1000	74	250	25.6	zvb	niet afgewerkt	186	aansl/pull out
54	GH3	[19]	8	350	1000	74	250	25.6	zvb	niet afgewerkt	177	aansl/pull out
55	GH4	[19]	8	350	1000	74	250	25.6	zvb	niet afgewerkt	239	vloei
56	GH5	[19]	8	350	1000	74	250	25.6	zvb	niet afgewerkt	176	aansl/pull out
57	GH6	[20]	8	350	1000	74	500	25.6	zvb	niet afgewerkt	235	vloei
58	GH7	[20]	8	350	1000	74		25.6	zvb	niet afgewerkt	151	aansl/pull out
59	GH8	[20]	8	350	1000	74		25.6	zvb	niet afgewerkt	119	aansl/pull out
60	GH9	[20]	8	350	1000	74		25.6	zvb	niet afgewerkt	180	aansl/pull out
61	GH10	[20]	8	350	1000	74		25.6	zvb	niet afgewerkt	118	aansl/pull out
62	L-H1	[22]	8	365	500	100	400	25.6	regulier	afgewerkt	78	vloei
63	L-H2	[22]	8	365	500	100	400	25.6	regulier	afgewerkt	79.4	vloei
64	L-H3	[22]	8	365	500	100	400	25.6	regulier	afgewerkt	76.5	vloei
65	L-A1	[22]	8	365	500	100	400	25.6	regulier	opgeruwd	79.7	vloei
66	L-A2	[22]	8	365	500	100	400	25.6	regulier	opgeruwd	77.8	vloei
67	L-A3	[22]	8	365	500	100	400	25.6	regulier	opgeruwd	78	vloei
68	S-3	[24]	10	500	500	77	95	22.4	regulier	opgeruwd	173	vloei
69	S-5	[24]	10	500	500	77		21.1	regulier	opgeruwd	145	aansl/pull out
70	S-6	[24]	10	300	500	100	95	21.1	regulier	opgeruwd	168.1	vloei
71	W-B1	[25]	6	670	500	100	200	19.9	regulier	opgeruwd	97.4	vloei
72	W-B2	[25]	6	670	500	100	600	19.9	regulier	opgeruwd	104	vloei
73	W-B3	[25]	6	215	500	100		19.9	regulier	opgeruwd	65	aansl/pull out



figuur F-1 Verhouding Proef/Model uitgezet tegen de lengte van de koppelwapening boven de breedplaat



figuur F-2 Verhouding Proef/Model uitgezet tegen de wapeningsverhouding van de verbindingswapening zoals tralieliggers

Bijlage G Proefbelasten

G.1 Inleiding

Bij vloeren waarbij op basis van een toets middels de rekenregels in dit rapport niet aangetoond kan worden dat aan de volgens NEN 8700 vereiste veiligheid kan worden voldaan, kan worden overwogen om een proefbelasting uit te voeren. Als de vloer bij de vooraf bepaalde grootte van de proefbelasting niet bezwijkt en/of geen schade vertoont die het draagvermogen kan beïnvloeden, kan de vloer alsnog worden beschouwd als voldoende veilig volgens NEN 8700.

Bij het beproeven van de vloer is het belangrijk dat door betrokken partijen van te voren een afspraak wordt gemaakt over de grootte van de proefbelasting en dat voor alle partijen duidelijk is wat de mogelijke consequenties van een proefbelasting kunnen zijn. Het is mogelijk dat de schade die bij een proefbelasting ontstaat, zodanig kan zijn dat de proefbelaste delen en eventueel andere delen van het gebouw niet meer gebruikt kunnen worden en ook niet gerepareerd kunnen worden. Vervangen van die constructie delen resteert dan nog.

Vooraf aan een proefbelasting moet een plan worden opgesteld waarin onder andere aandacht wordt besteed aan:

- a. het bepalen van de verwachte bezwijklast van de constructie;
- b. het bepalen van de grootte van de aan te brengen proefbelasting;
- c. het bepalen van grenswaarden voor de verschillende criteria op basis waarvan de proef wordt afgebroken;
- d. het beschrijven van maatregelen om gevolgen bij falen te beperken;
- e. het beschrijven van maatregelen om de persoonlijke veiligheid tijdens het uitvoeren van de proef te waarborgen;
- f. de wijze van aanbrengen van de proefbelasting;
- g. de wijze waarop metingen tijdens de proefbelasting worden uitgevoerd.

G.2 Bepalen van de verwachte bezwijklast

Om het nut en het risico van het proefbelasting te kunnen beschrijven is het noodzakelijk om voorafgaand aan de proef, de te verwachte bezwijklast te bepalen. Hierbij moet worden uitgegaan van gemiddelde materiaaleigenschappen en rekenregels en/of resultaten van experimenteel onderzoek die het gemiddelde bezwijkgedrag van een constructie beschrijven. Voor het beschrijven van het kritische vloerdetail kan hierbij gebruik worden gemaakt van de beschikbare verslagen van experimenteel onderzoek en de vergelijkingen in paragraaf 5.5.2 en 5.5.3 die het gemiddelde bezwijkgedrag van het kritische vloerdetail beschrijven.

G.3 Grootte van de aan te brengen proefbelasting

G.3.1 Inleiding

De grootte van de proefbelasting moet zodanig worden gekozen, dat gesteld kan worden dat de vloer voldoet aan de eisen van NEN 8700. Enerzijds is daarbij het minimaal voorgeschreven veiligheidsniveau van belang en anderzijds de grootte van de belastingen. Als vertrekpunt voor de proeven geldt de tussen de eigenaar en constructeur overeengekomen veranderlijke belasting. Deze dient minimaal te voldoen aan de veranderlijke belasting die beschreven is in NEN 8701. Dit kan

betekenen dat mag worden uitgegaan van een lagere belasting dan waarop de vloeren oorspronkelijk zijn ontworpen.

Bij de bepaling van de grootte van de proefbelasting moet onderscheid worden gemaakt tussen de volgende situaties:

1. Beproeving van alle vloervelden die niet voldoen op basis van de rekenregels;
2. Beproeving van een deel van de vloervelden die niet voldoen op basis van de rekenregels.

Het is bekend dat de sterkte van beton bij een langdurige belasting terug kan lopen. In het algemeen is hiervan sprake als de spanningen groter zijn dan 85% van de sterkte. Daarom wordt geadviseerd bij het beschrijven van de karakteristieke belastingscombinatie, het effect van de totale belasting met een factor 1,05 te vergroten.

Als blijkt dat de grootte van de aan te brengen belasting nagenoeg gelijk is aan of groter is dan de rekenkundig bepaalde bezwijklast op basis van gemiddelde eigenschappen, zie G.2 hiervoor, moet het doorzetten van het plan om proef te belasten, kritisch worden heroverwogen.

G.3.2 Beproeven alle vloervelden

Indien op alle velden die rekenkundig niet voldoen een proefbelasting wordt uitgevoerd, kan de grootte van de proefbelasting als volgt worden bepaald (zie ook Bijlage E.8 van NEN8700). Bij de proefbelasting hoort men aan te tonen dat de vloerconstructie bestand is tegen alle belastingsgevalen en belastingscombinaties.

De grootte van de proefbelasting is in dit geval de beschreven veranderlijke belasting vermenigvuldigd met de bijbehorende belastingsfactor, bij het afkeurniveau volgens NEN 8700 (tabel A1.2). Volgens bijlage E.8 van NEN 8700 geldt in beginsel dat in deze situatie geen belastingsfactor voor het eigen gewicht meegenomen hoeft te worden. De achtergrond hiervan is dat bij het ontwerp aangehouden onzekerheden in het eigen gewicht niet aanwezig zijn, omdat in het werk de werkelijke constructie wordt beproefd. Het daadwerkelijke eigen gewicht is in de proef aanwezig. Tevens geldt dat geen materiaalfactor voor onzekerheden in de sterkte hoeft te worden meegenomen in de proefbelasting, omdat de daadwerkelijke sterkte van het vloerveld wordt beproefd en alleen conclusies worden getrokken voor het betreffende vloerveld.

Voorbeeld

belastingen:

permanente: 7,0 kN/m²
veranderlijk onder werkelijk gebruik: 2,5 kN/m²

belastingsfactoren (CC2, referentieperiode 15 jaar):

permanente belasting: $\gamma_G = 1,0^a$
veranderlijke belasting: $\gamma_Q = 1,15$

^a De belastingsfactor voor de permanente belasting is hier gelijk aan 1,0 omdat alle vloeren die niet voldoen op basis van de rekenregels worden belast.

Inclusief een correctie voor het lange-duur effect komt de aan te brengen proefbelasting dan op:

$$Q = 1,05(1,15 \cdot 2,5 + 1,0 \cdot 7,0) - 1,0 \cdot 7,0 = 3,4 \text{ kN/m}^2$$

G.3.3 Beproeven van enkele vloervelden

Indien niet alle vloervelden worden beproefd en het doel van de proef is om wel een conclusie te kunnen trekken voor alle vloervelden, is de vereiste proefbelasting hoger dan hiervoor bij G.3.2 is beschreven. In dit geval dient namelijk rekening te worden gehouden met spreiding in de permanente belasting en spreiding in de capaciteit van de verschillende vloervelden. In bijlage E.6 van NEN 8700 zijn aanwijzingen gegeven hoe hiermee moet worden omgegaan. Voor de variatie in sterkte wordt, op basis van de in 5.5.2 en 5.5.3 beschreven variaties, geadviseerd uit te gaan van een variatiecoëfficiënt (V) met een waarde van 0,18. Opgemerkt wordt dat deze variatiecoëfficiënt iets hoger is dan in [6] was beschreven.

Bij de keuze van representatieve vloervelden moet rekening worden gehouden met mogelijk niet beschouwde gunstige effecten, zoals het opspannen ten gevolge van membraamwerking bij middenvelden en niet beschouwde randinklemming bij rand- of hoekvelden.

Voorbeeld

Hierna is een voorbeeld gegeven van de bepaling van de proefbelasting voor het geval niet op alle vloervelden een proefbelasting wordt aangebracht. Feitelijk moet worden aangetoond dat de kans op bezwijken van een niet beproefd veld, gegeven het met succes doorstaan van de proefbelastingen, kleiner of gelijk is dan de kans die hoort bij de vereiste betrouwbaarheid volgens NEN 8700. Dit normblad vereist voor afkeuren van een gebouw in CC2 een minimale β van 2,5 voor een referentieperiode van 15 jaar (tabel B.2 van NEN 8700). Onderstaande geeft een vereenvoudigde berekening met partiele factoren waarbij ervan uitgegaan is dat een drietal representatieve velden worden belast ($n = 3$).

Uitgangspunten

Gevolgklasse: CC2

Referentieperiode: 15 jaar

Eigen gewicht van de vloer (gemiddeld): 8,5 kN/m²

Karakteristieke waarde nuttige belasting (referentieperiode 15 jaar): 2,0 kN/m²

De karakteristieke waarde van de nuttige belasting is bepaald bij het huidige gebruik van de vloer in dit voorbeeld. Daarnaast moet een extra factor worden toegepast om een reductie van de sterkte ten gevolge van het lange duur effect in rekening te brengen: 1,05.

Eigen gewicht

In beginsel is het eigen gewicht aanwezig in de proef, maar als een veld wordt beproefd en conclusies getrokken moeten worden over een ander veld moet rekening worden gehouden met onderlinge spreiding. Deze is niet zo groot als de spreiding van gebouw tot gebouw. Daarom wordt voor veld tot veld een variatiecoëfficiënt $V = 0,05$ aangehouden. De partiele factor die gehanteerd moet worden is dan:

$$\gamma = 1 + \alpha\beta V \sqrt{(1+1/n)} = 1 + 0,3 \cdot 2,5 \cdot 0,05 \sqrt{(1+1/3)} = 1,04$$

Waarbij $\beta = 2,5$, $V = 0,05$ en $n = 3$ (aantal beproefde velden). Bij de beschouwing van het eigen gewicht mag worden aangehouden: $\alpha = 0,3$. Deze waarde van α is van toepassing voor niet dominante variabelen, bepaald door het belastingseffect en volgt uit $0,4 \cdot 0,7 \approx 0,3$, zie hiervoor C7 van NEN-EN 1990.

Bij een gemiddeld eigen gewicht van de vloer van $8,5 \text{ kN/m}^2$ wordt de rekenwaarde $1,04 \cdot 8,5 = 8,9 \text{ kN/m}^2$.

Nuttige belasting

Voor de nuttige belasting wordt als karakteristieke (gemiddelde) waarde voor een referentieperiode van 15 jaar de waarde 2 kN/m^2 voorgesteld. De partiele factor volgens NEN8700 is $\gamma = 1,15$. Daarmee volgt als rekenwaarde van de nuttige belasting: $2,0 \cdot 1,15 = 2,3 \text{ kN/m}^2$

Sterkte

Voor de variatiecoëfficiënt wordt uitgegaan van $V = 0,18$. Bij de beschouwing van de sterkte mag worden aangehouden: $\alpha = 0,8$. De waarde van $0,8$ voor α volgt uit C7 van NEN-EN 1990, waar de weerstand van de constructie beschreven wordt. Met $\beta = 2,5$ en $n = 3$ (aantal beproefde velden) volgt voor de te hanteren partiele factor:

$$\gamma = 1 + \alpha\beta V \sqrt{(1+1/n)} = 1 + 0,8 \cdot 2,5 \cdot 0,18 \sqrt{(1+1/3)} = 1,42$$

Grootte proefbelasting

De rekenwaarde voor het totaal van de belastingcombinatie eigen gewicht plus nuttige belasting komt uit op:

$$8,9 + 2,3 = 11,2 \text{ kN/m}^2$$

Rekening houdend met de onzekerheid in de sterkte en het lange-duur effect volgt dan:

$$1,05 \cdot 1,42 \cdot 11,2 = 16,7 \text{ kN/m}^2$$

De aan te brengen proefbelasting komt daarmee op:

$$Q = 16,7 - 8,5 = 8,2 \text{ kN/m}^2$$

G.4 Grenswaarden bepalend voor het afbreken van de proef

Het is ongewenst dat tijdens het uitvoeren van de proef onherstelbare schade aan de constructie optreedt of zelfs dat de constructie bezwijkt. Om de kans hierop te verkleinen moet voorafgaand aan de proef worden bepaald welke grenswaarden worden gehanteerd voor variabelen die tijdens het uitvoeren van de proef kunnen worden gemeten.

Variabelen die tijdens de proef kunnen worden gemeten zijn:

- de doorbuiging van het belaste vloerveld;
- de toename van de breedte van de naad tussen twee breedplaten;
- het ontstaan van scheuren;
- de toename van de breedte van reeds aanwezige en nieuwe scheuren;
- de mate van onthechting (delaminatie) tussen breedplaat en druklaag.

De grenswaarde voor de doorbuiging van de vloer is mede afhankelijk van de overspanning en de slankheid van de vloer. Een grenswaarde zal in de orde van grootte van een aantal millimeters zijn.

Uit de resultaten van het experimentele onderzoek blijkt dat voorafgaand aan het bezwijken van de proefstukken de breedte van de naad tussen twee breedplaten reeds met enkele millimeters is toegenomen. Wel is hierbij sprake van relatief veel spreiding. Voor de toename van de breedte van de naad wordt geadviseerd geen waarde groter dan 2 à 3 mm aan te houden.

Het ontstaan van scheuren zal geen criterium zijn om de proef af te breken. Anderszins is het juist een aanwijzing voor goed gedrag van het aansluitvlak als aan de onderzijde van de vloer, in de breedplaat nabij een naad scheurvorming ontstaat.

Een snelle toename van de scheurwijdte is een aanwijzing dat de spanning in de wapening snel toeneemt. Een grote scheurwijdte is in het algemeen een aanwijzing dat de spanningen in het staal hoog zijn. Tijdens het aanbrengen van de proefbelasting moet de scheurwijdte beperkt blijven tot waarden van 0,5 à 1,0 mm. Opgemerkt wordt dat het nuttig is als de scheurwijdte zowel aan de onderzijde van de vloer, in het midden van de overspanning, en aan de bovenzijde van de vloer, bij de steunpunten, bepaald kan worden.

Onthechting tussen de breedplaat en de druklaag kan worden waargenomen door met een licht hamertje de onderzijde van de vloer te bekloppen. Verschillen in klank geven dan duidelijk een onderscheid tussen delen met goede hechting en delen waar geen hechting aanwezig is. Als tijdens de proef wordt vastgesteld dat de mate van onthechting toeneemt en doorloopt over een grotere afstand vanaf de naad, is dit een aanwijzing dat het bezwijkmechanisme zich aan het ontwikkelen is. Het is dan in het algemeen raadzaam de proef af te breken. Van een uitzondering hierop kan sprake zijn indien in het aansluitvlak doorkruisende wapening aanwezig is die zowel in de breedplaat als de druklaag goed verankerd is.

G.5 Maatregelen om gevolgen van falen te beperken

Om de gevolgen van falen te beperken, is er bij eerdere proefbelastingen op breedplaatvloeren gewerkt met een onderstempeling van het belaste vloerveld en de onderliggende vloervelden. Het uitgangspunt bij het ontwerp van het stempelplan is, dat de volledige proefbelasting door de stempels kan worden overgebracht naar de eronder aanwezige vloer(en) en dat de proefbelasting, in het geval de vloer tijdens de belastingsproef is bezweken, veilig kan worden verwijderd. Het aantal verdiepingen waarover naar beneden toe moet worden doorgestempeld, moet op basis van een constructieve berekening worden bepaald. De ondersteuning van het te belasten vloerveld moet enkele centimeters worden vrij gehouden van de onderzijde van de vloer zodat het te beproeven vloerveld niet wordt ondersteund, maar wel bij eventueel bezwijken voldoende snel wordt opgevangen door de onderstempeling.

G.6 Persoonlijke veiligheid

Tijdens het uitvoeren van een proefbelasting is er te allen tijde een verhoogde kans aanwezig dat het beproefde deel bezwijkt. De capaciteit van de constructie is immers niet bekend. Daarom wordt geadviseerd de belasting in stappen aan te brengen. Tijdens het aanbrengen van de belasting gedurende een belastingsstap mogen er geen personen onder het beproefde vloerveld aanwezig zijn. Dit geldt ook voor bouwlagen die zich lager in de constructie bevinden. Als een belastingsstap enige tijd (ca. 10 min.) aanwezig is en er geen aanwijzingen zijn dat de constructie dit niet zonder problemen lijkt te kunnen dragen, kan een persoon metingen verrichten onder het belaste vloerveld. Met klem wordt geadviseerd altijd een waarnemer naast het belaste veld te hebben die tijdig kan waarschuwen als er bijkomende schade lijkt te ontstaan waardoor de aanwezigheid onder het vloerveld niet meer verantwoord is. Als een kortere pauze tussen belastingsstappen gewenst is, dan is het noodzakelijk dat waarnemingen vanaf afstand worden uitgevoerd. Bijvoorbeeld door op afstand afleesbare verplaatsingsopnemers aan te brengen.

G.7 Wijze van aanbrengen van de proefbelasting

Bij voorkeur wordt er bij een proefbelasting gebruik gemaakt van een systeem waarbij de last snel automatisch gereduceerd kan worden. Dit gebeurt in laboratoria in de regel door het gebruik van een belastingsframe en het aanbrengen van krachten door toepassen van vijzels. Bij een groot deel van de tot nu toe bekende praktijkgevallen voor breedplaatvloeren is er gekozen voor watercontainers en een onderstempeling van de constructie om de consequenties van een mogelijk falen te beperken tot het geteste deel van de constructie (zie foto G-1). Een voordeel van deze wijze van het aanbrengen van de proefbelasting is dat de proef met eenvoudige middelen te realiseren is. Een nadeel is, dat het een systeem is waarbij de last niet snel kan worden verwijderd. Alle betrokken partijen moeten het eens zijn over deze aanpak en de eventuele gevolgen hiervan.



foto G-1 Voorbeeld van uitvoering van proefbelasting met water.

G.8 Metingen tijdens beproeving

Bij voorkeur moet er tijdens een proef continu gemeten worden. Stoppen tijdens een belastingstap kan dan op basis van vooraf vastgestelde grenswaarden op elke moment gebeuren. Zonder continue meting kan tijdens het doorlopen van een belastingsstap alleen op basis van een visuele waarneming worden ingegrepen, hetgeen erg beperkt zal zijn. Er zijn verschillende eenvoudige meetmethoden beschikbaar zoals laseropnemers en draadopnemers om tijdens de proeven op enkele plaatsen de doorbuiging van de breedplaten en de toename van de breedte van de naad tussen de breedplaten te meten.

Na bereiken van een bepaalde laststap moet enige tijd gewacht worden alvorens te gaan meten om zeker te zijn dat de constructie onder die last stabiel is. Als na een stap uit de uitgevoerde metingen

en waarnemingen blijkt dat een vooraf afgesproken grenswaarde is overschreden moet de proef worden afgebroken. Als de proef voortijdig is afgebroken, is sprake van een negatief resultaat. Er kan niet worden verklaard dat de beschouwde constructie voldoet aan NEN 8700.

Als de vloer in het betreffende veld in staat is de vooraf bepaalde belasting te dragen, voldoet het betreffende vloerveld of de verzameling van beschouwde vloeren aan de eisen van NEN 8700 voor bestaande bouw.