

Lasergelaste I-core panelen in de Utiliteitsbouw

Samenstelling van de afstudeercommissie:

Prof. ir. F.S.K. Bijlaard

Dr. ing. A. Romeijn

Ir. H.R. de Boer

Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom

Ir. L.J.M. Houben

Voorzitter examencommissie

Dagelijkse begeleider

Dagelijkse begeleider

Lid examencommissie

Afstudeercoördinator

André van Breugel

Voorwoord

Dit rapport *I-core panelen in de Utiliteitsbouw* heb ik geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de TU-Delft. In het laatste jaar van de studie Civiele Techniek wordt iedere student geacht zelfstandig een afstudeeronderzoek te verrichten. Dit onderzoek is verricht bij de sectie staal- en houtconstructies. Deze sectie is onderdeel van de afstudeerrichting Mechanica & Constructies.

Mijn dank gaat uit naar Prof. ir. F.S.K. Bijlaard, Dr. ing. A. Romeijn, Ir. H.R. de Boer, Dr. ir. P.C.J. Hoogenboom en Ir. L.J.M. Houben, leden van de afstudeercommissie voor hun begeleiding. Mijn bijzondere dank gaat uit naar Dr. ing. A. Romeijn en Ir. H.R. de Boer voor hun dagelijkse begeleiding.

Delft, juni 2007
André van Breugel

Inhoudsopgave

SAMENVATTING.....	V
SYMBOLENLIJST.....	VI
1 INLEIDING.....	1
2 TOEPASSINGEN SANDWICHPANELEN	2
2.1 TYPEN SANDWICHPANELEN.....	2
2.2 TOEPASSINGEN IN DE BOUW	2
2.3 TOEPASSINGEN IN DE CIVIELE TECHNIEK.....	3
2.3.1 Onderzoek naar staalbeton sandwichelementen	3
2.4 TOEPASSINGEN LASERGELASTE SANDWICHPANELEN	4
2.4.1 LASCOR-panel.....	4
2.4.2 I-core panelen	5
2.5 CONCLUSIES.....	6
3 LASERLASSEN.....	7
3.1 LICHT EN LASER	7
3.2 ONTWIKKELING EN TOEPASSINGEN VAN LASERS.....	8
3.3 HET LASERLAS PROCES.....	8
3.4 TYPEN LASERBRONNEN.....	9
3.5 LASVERBINDINGEN	11
3.6 CONCLUSIES.....	11
4 VERRICHT ONDERZOEK NAAR LASERGELASTE SANDWICHPANELEN.....	12
4.1 PROJECT SANDWICH	12
4.1.1 Algemene onderzoekgegevens	12
4.1.2 Onderzoek naar effect vulling op de afschuifstijfheid	13
4.1.3 Resultaten buigtesten	14
4.1.4 Resultaten druktesten	16
4.2 AFSCHUIFVERVORMING VAN EEN I-CORE LIGGER IN DWARSRICHTING.....	18
4.3 LASER WELDED STEEL BRIDGE DECKS	20
4.4 CONCLUSIES.....	20
5 OVERZICHT VLOERSYSTEMEN	21
5.1 TRADITIONELE VLOERSYSTEMEN	21
5.2 INNOVATIEVE VLOERSYSTEMEN.....	22
5.3 CONCLUSIES.....	24

H6 OVERZICHT GEVELSYSTEMEN	25
6.1 PREFABBETON GEVEL	25
6.2 STALEN VAKWERKPANEEL	27
6.3 CONCLUSIES.....	28
H7 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	29
7.1 AANBEVELINGEN VLOERPANELEN	29
7.2 AANBEVELINGEN GEVELPANELEN	29
8 ONTWERP VLOERVARIANTEN.....	30
8.1 VARIANT 1, I-CORE STAALBETONPANEEL	30
8.1.1 Constructief gedrag variant 1a, met zeeg	30
8.1.1 Constructief gedrag variant 1b, zonder zeeg	32
8.1.3 Constructiehoogte en massa.....	33
8.1.4 Overige aspecten.....	34
8.2 VARIANT 2, VARIANT OP KANAALPLAATVLOER	35
8.2.1 Constructief gedrag.....	35
8.2.1 Afmetingen en massa.....	35
8.2.3 Overige aspecten.....	36
8.3 VARIANT 3, VARIANT OP STAAL PANEEL	37
8.3.1 Constructief gedrag.....	37
8.3.2 Constructiehoogte en massa.....	38
8.3.3 Overige aspecten.....	38
8.4 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	40
9 ONTWERP GEVELVARIANTEN.....	41
9.1 NIET-DRAGEND BORSTWERINGSELEMENT.....	41
9.1.1 Krachtsafdracht	41
9.1.2 Verbindingen.....	46
9.1.3 Overige eigenschappen	46
9.2 NIET-DRAGEND WANDELEMENT.....	47
9.2.1 Krachtsafdracht	47
9.2.2 Verbindingen.....	49
9.2.3 Overige eigenschappen	49
9.3 DRAGEND BORSTWERINGSELEMENT	50
9.4 DRAGEND WANDELEMENT	54
9.4.1 Krachtsafdracht	54
9.4.2 Verbindingen.....	55
9.4.2 Overige aspecten.....	55
9.5 VERBINDING BUITENBEKLEDING.....	55
9.6 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	56
REFERENTIES	57
BIJLAGE A1 ONTWERP GEVELVARIANT 1A.....	61
BIJLAGE A2 ONTWERP GEVELVARIANT 1B.....	76
BIJLAGE A3 ONTWERP GEVELVARIANT 2	82
BIJLAGE A4 ONTWERP GEVELVARIANT 3	84

Samenvatting

Door de vraag naar steeds lichtere staalconstructies in de scheepsbouwindustrie zijn er aan het eind van de jaren 90 lasergelaste sandwichpanelen ontwikkeld. Een van deze panelen is door Meyer Werft ontwikkeld, het lasergelaste I-core paneel. Met dit paneel zijn ook al toepassingen buiten de scheepsbouwindustrie gemaakt. In de Bouw is men ook constant op zoek naar nieuwe innovatieve producten. Het doel van dit onderzoek is dan ook om te onderzoeken of dit I-core paneel kansen maakt om ook in de Bouw geïntroduceerd te worden als vloer- en/of als gevelement.

In de Bouw en in de Civiele Techniek zijn nog geen toepassingen gemaakt met deze lasergelaste sandwichpanelen. Wel wordt er in de Bouw als dak- en gevelbekleding gebruik gemaakt van lichte sandwichelementen, met een kern die niet uit staal bestaat. In de Civiele Techniek wordt een staalbeton paneel toegepast. Uit onderzoek is gebleken dat dit paneel niet geschikt is voor horizontale toepassingen.

Het laserlassen zelf is al een oude techniek. Het is in de jaren 60 al toegepast. Door het toenemende vermogen van de laserlassers, is deze techniek nu ook geschikt om de I-core panelen te lassen. Het meest geschikt voor het lassen van de I-core panelen is de CO₂ laser.

Er is al veel onderzoek verricht naar het gedrag van I-core panelen. Op Europees niveau is er een groot onderzoek opgezet, project Sandwich. Diverse universiteiten en onderzoeksinstituten hebben aan dit onderzoek meegedaan. De panelen zijn o.a. op buiging, afschuiving en op druk onderzocht. Met name het effect van vulling is onderzocht. De conclusie hiervan is dat deze alleen invloed heeft op de doorbuiging van het paneel, wanneer niet de buiging, maar de afschuiving maatgevend is.

In de Bouw zijn de laatste jaren veel nieuwe vloersystemen ontwikkeld. Deze zijn voornamelijk ontwikkeld om leidingen makkelijk te kunnen verwerken en om gewicht te besparen. De ontwikkelde vloersystemen zijn allemaal gebaseerd op bestaande vloersystemen en zijn op bepaalde punten verbeterd. t.o.v. de bestaande vloersystemen. De vloerenmarkt is in drie categorieën op te delen: Halfgeprefabriceerde vloeren, volledig geprefabriceerde betonnen vloeren en lichte stalen vloeren. In elke categorie is een I-core variant ontwikkeld. De I-core variant in de categorie halfgeprefabriceerde vloeren heeft de meeste kansen om een marktaandeel te verwerven.

Gevelementen worden onderscheiden in dragende- en niet-dragende gevelementen. Daarnaast zijn er borstwering- en gevelementen. In Amerika worden stalen vakwerkpanelen als binnenblad van gevels toegepast. De belangrijkste reden hiervoor is de gewichtsbesparing. Het belangrijkste ontwerpaspect zijn de verbindingen. Deze moeten voldoende vrijheid van het gevelement garanderen, zodat de gevel en de achterliggende draagconstructie vrij van elkaar kunnen bewegen. Er zijn vier I-core gevelvarianten ontworpen. De niet dragende gevelementen zijn de beste elementen, door hun lage massa, kleine hoogte en eenvoudige verbindingen.

Symbolenlijst

Symbool:	Betekenis	Eenheid
Latijnse symbolen		
a_y	Factor die de gevoeligheid voor plooi aangeeft	
A_b	Oppervlakte van de betondoorsnede	mm^2
A_{fb}	Oppervlakte bovenflens	mm^2
A_{fo}	Oppervlakte onderflens	mm^2
A_l	Oppervlakte lijf	mm^2
A_p	Oppervlakte van paneeldoorsnede per meter	mm^2
A_v	Oppervlakte van de verstijver	mm^2
b	Breedte	mm
b_e	Meewerkende breedte	mm
b_{fb}	Breedte van de bovenflens	mm
b_{fo}	Breedte van de onderflens	mm
d	Diameter	mm
D	Dwarskracht	kN
e_{pb}	Afstand neutrale lijn tot bovenkant profiel	mm
e_{po}	Afstand neutrale lijn tot onderkant profiel	mm
E_s	Elasticiteitsmodulus van staal	N/mm^2
E_b	Elasticiteitsmodulus van beton	N/mm^2
f_b	Rekenwaarde van de druksterkte van beton	N/mm^2
f_e	Eigenfrequentie	Hz
f_{ref}	Rekenwaarde van de vloeisterkte van staal i.v.m. plooi	N/mm^2
f_y	Vloeisterkte staal	N/mm^2
F_d	Rekenwaarde puntbelasting	kN
F_{rep}	Gebruikswaarde puntbelasting	kN
F_{st}	Puntbelasting tijdens storten	kN
F_{rep}	Gebruikswaarde puntbelasting	kN
GA	Afschuifstijfheid	kN
G_p	Massa van het I-core paneel per m^2	kN/m^2
G_t	Massa van het totale vloerpaneel m^2	kN/m^2
h_b	Hoogte betonlaag op de vloer	mm
h_t	Totale vloerhoogte	mm
h_l	Lijfhoogte	mm
h_p	Paneelhoogte	mm
h_z	Hoogte zeeg	mm
I_b	Traagheidsmoment van de betondoorsnede	mm^4
I_{flens}	Traagheidsmoment van de flens	mm^4
I_{lijf}	Traagheidsmoment van het lijf	mm^4
I_p	Traagheidsmoment I-core paneel	mm^4
I_t	Totale traagheidsmoment van het samengestelde paneel	mm^4
k	Factor voor het berekenen van het oppervlakte van de betondrukzone	
l	Lengte	m
l_{buc}	Kniklengte	m
M	Moment	kNm
M_d	Rekenwaarde van het moment door de totale belasting	kNm
$M_{g,d}$	Rekenwaarde van het optredend moment door rustende belasting	kNm
M_{pl}	Het opneembare plastische moment	kNm
M_{rep}	Gebruikswaarde van het optredend moment van de totale belasting	kNm
$M_{stort,d}$	Rekenwaarde van het optredend moment tijdens het storten	kNm

Symbool:	Betekenis	Eenheid
M_t	Torsie moment	kNm
M_w	Optredend moment door de windbelasting	kNm
n	Factor voor verhouding tussen twee waarden	
N	Normaalkracht	kN
p	H.o.h. lijfafstand	mm
p_{rb}	Rustende belasting per m^2	kN/m^2
p_{st}	Stortbelasting per m^2	kN/m^2
q	Belasting per strekkende meter	kN/m
q_d	Rekenwaarde van de totale belasting per meter	kN/m
$q_{g;d}$	Rekenwaarde belasting door eigengewicht per m	kN/m
$q_{g;rep}$	Gebruiksbelasting door eigengewicht per meter	kN/m
q_{rb}	Rustende belasting per meter	kN/m
q_{rep}	Gebruiksbelasting van de totale belasting per meter	kN/m
$q_{stort;d}$	Rekenwaarde belasting tijdens storten per meter	kN/m
$q_{stort;rep}$	Gebruiksbelasting tijdens storten per meter	kN/m
q_{var}	Variabele belasting per meter	kN/m
t	Dikte	mm
t_{fo}	Flensdikte onderzijde	mm
t_{fb}	Flensdikte bovenzijde	mm
t_l	Lijfdikte	mm
u	Doorbuiging	mm
V_l	Afschuifsterkte uitgedrukt in de dwarskracht	kN
V_{sd}	Optredende dwarskracht	kN
x	Afstand	mm

Griekse symbolen

$\lambda_{plate,rel}$	Relatieve slankheid van een plaat	
ρ_z	Dichtheid van staal	kN/m^3
ρ_b	Dichtheid van beton	kN/m^3
$\sigma_{bstort,d}$	Rekenwaarde van de spanning in de bovenflens tijdens storten	N/mm^2
$\sigma_{ostort,d}$	Rekenwaarde van de spanning in de onderflens tijdens storten	N/mm^2
$\sigma_{b,d}$	Rekenwaarde van de spanning in de bovenflens	N/mm^2
$\sigma_{o,d}$	Rekenwaarde van de spanning in de onderflens	N/mm^2
$\sigma_{b,rep}$	Gebruikswaarde van de spanning in de bovenflens	N/mm^2
$\sigma_{o,rep}$	Gebruikswaarde van de spanning in de onderflens	N/mm^2
σ_e	Eulerse knikspanning	N/mm^2
σ_{plooi}	Maximale spanning i.v.m. optreden van plooï	N/mm^2
ν	Poissonfactor	
ω_{buc}	Knikfactor	
γ	Veiligheidscoëfficiënt	

1 Inleiding

In de Bouw is men constant op zoek naar nieuwe ontwikkelingen en nieuwe producten. De bouwelementen moeten duurzamer, lichter, functioneler worden etc. Ook in de scheepsbouw staan de ontwikkelingen niet stil. Door toepassing van een nieuwe lastechniek, het laserlassen zijn er nieuwe stalen sandwichpanelen ontwikkeld. Eén van deze panelen is het I-core paneel. Met dit paneel zijn ook al toepassingen buiten de scheepsbouw mee gemaakt, het lijkt een breed toepasbaar paneel. Dit gecombineerd met de toenemende vraag vanuit de Bouw naar innovatie producten is het nodig om te onderzoeken of dit I-core paneel ook in de Bouw kan worden toegepast.

Dit afstudeeronderzoek richt zich op de toepassing van I-core panelen in de Bouw en dan met name in de Utiliteitsbouw. De bedoeling is om meer van de achtergronden van dit paneel te weten te komen, zonder al teveel op de analytische achtergronden van de mechanische eigenschappen in te gaan. In dit onderzoek wordt onderzocht of er kansen zijn voor het I-core paneel als vloer- en/of als gevelpaneel. Als uitgangspunt voor de vloer- en gevel varianten wordt een kantoorgebouw genomen met de veel voorkomende stramienafstand van 7,2m.

In hoofdstuk twee van dit afstudeeronderzoek wordt onderzoek gedaan naar de toepassingen van al bestaande sandwichpanelen in de Bouw en in de Civiele Techniek. Er wordt ook gekeken welke toepassingen er in de scheepsbouw met de lasergelaste sandwichpanelen zijn gemaakt. In Hoofdstuk 3 wordt de techniek van het laserlassen onderzocht. Er wordt onderzocht welke ontwikkelingen er zijn en welke ontwikkeling het meest geschikt is voor het lassen van I-core panelen. In Hoofdstuk 4 wordt gekeken welke onderzoeken er zijn verricht naar I-core panelen en wat daaruit geconcludeerd kan worden. In Hoofdstuk 5 wordt onderzocht welke vloersystemen er zijn en welke innovatieve vloersystemen er ontwikkeld zijn en waarom deze systemen ontwikkeld zijn. In Hoofdstuk 6 wordt onderzocht welke betonnen gevelementen er zijn en wordt een stalen variant, die in Amerika ontwikkeld is onderzocht. In hoofdstuk 7 worden de conclusies uit de voorgaande hoofdstukken samengevat en aanbevelingen gedaan voor het ontwerp van de I-core vloer en gevelvarianten. In Hoofdstuk 8 en 9 worden deze I-core vloer- en gevelvarianten ontworpen.

2 Toepassingen sandwichpanelen

In de jaren 40 van de 20^e eeuw zijn sandwichpanelen voor het eerst toegepast. Sindsdien is het gebruik van deze elementen wereldwijd sterk toegenomen en worden in diverse industrieën toegepast. Deze groei komt voornamelijk door het lage eigengewicht en de goede constructieve eigenschappen van deze elementen. In dit hoofdstuk wordt eerst onderzocht welke typen sandwichpanelen er zijn. Vervolgens wordt gekeken welke toepassingen er zijn gemaakt met de standaard sandwichpanelen in de Bouw en in de Civiele Techniek. Daarnaast wordt er gekeken welke toepassingen er al zijn gemaakt met lasergelaste sandwichpanelen.

2.1 Typen sandwichpanelen

Sandwichpanelen bestaan uit een dun binnen- en buitenblad en een kern. De binnen- en buitenbladen zijn op een bepaalde manier constructief met elkaar verbonden door een kern. Er zijn verschillende typen sandwichpanelen, mede afhankelijk van de eigenschappen van de kern; zie Fig. 2.1. Binnen deze typen bestaan weer veel variaties.

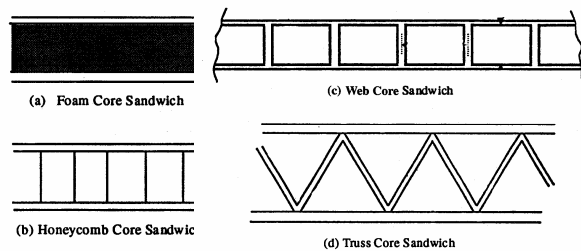


Fig. 2.1. Verschillende typen sandwichpanelen; Ref. [1].

De verschillende typen sandwichpanelen zijn in twee hoofdgroepen op te delen. De 1^e hoofdgroep, type a/b uit Fig. 2.1 zijn composiet sandwichpanelen. Bij deze panelen zijn de stalen buitenbladen constructief met elkaar verbonden door een kern die uit een ander materiaal bestaat dan de buitenbladen zelf. Deze panelen zijn niet geschikt om grote belasting loodrecht op hun vlak (buiging) op te nemen en worden voornamelijk in hun vlak belast.

De 2^e hoofdgroep, type c/d uit Fig. 2.1, zijn geheel stalen sandwichpanelen, waarbij de stalen buitenbladen door een stalen kern constructief met elkaar verbonden zijn. Deze panelen zijn naast het opnemen van belasting in hun vlak, ook geschikt voor het opnemen van grote belasting loodrecht op hun vlak. Deze laatste groep is het meest van belang voor dit onderzoek, omdat de toepassingen waarop dit onderzoek gericht is, ook over elementen loodrecht op hun vlak belast gaat.

2.2 Toepassingen in de Bouw

In de Bouw komen sandwichpanelen uitsluitend voor als gevel- en dakbekleding en niet als dragende, loodrecht op hun vlak belaste elementen. Deze gevel- en dakelementen zijn voornamelijk sandwichpanelen van type a, de “foam core” sandwichpanelen uit Fig. 2.1. Deze panelen bestaan uit een isolerend kernmateriaal van minerale wol, kunststofschuim, of een hybride materiaal, met aan beide zijden een dunne plaat van verzinkt staal, aluminium of roestvast staal; zie Fig. 2.2. De plaat heet de huid van het paneel en kan zowel glad als geprofileerd zijn. Het kernmateriaal en de huiden werken constructief samen, waardoor het element één stijf geheel wordt. Bij belasting op buiging werken beide huiden als trek- en drukzone. Het kernmateriaal draagt dan uitsluitend de dwarskracht over.

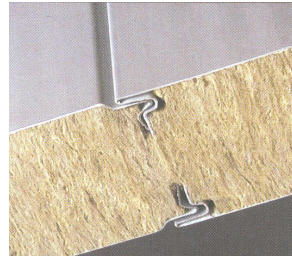


Fig. 2.2. Sandwichpaneel met kernmateriaal van minerale wol; Ref. [2]. Fig. 2.3. Toepassing in utiliteitsbouw; Ref. [2].

Sandwichpanelen zijn voor het eerst in de jaren zestig toegepast in de Bouw. De sterke eigenschappen van deze panelen zijn een hoge isolatiewaarde, een gering eigengewicht, een gladde afwerking en een snelle montage. De panelen worden zowel in de woningbouw als in de utiliteitsbouw toegepast; zie Fig. 2.3.

In vergelijking met andere landen in Europa worden sandwichpanelen in Nederland weinig toegepast; zie Tabel 2.1. Wel is er een lichte stijging in het gebruik te zien.

Europäische Staaten	1997 Sandwichelemente Flächen, ca. in m ²	1997 Anteil in %	1998 Sandwichelemente Flächen, ca. in m ²	1998 Anteil in %
Deutschland, Österreich, Schweiz	11.437.000	26,0	13.335.000	26,2
Italien	8.942.000	20,3	11.089.000	21,8
Frankreich, Spanien	8.635.000	19,6	9.435.000	18,5
Großbritannien, Irland	7.461.000	17,0	8.640.000	17,0
Griechenland, Türkei	4.011.000	9,1	4.747.000	9,5
Belgien, Niederlande	1.765.000	4,0	2.138.000	4,2
Osteuropa	1.364.000	3,1	1.227.000	2,4
Skandinavien	395.000	0,9	292.000	0,6
Summe	44.010.000	100,0	50.903.000	100,0

Diesen Produktionszahlen liegt ein rechnerischer Durchschnittswert zur Dichte von ca. 41 kg/m³ und eine durchschnittliche Dicke Sandwichelemente von 60 mm zugrunde.

Tabel 2.1 Toepassing sandwichpanelen in Europa; Ref. [3].

2.4 Toepassingen lasergelaste sandwichpanelen

Volledig stalen sandwichpanelen (type c/d uit Fig. 2.1), geschikt om belasting loodrecht op hun vlak op te nemen, zijn tot eind van de jaren 80 praktisch niet toegepast. Dit komt doordat deze panelen met de conventionele lastechnieken zoals wrijving- en puntlassen veel te arbeidsintensief zijn om te produceren. Daarnaast veroorzaakten deze lassen teveel vervorming van de panelen door krimp t.g.v. van het lasproces. Ook de plaatdikten die op deze wijze gelast kunnen worden zijn beperkt. Door de opkomst van het laserlassen zijn er nieuwe kansen voor deze panelen gekomen. In de Bouw en in de Civiele Techniek zijn deze elementen nog niet toegepast. In de scheepsbouw zijn deze elementen al wel op grote schaal toegepast.

In de scheepsbouwindustrie is veel vraag naar lichtgewichtconstructies. Nadat in de jaren 80 van de vorige eeuw het laserlassen voor het eerst is toegepast in de auto-industrie is er zowel in Amerika en later in Europa (Duitsland, Engeland en Finland) veel onderzoek gedaan naar toepassingen van lasergelaste sandwichpanelen in de scheepsbouwindustrie. In potentie zijn veel vormen mogelijk; zie Fig. 2.7.

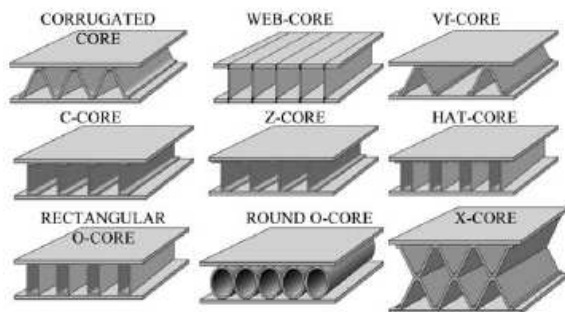


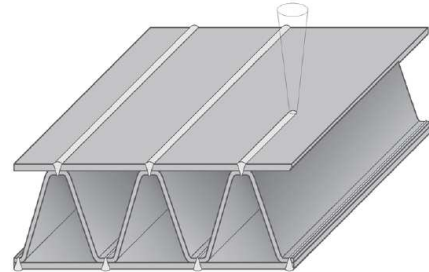
Fig. 2.7. Mogelijke vormen stalen sandwichpanelen; Ref. [7].

De standaard kernen zoals “Z”, “Round” en “Hat-core”, zijn gemakkelijk te verkrijgen, maar leiden tot zwaardere elementen dan de “corrugated”- en de “webcore” kernen. In deze paragraaf kijken we naar de toepassing van twee panelen die al op relatief grote schaal zijn toegepast.

2.4.1 LASCOR-panel

LASCOR panelen zijn ontwikkeld voor en toegepast in marineschepen van de VS. Na veel onderzoek verricht te hebben heeft men in het onderzoekslaboratorium van de Pennsylvania State University de LASCOR panelen

ontwikkeld; zie Fig. 2.8. Deze panelen bestaan uit twee stalen platen, gescheiden door een stalen geprofileerde kern. De platen zijn door middel van laserlassen met de kern verbonden.



Figuur 2.8. LASCOR paneel; Ref [9].

De panelen zijn in de scheepsbouw veel toegepast als dekpanelen, waterdichte schotten en platforms in trappen. Daarnaast zijn deze panelen ook toegepast in de bouw van het antenne platform van de USS Mt. Whitney; zie fig. 2.9.



Fig. 2.9. Antenne platform Mt. Whitney; Ref. [10].

De voornaamste reden om LASCOR panelen toe te passen is de gewichts- en ruimtebesparing (ca. 30%) die deze panelen leveren t.o.v. de conventionele verstijfde platen; zie Fig. 2.10.

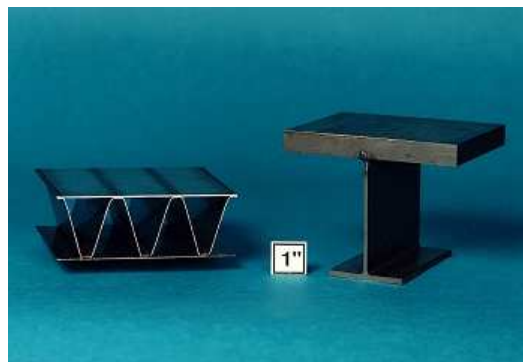


Fig. 2.10. Vergelijking hoogte LASCOR-panel met conventioneel verstijfde plaat.

2.4.2 I-core panelen

In Europa is door Meyer Werft, Duitsland, in samenwerking met de Helsinki Universiteit of Technology in de periode 1994 tot 1999 veel onderzoek verricht naar lasergelaste sandwichpanelen. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van het I-core sandwichpaneel; zie Fig. 2.11 en Fig. 2.12. In Hoofdstuk 4 wordt verder op dit onderzoek ingegaan.



Fig. 2.11. I-core paneel; Ref. [11].

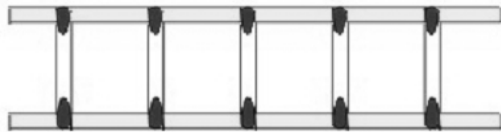


Fig. 2.12. Schematische weergave I-core paneel; Ref. [11].

De belangrijkste voordelen t.o.v. conventionele verstijfde platen zijn:

- tot 50% gewichts- en ruimtebesparing
- Verbeterde geluids- en trillingsabsorptie
- Verbeterde brandveiligheid
- Lagere productiekosten
- Verbeterde corrosieweerstand

De panelen kunnen al dan niet gevuld worden met kernmateriaal. De panelen zijn ontwikkeld voor de scheepsbouw en voor het eerst toegepast in 1996, maar er zijn ook andere toepassingen mee gemaakt, zoals in een brug, als dekpaneel; zie Fig. 2.13, als balkon bij appartementen, zie Fig. 2.14 en als dekpanelen voor een automatisch parkeersysteem in een parkeergarage.

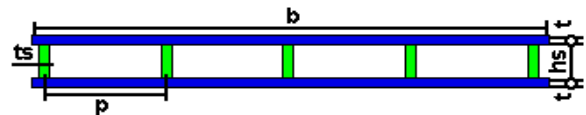


Fig. 2.13. Toepassing I-core paneel in brugdek; Ref. [11]



Fig. 2.14. Toepassing I-core paneel in balkon; Ref. [11]

De panelen zijn op het moment verkrijgbaar met de afmetingen zoals in Tabel 2.2. De toegepaste staalkwaliteit is S460 M (thermomechanisch gerold). De plaatdiktes zijn beperkt tot 10 mm door de maximaal mogelijke penetratiediepte van de laserlasapparaat van Meyer Werft. Deze diktes kunnen toenemen bij verdere ontwikkeling van de laserlasapparaat. In H3 wordt verder op de techniek van het laserlassen ingegaan.



	from	To	Standard
width (b)	500 mm	3000 mm	1500 mm
length	1000 mm	14000 mm	10000 mm
t	1 mm	10 mm	2,5 mm
p	60 mm		120 mm
hs	40 mm	400 mm	40 mm
ts	3 mm	12 mm	4 mm
specific weight			53 kg/m ²

Tabel 2.2. Specificaties I-core paneel; Ref. [11].

2.5 Conclusies

Sandwichpanelen worden wereldwijd in diverse industrieën op grote schaal toegepast. Dit komt door het lage eigengewicht en de goede constructieve eigenschappen van deze panelen. Er zijn verschillende typen sandwichpanelen. Het belangrijkste onderscheid tussen de verschillende typen is, of ze gemaakt zijn om vooral belasting in hun vlak op te nemen, of dat ze ook geschikt zijn om grote belasting loodrecht op hun vlak op te nemen.

In de bouw worden alleen lichte sandwichpanelen als gevel- en dakelement toegepast. Op Europese schaal bekeken worden in Nederland weinig sandwichpanelen in de bouw toegepast. Dit zal de introductie van lasergelaste sandwichpanelen in Nederland moeilijker maken, vanwege de onbekendheid van dit product.

In de Civiele Techniek worden de standaard sandwichelementen die in de Bouw worden toegepast niet gebruikt. Er worden wel staalbeton sandwichpanelen toegepast. Dit paneel is niet geschikt voor horizontale toepassingen. Het lijkt dus niet verstandig om de lasergelaste sandwichpanelen met beton te vullen bij horizontale toepassingen.

Lasergelaste sandwichpanelen worden nog niet toegepast in de Bouw en in de Civiele Techniek. In de scheepsbouw is al wel ervaring opgedaan met lasergelaste sandwichelementen. Het grootste voordeel is de gewichtsbesparing (tot 50%) die met deze elementen bereikt kan worden. Het verschil met toepassing in de bouw, is dat in de scheepsbouw deze elementen met staal moeten concurreren en in de bouw voornamelijk met beton. De verkrijgbare afmetingen van de I-core elementen zijn voldoende om vloeren en gevels mee te creëren.

3 Laserlassen

Laserlassen is een van de nieuwste lastechnieken. Deze innovatieve lasmethode biedt mogelijkheden die andere lastechnieken niet bieden. Het is een complex proces, maar met de kennis die er op dit moment is, kan dit proces op de juiste manier uitgevoerd worden.

Laserlassen verschilt qua lasproces en benodigde uitrusting nogal van de traditionele lasprocessen. De bedoeling van dit hoofdstuk is om, zonder op de details in te gaan, een overzicht te geven van de techniek van het laserlassen, met de mogelijkheden en de ontwikkelingen van deze techniek.

3.1 Licht en laser

Licht

Zoals bekend is uit de natuurkunde kan licht zowel als bestaande uit golven, dan wel bestaande uit deeltjes worden beschouwd. Voor de benadering van lasers, bestaat licht uit deeltjes (fotonen) met een bepaalde golflengte/frequentie. Elke foton bevat een hoeveelheid energie, afhankelijk van de frequentie van de foton. Hoe hoger de frequentie van de foton, hoe meer energie de foton bevat.

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)

Atomen bestaan uit een kern met daaromheen elektronen die in een bepaalde orbitaal (baan) om de kern heen cirkelen. Hoe hoger de orbitaal (hoe groter de baan), hoe meer energie er nodig is om een elektron in deze baan te houden. Als een elektron met een foton in aanraking komt, dan wordt de energie van de foton gebruikt om een elektron in een hogere orbitaal rond de atoom te brengen. De elektron is dan aangeslagen. De hoogte van de nieuwe orbitaal is afhankelijk van de overgebrachte energie van de foton. Deze aangeslagen toestand duurt maar een fractie van een seconde, de elektron valt dan weer terug naar zijn oorspronkelijke orbitaal, waarbij er energie vrijkomt (spontane emissie). De vrijgekomen energie wordt weer uitgezonden in de vorm van een nieuwe foton.

Wanneer een foton een al aangeslagen elektron tegenkomt, dan springt deze niet nog een keer over naar een hogere orbitaal, maar valt deze terug naar zijn oorspronkelijke orbitaal zonder de foton te absorberen. Er ontstaan dan twee fotonen met dezelfde golflengte en richting (Stimulated Emission). De elektronen kunnen in aangeslagen toestand worden gebracht door een toevoer van energie, waardoor de elektronen in hogere orbitalen worden gebracht.

Een laser, zie Fig. 3.1 bestaat uit een neonbuis, gevuld met een bepaald gas, vloeistof of vaste stof. Dit is het medium. In dit medium vindt het hierboven beschreven proces plaats. De energie die het medium in wordt gepompt (pumping source) en die de elektronen in aangeslagen toestand brengt, bestaat uit elektrische-, chemische- of lichtenergie. Dit is afhankelijk van het toegepaste medium. De vrijgekomen fotonen gaan in eerste instantie alle kanten uit. Veel fotonen verdwijnen door de zijkant van de neonbuis. De fotonen die “toevallig” parallel aan de buis lopen worden opgevangen door twee spiegels, waardoor ze heen en weer worden gekaatst en als deze fotonen in aanraking komen met aangeslagen elektronen, dan komt de al eerder beschreven kettingreactie opgang (Stimulated Emission) en ontstaan er steeds meer fotonen met dezelfde richting en golflengte (Light Amplification). De voorste spiegel laat ongeveer 1% van de fotonen door en deze worden vervolgens gebundeld waardoor er een laserstraal ontstaat. Na verloop van tijd zal het proces zich stabiliseren en ontstaat er een constante laserstraal.

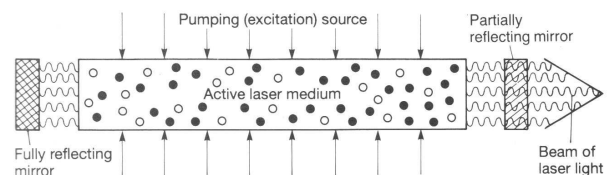


Fig. 3.1. Basiselementen van een laser; Ref. [12].

Een laser is dus een lichtbron die in staat is een smalle geconcentreerde bundel licht voort te brengen welke, in tegenstelling tot normaal licht niet uitwaait naar alle richtingen, doordat het monochromatisch is (alle fotonen hebben dezelfde golflengte) en coherent (alle fotonen lopen in fase). Hierdoor ontstaat er een veel hogere vermogensdichtheid dan bij gewoon licht; zie Tabel 3.1.

Sun at perpendicular entry	10^3
Autogenic welding	10^7
Electrical welding arc	10^8
Spark erosion	10^{10}
Electron bundle (focused)	10^{12}
Laser bundle (cw, focused)	10^{12}
Laser bundle (pulsed, focused)	up to 10^{20}

Tabel 3.1. Vermogens van verschillende energiebronnen in W/m^2 ; Ref. [13].

De laserstraal kan continu (cw modules) of gepulst zijn. De pulsen hebben een frequentie die kan variëren van een paar Hz tot meerdere MHz.

3.2 Ontwikkeling en toepassingen van lasers

De eerste lasers werden gemaakt in 1960. Het laserlassen zelf, is voor het eerst toegepast begin jaren 60. In 1961 is de eerste CO₂ laser ontworpen en in 1964 de eerste Nd:YAG laser. Het laserlassen werd toen toegepast in elektronische circuits. In plaats van de verbindingen te solderen werden verbindingen nu door laserlassen tot stand gebracht. In de jaren 60 is veel onderzoek verricht naar toepassingen van het laserlassen in andere industrieën. Het probleem was het lage laservermogen (<1 kW) dat in die tijd bereikt kon worden. Hier kwam in de jaren 70 verandering in, door de ontwikkeling van CO₂ lasers met hoge vermogens. Sindsdien is het laserlassen toegepast in vele industrieën waar nauwkeurige lassen vereist zijn. Enkele voorbeelden zijn:

- Consumenten goederen; zie Fig. 3.2.
- Gezondheidsindustrie; zie Fig. 3.3.
- Auto-industrie; zie Fig. 3.4.
- Sandwichpanelen; zie H. 2.4.
- Blik industrie
- Cilinders, buizen
- Nucleaire industrie
- Verpakkingen

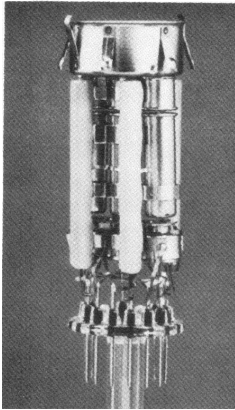


Fig. 3.2. Elektornen kanon van televisie; Ref. [12].

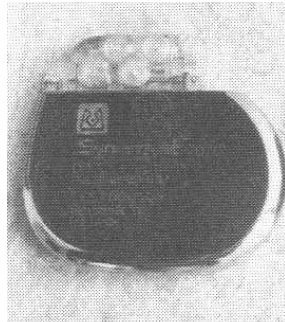


Fig. 3.3. Pacemaker; Ref. [12].

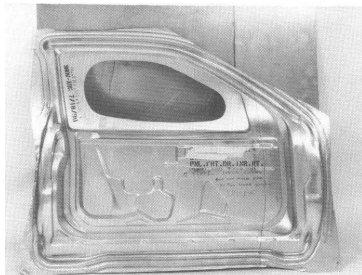


Fig. 3.4. Autodeur; Ref. [12].

3.3 Het Laserlas proces

Bij het laserlassen wordt door absorptie door het staal van de laserstraal (met diameter van 0,1 tot 0,8 mm) een overlappend volume tussen twee te verbinden materiaal delen zo verhit dat het vloeibaar wordt. Na verharding ontstaat dan een solide verbinding. De moeilijkheid is om het smeltbad de juiste afmeting te geven. Het kan te groot zijn of te klein, of er is teveel verdamping. Er zijn twee lasmethoden: Het geleidingslassen en het dieptelassen; zie Fig. 3.5.

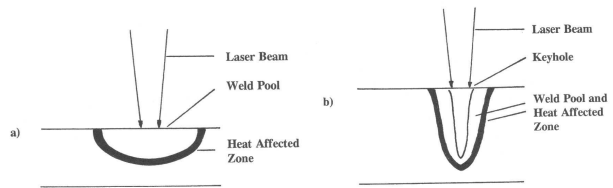


Fig. 3.5. Geleidingslassen (a) en dieptelassen (b); Ref. [13].

Geleidingslassen (conduction welding) vindt plaats bij een lage vermogensdichtheid ($<10^8 \text{ W/m}^2$), waardoor een relatief ondiep smeltbad ontstaat. Het smeltfront breidt zich door warmtegeleiding uit. De dampdruk die boven het smeltbad ontstaat, is zo laag dat het oppervlakte van het smeltbad niet wordt vervormd, waardoor een gladde las ontstaat.

Dieptelassen (keyhole welding) vindt plaats bij hogere vermogensdichtheid ($>10^8 \text{ W/m}^2$), waardoor het materiaal plaatselijk verdampt. Door de dampdruk ontstaat er een gat (keyhole) in het smeltbad. Dit gat dringt diep in het materiaal door. De dampdruk is zo groot dat de "keyhole" openblijft, waardoor de laserstraal weer dieper in het materiaal kan doordringen. De diameter van de "keyhole" is 1,5 tot 2 maal de diameter van de laserbundel. De laserstraling dringt, afhankelijk van de lassnelheid, diep in het materiaal door, tot meer dan 25 mm bij staal; zie Fig. 3.6.

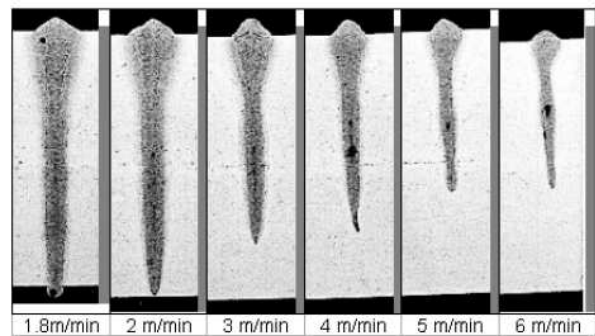


Fig. 3.6. Invloed van de lassnelheid op de lasdiepte in een plaat van 20 mm met een CO₂ laser van 20 kW; Ref. [14].

Voor- / nadelen laserlassen

Het grootste voordeel van laserlassen t.o.v. conventionele lasmethoden is de kleine warmte-beïnvloede-zone en daardoor kleine thermische vervorming en lage restspanningen. Een voordeel dat daaruit voortkomt, is de grote diepte-breedte verhouding van de las t.o.v. conventionele lasmethoden. Deze verhouding is minimaal 2 keer zo groot, maar neemt toe bij diepere lassen; zie Fig. 3.6. Door deze grote diepte-breedte verhouding kan bij overlappende constructiedelen vanaf de buitenkant worden gelast. Door deze flexibiliteit kunnen constructies worden gecreëerd die voor die tijd niet mogelijk waren, zoals de lasergelaste sandwichpanelen uit Fig. 2.7. De lassnelheid is ca. 10x zo groot t.o.v. de conventionele lasmethoden (MIG en TIG lassen), dit veroorzaakt een hoge productiesnelheid.

De belangrijkste nadelen van het laserlassen zijn de hoge investeringskosten die vereist zijn, zie Fig. 3.7 en de kleine toleranties van de constructiedelen. Een overzicht van de voor- en nadelen van laserlassen t.o.v. andere lastechnieken is opgesomd in Tabel 3.2.

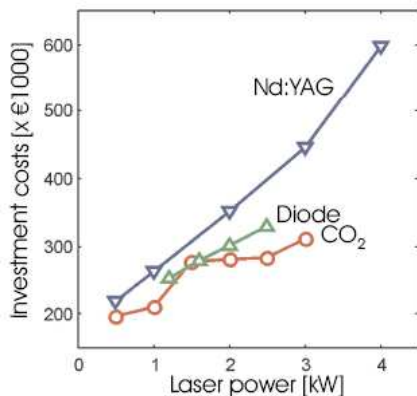


Fig. 3.7. Investeringskosten van een laserlasuitrusting afhankelijke van het laservermogen; Ref. [14].

TABLE 1.1. Comparison of Laser Welding to Other Welding Processes

Parameter	LB	EB	Process		RW
			GTA	GMA	
Joining efficiency	0	0	—	—	+
High aspect ratio	+	+	—	—	—
Small heat-affected zone	+	+	—	—	0
High processing speed	+	+	—	+	—
Bead profile	+	+	0	0	0
Weld at atmospheric pressure	+	—	+	+	+
Weld reflective metals	—	+	+	+	—
Combine with filler	0	—	+	+	—
Automate process	+	—	+	0	+
Capital cost	—	—	+	+	+
Operating cost	0	0	+	+	+
Reliability	+	—	+	+	+
Fixturing	+	—	—	—	—

+, advantageous; —, disadvantageous; 0, neutral; LB, laser beam; EB, electron beam; GTA, gas tungsten arc; GMA, gas metal arc; RW, resistance welding

Tabel 3.2. Vergelijking laserlassen met andere lastechnieken; Ref. [14].

3.4 Typen laserbronnen

Het type laserbron is afhankelijk van het gebruikte medium; zie H 3.1. Op dit moment worden twee laserbronnen het meest toegepast: de Nd:YAG laser, met een medium bestaande uit vaste stof en de CO₂ laser met een gas als medium. Daarnaast zijn er nog twee nieuwe ontwikkelingen, welke ook besproken worden in deze paragraaf.

Nd:YAG lasers

Deze lasers hebben een vermogen van 0,3 – 3 kW, maar het vermogen neemt nog steeds toe, lasers van 5 kW zijn ook al op de markt. Het medium bestaat uit een vaste stof, het Nd:YAG kristal. Dit materiaal is niet elektrisch geleidend. Daarom worden er lampen als energiebron gebruikt. De golflengte van de laser is 1.06 μm . Voordeel van dit systeem is, dat het door een glasfiber kan worden getransporteerd; zie Fig. 3.8. Hierdoor kan op afstand worden gelast, zonder noemenswaardig energieverlies. Daarnaast wordt de laserstraal van de Nd:YAG laser beter geabsorbeerd door metalen dan die van de CO₂ laser. Nadelen zijn de duurdere aanschafprijs, het dure onderhoud en het lage energetisch rendement (3%). Door het gebruik van duurdere diodes kan het rendement tot 10% verhoogd worden.



Fig. 3.8. Nd:YAG laser met glasfiber

CO₂ lasers

De CO₂ laser, zie Fig. 3.11, is een betrouwbaar en robuust systeem. Het medium bestaat uit carbon gas (CO₂) waarbij nog andere gassen worden toegevoegd. De energiebron bestaat uit elektrische energie. De golflengte van dit systeem is 10.6 μm . Het systeem heeft een energetisch rendement van 10%. Het gangbare vermogen van dit systeem ligt tussen de 5 en 10 kW, maar hogere vermogens (>20 kW) zijn ook beschikbaar. Hierdoor wordt dit systeem veel toegepast bij het lassen van dikke materialen.

Diode lasers

Diode lasers; Fig. 3.9, zijn bekend door hun toepassingen in bijvoorbeeld cd-spelers. De werking van deze laser is gebaseerd op een ander principe dan van die de CO₂ en de Nd:YAG laser. Deze lasers maken gebruik van halfgeleiders. Halfgeleiders zijn slechte stroom- en warmtegeleidende stoffen. De lading van halfgeleiders kan veranderd worden door het toevoegen (negatief doteren) of verminderen van het aantal elektronen (positief doteren). Dit doteren kan plaatsvinden door toevoeging van elektrische stroom. Maak je deze positief en negatief gedoteerde halfgeleiders aan elkaar vast, dan springen er elektronen over van de negatief geladen naar de positief geladen halfgeleider en hierbij komt energie in de vorm van een foton vrij. Deze fotonen zorgen weer voor de laserstraal. De golflengte is afhankelijk van het materiaal van de halfgeleiders. Veel gebruikte golflengtes zijn 808 en 940 nm. Voordelen van diode lasers zijn het hoge energetische rendement (30%), het lage gewicht en het licht kan door fibers gestuurd worden. Nadeel is de grote divergentie van de laser, waardoor de laser minder geschikt is voor dieptelassen.



Fig. 3.9. Compacte diodelaser; Ref. [13].

Hybride lasers

Hybride lassen; Fig. 3.10, is een combinatie van booglassen en laserlassen en is aan het eind van de jaren 70 voor het eerst gecombineerd. De afgelopen 25 jaar is er veel onderzoek verricht naar dit systeem, ook aan de TU Delft; zie Ref. [15]. Hybride lasers combineren de voordelen van het booglassen en het laserlassen met elkaar. Bij het hybride laserlassen zijn spleten toegestaan even groot als de plaatdikte, dit in tegenstelling tot de toegestane $\pm 0,1\text{mm}$ bij laserlassen. Dit komt doordat er direct materiaal toegevoegd wordt. Bij het hybride lassen zorgt de laser voor de penetratiediepte. De boog smelt alleen het oppervlakte van het materiaal. De lassnelheid is ca. 7 maal hoger dan bij het conventionele booglassen en de las is zeer

sterk. Er is ook minder laservermogen nodig, omdat het oppervlakte al door de boog wordt gesmolten.



Fig. 3.10. Hybride lasmachine

Vergelijking laserbronnen

Voor het lassen van zware metalen is de CO₂ laser op dit moment de beste keus. Deze zijn beschikbaar met hoge vermogens en heeft een hoger energetisch rendement dan de Nd:YAG laser. Het voordeel van de Nd:YAG laser is dat het door een glasfiber heen getransporteerd kan worden, maar dat is van minder belang bij het lassen van rechte panelen. In de auto-industrie biedt dit wel grote voordelen. De twee innovatieve lasmethoden hebben zeker toekomst, vooral het hybride lassen. De diode laser is op het moment nog niet geschikt voor dieptelassen en heeft op het moment nog geen groot vermogen.

Meyer Werf heeft twee CO₂ lasers met een vermogen van 12 kW in gebruik; zie Fig. 3.11.



Fig. 3.11. CO₂ laser, 12 kW, Meyer Werf; Ref. [16].

3.5 Lasverbindingen

Er zijn veel lasverbindingen mogelijk met laserlassen. De basisverbindingen die met laserlassen gemaakt kunnen worden staan in Fig. 3.11. Stompe lassen zijn eenvoudig te maken, hoeklassen vereisen extra voorbereiding van de lasnaad en worden alleen voor goed lasbare materialen aangeraden.

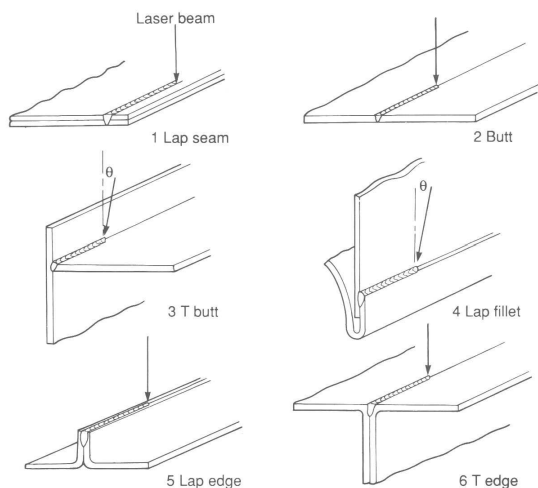


Fig. 3.11. Basistypen lasverbindingen die mogelijk zijn met laserlassen; Ref. [12].

Voor alle verbindingen geldt dat er kleine toleranties gelden voor de spleet. De globale toleranties staan in Tabel 3.2.

Constructie van de las	Max. spleet [mm] (delta s)	Max. hoogte verschil [mm] (delta h)	Maximum positiefout laserspot	
			haaks op naad [mm]	loodrecht op naad [mm]
Stompe las	0.1	0.2	±0.05	±0.25
Overlappende las	0.1	n.v.t.	niet kritisch	±0.25
Hoeklas zonder toevoegmat.	0.25	n.v.t.	±0.05	±0.25
Flenslas	0.125	±0.5	±0.15	±0.25
Randlas	0.125	±0.25	±0.1	±0.25
Hoeklas $40 < \alpha < 60^\circ$	0.25	n.v.t.	±0.125	n.v.t.
Hoeklas $60 < \alpha < 80^\circ$	0.25	n.v.t.	±0.15	n.v.t.
Buithoeklas	0.2	0.5	±0.05	±0.25

Tabel 3.2. Globale toleranties voor diverse lasverbindingen; Ref. [14].

De toegepaste lasverbinding bij de I-core panelen is de stompe T-las. Deze las wordt vanaf de buitenkant aangebracht, hetgeen bij de conventionele lastechnieken niet mogelijk is; zie Fig. 3.12.

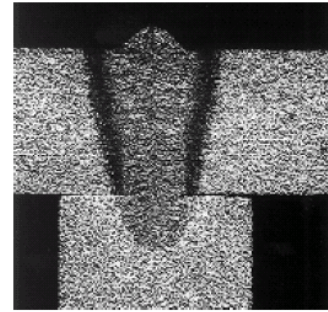


Fig. 3.12. T-las verbinding bij I-core paneel; Ref. [16].

3.6 Conclusies

Laserlassen is een innovatieve lastechniek die vele voordelen biedt. Sinds de ontwikkeling van lasers met hoge vermogens wordt in diverse industrieën van deze lastechniek gebruikt gemaakt. Er is dus al veel ervaring met deze lastechniek opgedaan.

De belangrijkste voordelen van deze lastechniek zijn de hoge vermogensdichtheid, waardoor een diepe slanke las gemaakt kan worden en de hoge lassnelheid die bereikt kan worden. Nadelen zijn de hoge investeringskosten en de kleine toegestane toleranties.

Door de ontwikkeling van het laserlassen is het mogelijk geworden om de lasergelaste sandwichpanelen uit H. 2.3 te ontwikkelen. Door de techniek van het laserlassen worden de panelen vanaf de buitenkant met T-lassen gelast. Dit is met de conventionele lastechnieken praktisch niet mogelijk.

Op dit moment is de CO₂ laser het meest geschikt voor het lassen van deze sandwichpanelen. Dit vanwege zijn hoge vermogen, relatief hoog rendement en de ervaringen die er al mee opgedaan zijn.

4 Verricht onderzoek naar lasergelaste sandwichpanelen

Aan verschillende universiteiten en andere onderzoeksinstituten is onderzoek verricht naar lasergelaste sandwichpanelen. In dit hoofdstuk wordt gekeken welk onderzoek naar I-core panelen gepubliceerd is en welke conclusies er uit die gegevens voor ons onderzoek kunnen worden getrokken.

4.1 Project Sandwich

Project Sandwich is een door de EU gesubsidieerd onderzoek naar het gedrag van stalen lasergelaste sandwichpanelen. Het onderzoek is gestart op 1 april 2000 en op 30 juni 2003 afgerond. De begroting van dit onderzoek is 3,9 miljoen euro. Het doel van het onderzoek is om de eigenschappen en mogelijkheden van stalen sandwichpanelen te verbeteren en een reeks panelen voor verschillende toepassingen te ontwikkelen. Deze panelen moeten de volgende eigenschappen hebben t.o.v. de conventionele panelen:

- 50% gewichtsbesparing
- 50% ruimtebesparing
- 30% snellere bouwtijd
- Verbeterde geluid- en trillingseigenschappen
- Verbeterd brandgedrag
- Verbeterde stoot bestendigheid

Aan het project hebben 12 partners uit 8 verschillende landen meegewerkt, met ieder hun eigen onderzoekstaak. De resultaten van het onderzoek moeten leiden tot een ontwerprichtlijn. Op 28 oktober 2003 is er in Hotel Alte Werft, Meyer Werft te Papenburg, zie Fig. 4.1, een conferentie gehouden waarin de resultaten van dit onderzoek gepresenteerd werden. De gegevens in deze paragraaf zijn gebaseerd op deze resultaten.



Fig. 4.1. Conferentie te Papenburg

4.1.1 Algemene onderzoekgegevens

Voor het onderzoek zijn ruim 300 testelementen geproduceerd. Er zijn drie typen panelen getest: I-core panelen, V-core (geprofileerde) panelen en I-core panelen met een curve. In Tabel 4.1 staat door wie de panelen getest zijn en waarop deze panelen zijn getest.

Tester	Description		Specimens			
			required	sent	complete	rest
TUG	Global Bending - Lateral	I-core	30	30		0
		corr.	16	16		0
		curved	6	6		0
TUG	Global Buckling - Plane	I-core	16	16		0
		corr.	16	16		0
HUT	Local Fatigue - on stiffener	I-core	24	24		0
		I-core	24	24		0
HUT	Local Impact	I-core	32	32		0
		corr.	32	32		0
TNO	General Fire	I-core	27	27		0
		I-core	16	16		0
		corr.	4	4		0
TNO	Corrosion - Laboratory	I-core	30	30		0
		I-core	30	30		0
DNV	Corrosion - Sea Water	I-core	32	5	27	0

Tabel 4.1. Overzicht geteste panelen; Ref. [17].

De panelen zijn aan de volgende onderzoeksinstituten getest:

- TUG: Technical University of Gdansk; Faculty of Ocean Engineering & Ship Technology (FOST)
- HUT: Helsinki University of Technology; Ship Laboratory
- TNO: TNO Building and Construction Research
- DNV: Det Norske Veritas

De geteste I-core elementen zijn opgebouwd uit combinaties van 3 plaatdikten en 3 soorten vullingen; zie Fig. 4.2. De “Low density” panelen hebben “polyethane foam” vulling en de “High density” panelen hebben een vulling van “Balsa Wood”. Het lijf heeft bij alle panelen een dikte van 4 mm.

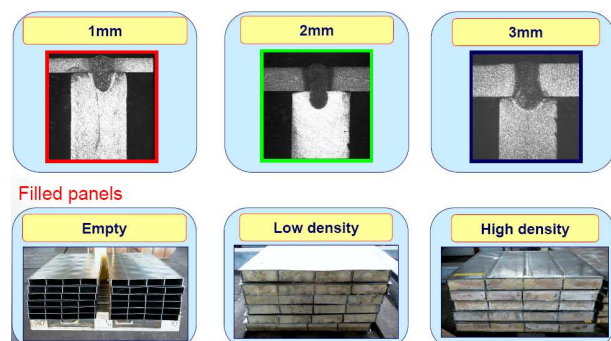


Fig. 4.2. Geteste plaatdiktes en vullingen; Ref. [17].

4.1.2 Onderzoek naar effect vulling op de afschuifstijfheid

Aan het Department of Aeronautical and Vehicle Engineering Royal Institute of Technology (TKH) in Stockholm, is onderzoek gedaan naar het effect van vulling met verschillende elasticiteitswaarden op de afschuifstijfheid van I-core panelen. Er is eerst een kinematisch model opgesteld en vervolgens zijn de resultaten gevalideerd met een 2d- en een 3d eindige elementen model en met praktijk testen.

Kinematisch model

Om het effect van het kernmateriaal te kunnen vergelijken in een rekenmodel, is het sandwichpaneel gemodelleerd als een dikke orthotrope plaat; zie Fig. 4.3. Het model geldt zowel voor buiging als voor afschuiving. De afschuifkracht wordt opgenomen door buiging van het lijf, buiging van de flensplaten en door het kernmateriaal (de vulling).

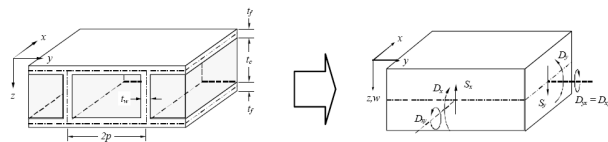


Fig. 4.3. Modelling van I-core paneel; Ref. [18].

Aan de hand van dit model is onderzoek gedaan naar de invloed van de plaatdikte (t_f) en de invloed van de elasticiteitsmodules van het kernmateriaal op de afschuifstijfheid van het paneel; zie Fig. 4.4. Vooral bij een kleine plaatdikte, heeft een vulling met een hoge elasticiteitsmodules veel invloed op de afschuifstijfheid.

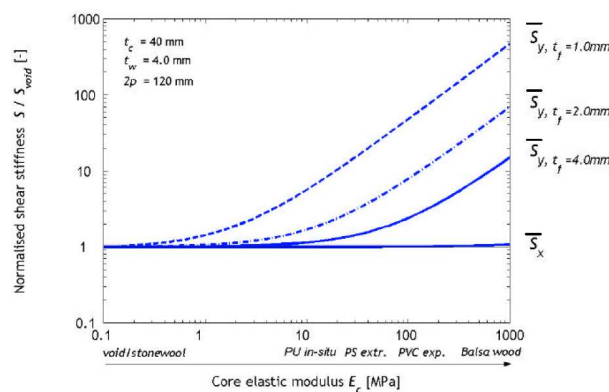


Fig. 4.4. Bijdrage kern aan afschuifstijfheid; Ref. [18].

Eindige elementen model

De resultaten van het kinematisch model zijn vergeleken met de resultaten van een FE-analyse. De gebruikte elementen zijn te zien in Fig. 4.5.

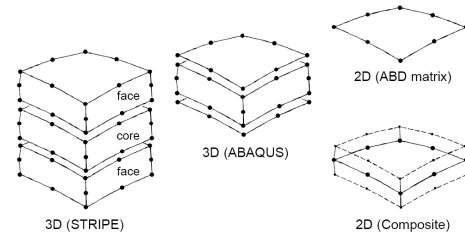
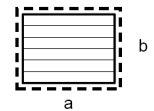


Fig. 4.5. Gebruikte eindige elementen modellen; Ref. [18].

Om de modellen met elkaar te kunnen vergelijken is de doorbuiging in het midden bepaald van een vrij opgelegd paneel met drie overspanningen met verschillende lengte-breedte verhoudingen; zie Tabel 4.2. De modellen vertonen geen grote verschillen.

- Midpoint deflection of a simply supported plate under uniformly distributed load (filled)



Aspect ratio $a \times b$	Method			
	Closed form	2D FE ABD	2D FE composite	3D FE p-adaptive
1 x 1	0.162	0.162	0.162	0.155
1 x 5	0.261	0.259	0.259	-
5 x 1	0.689	0.689	0.686	0.645

Tabel 4.2. Vergelijking van het kinematisch model met de eindige elementen modellen; Ref. [18].

Praktijktesten

Met elementen met dezelfde overspanningen als in Tabel 4.2. zijn er praktijktesten gedaan. Een onge vuld paneel is vergeleken met een met Balsa hout gevuld paneel. In Tabel 4.3 zijn de genormaliseerde resultaten te zien van de panelen onder een uniforme belasting. Met name bij de overspanning van 5×1 m ($a \times b$) treden grote verschillen in doorbuiging op tussen de gevulde en de onge vulde panelen. De verschillen zijn erg afhankelijk van het belastinggeval, maar er kan wel geconcludeerd worden dat hoe groter de invloed van de afschuifvervorming op de totale doorbuiging is, hoe groter het effect van de vulling op de totale doorbuiging is. In Par. 4.2 wordt verder op de afschuifvervorming van een I-core ligger in dwarsrichting ingegaan.

Aspect ratio $a \times b$ [m]	Normalised midpoint deflection	
	Void	End-Grain Balsa
1 x 1	1	0.61
1 x 5	1.05	0.98
5 x 1	17.0	2.60

Tabel 4.3. Invloed vulling op doorbuiging; Ref. [18].

4.1.3 Resultaten buigtesten

In het laboratorium van de Technical University of Gdansk; Faculty of Ocean Engineering & Ship Technology zijn 52 panelen op buiging getest. Van de 52 panelen zijn er 30 I-core panelen (serie 2a), 16 V-core panelen (serie 2b) en 6 I-core panelen met curve van 50 en 100 mm (serie 2c). Alle panelen hebben een lengte van 3 m en een breedte van 1,5 m. De geteste panelen hebben verschillende hoogtes, plaatdikten en vullingen. De geteste combinaties van de series 2a en 2b zijn in Fig. 4.7 te zien.

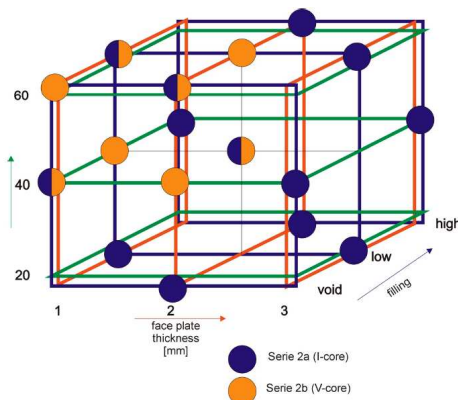


Fig. 4.7. Eigenschappen van de geteste panelen, series 2a en 2b; Ref. [19].

Stijfheid

Als eerste zijn er niet-destructieve testen uitgevoerd. De elementen zijn hierbij belast onder verschillende belastingtypen in combinatie met verschillende randvoorwaarden; zie Fig. 4.8.

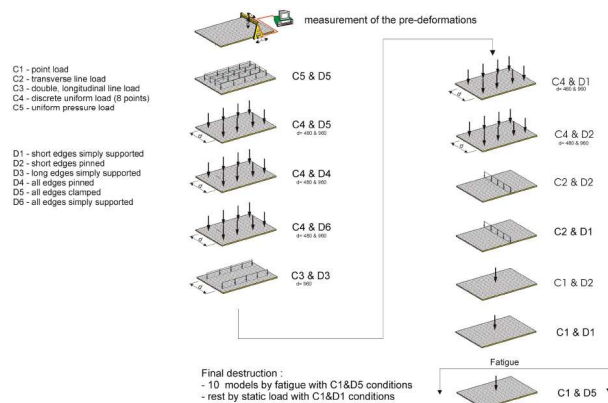


Fig. 4.8. Programma van niet destructieve testen

Alleen de metingen van de I-core panelen (serie 2a) van test C1&D1 zijn gepubliceerd; zie Fig. 4.9. De panelen zijn als volgt genummerd: Het eerste getal geeft de

hoogte aan (mm), het tweede getal de plaatdikte van het paneel (mm). De letters geven het type vulling aan: Leeg (E), lage dichtheid (L) of hoge dichtheid (H). Er zijn 13 verschillende typen panelen die allemaal dubbel zijn uitgevoerd. Het type (40×2×L) is 6 keer uitgevoerd, waardoor het totaal op 30 komt. De dubbel geteste panelen vertonen onderling geen grote verschillen in de testresultaten.

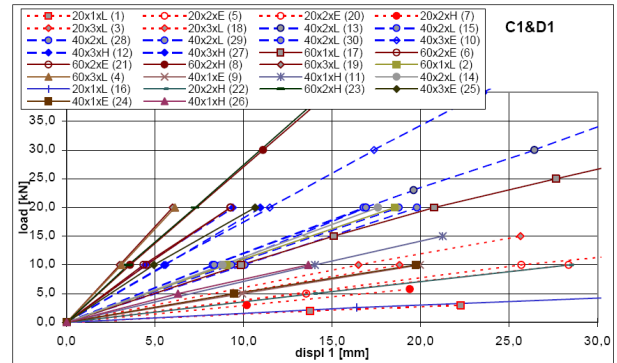


Fig. 4.9. Resultaten niet-destructieve test combinatie C1&D1; Ref. [19].

De resultaten zijn geanalyseerd en oplopend in stijfheid gerangschikt in Tabel 4.4. De gemiddelde stijfheid van de verschillende panelen is bepaald en de puntbelasting die deze panelen kunnen hebben bij een doorbuiging van 12 mm is berekend. Dit is de toegestane doorbuiging van een vloer ($1/250 \times$ overspanning) in een kantoor. Opvallend aan deze resultaten is dat de vulling geen significante invloed heeft op de stijfheid van de panelen. De plaatdikte heeft wel invloed op het stijfheidgedrag. Opvallend is ook het relatief slechte gedrag van een paneel met 60 mm hoogte en plaatdikte van 1 mm. Dit lijkt geen erg economische combinatie.

Hoogte paneel (mm)	Plaatdikte (mm)	Vulling	Stijfheid (kN/mm)	Belasting bij 12mm (kN)
20	1	Low	0,2	2,4
20	2	High	0,3	3,6
20	2	Empty	0,4	4,8
40	1	Empty	0,5	6,0
20	3	Low	0,6	7,2
40	1	High	0,7	8,4
60	1	Low	1,1	13,2
40	2	Low	1,1	13,2
40	3	Empty	1,8	21,6
40	3	High	2,1	24
60	2	Empty	2,1	25,2
60	2	High	2,7	32,4
60	3	Low	3,4	52,8

Tabel 4.4. Analyse meetresultaten Fig. 4.9

1^e schatting afmetingen I- paneel als vloerelement

Om een schatting van het benodigde paneel bij een overspanning van 3 m te verkrijgen, wordt de puntlast gelijkmatig verdeeld verondersteld over het paneel (ongunstige aanname). Gaan we nu uit van een permanente belasting van $3,0 \text{ kN/m}^2$ en een variabele belasting van $4,0 \text{ kN/m}^2$, dan komen we inclusief veiligheidsfactoren uit op een puntlast van: $(1,2 \times 3 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \times 4 \text{ kN/m}^2) \times 4,5 \text{ m}^2 = 43,2 \text{ kN}$.

Deze belasting kan met een paneel van 60 mm hoogte en een plaatdikte van 3 mm opgenomen worden. We komen dan op een slankheid van ca. 1/50 maal de overspanning.

Sterkte

Nadat deze testen uitgevoerd zijn wordt overgegaan op destructieve testen. Op de panelen wordt een destructieve test uitgevoerd met belastingtype C1 en randvoorwaarde D1; zie Fig. 4.8. De panelen worden aan de korte zijden vrij opgelegd en in het midden door een puntlast belast; zie Fig. 4.10. Van de 30 I-core panelen worden er 6 op vermoeiing getest. Van 10 verschillende I-core panelen zijn er gegevens; zie Fig. 4.11.



Fig. 4.10. Testopstelling test C1&D1; Ref. [19].

Het is goed te zien hoe taai de panelen zijn. Slechts een klein gedeelte van de totale sterkte wordt gebruikt als voldaan moet worden aan de doorbuigingseisen. Een veelvoorkomende doorbuigingseis voor vloer is 1/250 maal de overspanning. We komen dan uit op een doorbuiging van 14mm. Bij deze doorbuiging wordt nog geen kwart van de totale belasting die mogelijk is qua sterkte benut; zie Fig. 4.11. In Tabel 4.5 zijn deze resultaten geanalyseerd en oplopend in sterkte gerangschikt. De vulling heeft een klein effect op de sterkte. Opvallend is de sprong in de sterkte bij de

laatste 3 panelen met een hoogte van 60mm. Dit was bij de buigtesten niet zo het geval.

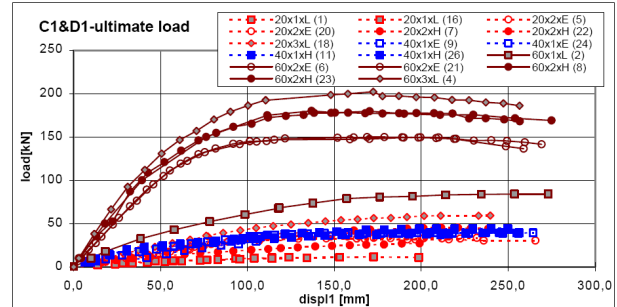


Fig. 4.11. Metingen I-core panelen test C1&D1; Ref. [19].

Hoogte panel (mm)	Plaatdikte (mm)	Vulling	Max. belasting (kN)	Max verpl. (mm)
20	1	Low	20	200
20	2	Empty	30	250
20	2	High	40	220
40	1	Empty	40	260
40	1	High	40	250
20	3	Low	60	240
60	1	Low	80	275
60	2	Empty	150	270
60	2	High	175	270
60	3	Low	200	260

Tabel 4.5. Analyse meetresultaten Fig. 4.11

Er zijn ook V-core elementen getest. In Fig. 4.12 zijn de resultaten van de V-core panelen te zien. Opvallend is de knik t.p.v. de maximaal opneembare belasting. Deze panelen gedragen zich duidelijk minder taai dan de I-core panelen. Een vergelijking van de sterkte is niet goed mogelijk, omdat de staaldikte van de kern van de V-core en I-core panelen verschillen.

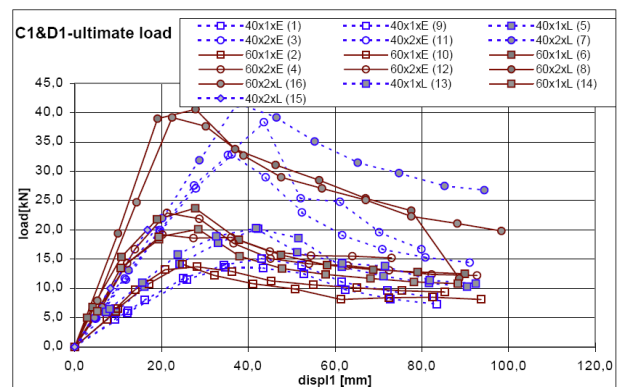


Fig. 4.12. Metingen V-core panelen test C1&D1; Ref. [19].

Er zijn ook 6 I-core panelen met een curve van 50 en 100 mm getest zie Fig. 4.13. Alle panelen hebben een hoogte van 40 mm en een plaatdikte van 3 mm. Alle zes panelen zijn ongevuld.

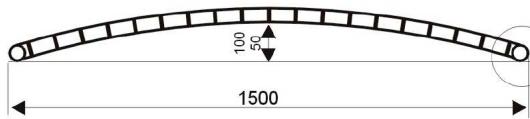


Fig. 4.13. I-core panelen met curve, serie 2c; Ref. [19].

De meetresultaten zijn te zien in Fig. 4.14 en de analyse hiervan staat in Tabel 4.6. De meetresultaten van slechts vier panelen zijn bekend. Qua sterkte zijn de panelen te vergelijken met de I-core panelen, alleen zijn ze minder taai.

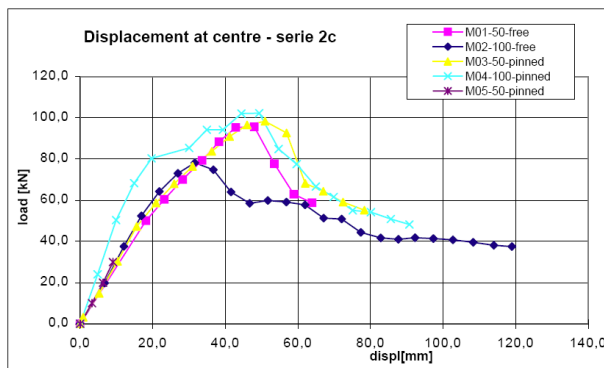


Fig. 4.14. Metingen I-core panelen serie 2c, test C1&D1; Ref. [19].

Curve (mm)	Oplegging	Max. belasting (kN)	Bij (mm)	Max verpl. (mm)
50	Vrij	95	50	65
100	Vrij	80	30	120
50	Scharnierend	95	50	80
100	Scharnierend	105	50	90

Tabel 4.6. Analyse resultaten Fig. 4.14.

4.1.4 Resultaten druktesten

In het laboratorium van de Technical University of Gdansk; Faculty of Ocean Engineering & Ship Technology zijn ook 32 panelen op druksterkte getest. Van de 32 panelen zijn er 16 I-core panelen (serie 3a) en 16 V-core panelen (serie 3b). Alle panelen hebben een lengte van 3 m en een breedte van 0,5 m. De geteste panelen hebben verschillende hoogtes, plaatdikten en vullingen met dezelfde aanduidingen als bij de buigtesten.

Sterkte

De panelen worden onder een gelijkmatig oplopende drukkracht geplaatst en de optredende drukspanningen in het paneel worden gemeten. De opstelling is te zien in Fig. 4.15. De Meetresultaten zijn te zien in Fig. 4.16.



Fig. 4.15. Testopstelling druktesten; Ref. [19].

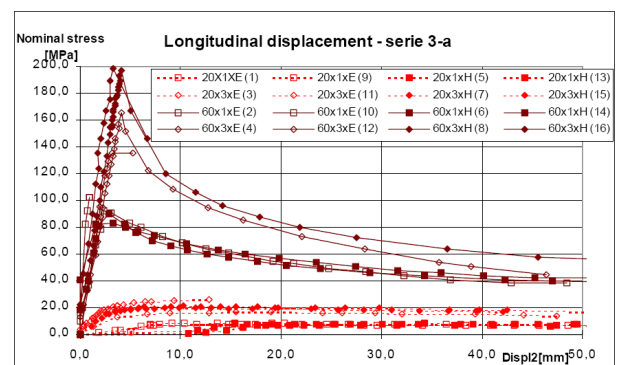


Fig. 4.16. Metingen I-core panelen serie 3a; Ref. [19].

De panelen met een hoogte van 20 mm hebben een zeer slecht drukgedrag. De paneelhoogte heeft een zeer grote invloed op de druksterkte van de panelen. Ook tussen de panelen met beide een hoogte van 60 mm, maar met verschillende plaatdikten treden grote verschillen op. De resultaten zijn oplopend geanalyseerd en gesorteerd in Tabel 4.7. Het is belangrijk dat de I-core elementen zo gedimensioneerd worden dat er geen knik optreedt bij lage drukspanningen. Op grond van de resultaten kan er niet geconcludeerd worden dat de vulling wezenlijke invloed heeft op de druksterkte.

Hoogte paneel (mm)	Plaatdikte (mm)	Vulling	Max. spanning (N/mm ²)	Max. Belasting (kN/m)
20	1	Empty	10	29
20	1	Low	10	29
20	3	Empty	20	134
20	3	Low	20	134
60	1	Empty	90	441
60	1	Low	90	441
60	3	Empty	160	1400
60	3	Low	200	1700

Tabel 4.7. Analyse meetresultaten Fig. 4.16.

Er zijn ook V-core elementen getest. De meetresultaten hiervan zijn te zien in Fig. 4.17. Deze elementen vertonen een soortgelijk gedrag als de I-core elementen. Een goede vergelijking van de draagcapaciteit is niet mogelijk omdat de lijf- en flensdikten verschillen.

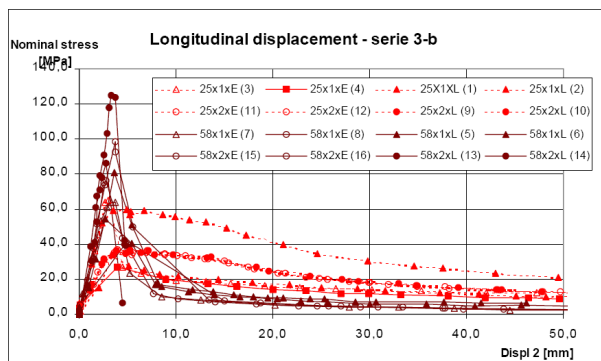


Fig. 4.17. Meetresultaten V-core elementen serie 3b; Ref. [19].

Bezwijkmechanismen

Wat opvalt bij de bestudering van de bezwijkmechanismen, is dat dit mechanisme sterk afhankelijk is van de beginvervorming. Deze beginvervorming is een resultaat van het lasproces. De bezwijkmechanismen variëren van een globaal bezwijkmechanisme; zie Fig. 4.18, tot lokale bezwijkmechanismen, zoals knik van de buitenplaten of

bezwijk van een lokale doorsnede; zie Fig. 4.19. De bezwijkmechanismen zijn ook te onderscheiden in de meetresultaten. De lokale bezwijkvormen zijn te herkennen aan hun knik in het diagram. De globale bezwijkvormen hebben een meer afgeronde curve. Met name de panelen met een hoogte van 60 mm bezwijken aan lokale knik.



Fig. 4.18. Globaal bezwijkmechanisme; Ref. [19].



Fig. 4.19. Lokaal bezwijkmechanisme; Ref. [19].

4.2 Afschuifvervorming van een I-core ligger in dwarsrichting

Zoals bekend zijn I-core panelen opgebouwd uit een frame dat bestaat uit twee dunne horizontale platen met daartussen een lijf dat bestaat uit stalen strippen. In lengterichting worden de platen permanent ondersteunt, maar in dwarsrichting is er een discrete ondersteuning. De afschuifstijfheid in lengterichting is daardoor erg hoog, maar het zwakke punt is de afschuifstijfheid in dwarsrichting (orthotroop gedrag). Door de lage afschuifstijfheid in dwarsrichting kan zowel lokale als globale doorbuiging plaatsvinden; zie Fig. 4.20.

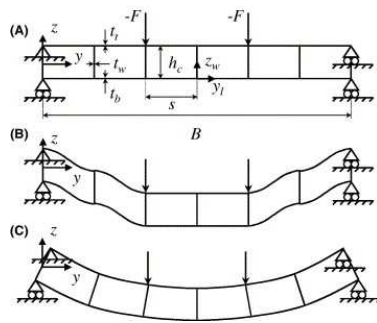


Fig.4.20. (A) afmetingen en belastingen; (B) lokale doorbuiging; (C) globale doorbuiging; Ref. [20].

Het mechanisch gedrag in lengterichting is redelijk eenvoudig te analyseren en daar zijn al analytische rekenmethoden voor. In dwarsrichting moet er nog veel onderzoek plaatsvinden. Naar dit gedrag is door J. Romanoff en P. Varsta onderzoek gedaan. De resultaten zijn gepubliceerd in het artikel *Bending response of web-core sandwich beams*; Ref [20]. Het eerste gedeelte van dit artikel bevat een analytische analyse van het mechanisch gedrag van deze liggers. Er worden twee analytische rekenmethodes ontwikkeld: de “Plane frame” methode en de HB-methode. In het tweede gedeelte worden deze rekenmethodes in een case-study vergeleken met een FE-analyse.

Dit afstudeeronderzoek richt zich op praktische toepassingen van I-core panelen in de Bouw. Om deze reden wordt er nu niet verder ingegaan op de analytische rekenmethodes voor het afschuifgedrag van een I-core ligger. De Case-studie wordt wel geanalyseerd en er wordt gekeken welke conclusies daaruit getrokken kunnen worden.

Case study

Het tweede gedeelte van het artikel bestaat uit een case-studie waarbij 4 verschillende liggers worden getest. Eerst wordt een analytische berekening uitgevoerd met de twee ontwikkelde rekenmethoden en vervolgens worden de resultaten door een eindige elementen berekening gecontroleerd. De I-core ligger wordt gemodelleerd als een “standaard” ligger met dezelfde mechanische eigenschappen; zie Fig. 4.21. Vier verschillende liggerconfiguraties worden in deze case bestudeerd. De notatie is als volgt: $I[t_f]/[t_w] \times [h_c]/[s]$, waarin:

- t_f = de plaatdikte (mm)
- t_w = de lijfdikte (mm)
- h_c = hoogte van de I-core ligger
- s = lijfafstand

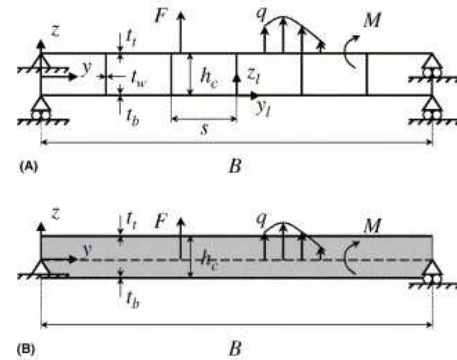


Fig. 4.21. Eigenschappen van de ligger: (A) ligger (B) gemodelleerde ligger; Ref. [20].

De volgende liggers worden getest:

A	(I1/4 x 80/80)	sandwichligger met dunne flensplaten
B	(I4/4 x 20/80)	sandwichligger met dikke flensplaten
C	(I3/4 x 40/120)	standaard sandwichligger
D	(I5/1 x 150/50)	sandwichligger met dunne lijfplaten

Alle liggers hebben 12 lijfplaten met afstand s en een E-modulus van 206 GPa, Poisson's ratio is 0,3. De liggers worden in x-richting oneindig lang beschouwd, waardoor er vlakspanning ontstaat. De ligger wordt door 4 puntlasten belast. De gemodelleerde eigenschappen van de ligger zijn gesommeerd in Tabel 4.8. Hierin is D het totale opneembare buigend moment, D_f het totale opneembare buigend moment in de flensplaten, D_q de afschuifstijfheid.

Case [mm], $I[t_f]/[t_w] \times [h_c]/[s]$	D [kNm]	D_f [kNm]	D_Q [kN/m]
I1/4 × 80/80 Case A	743	0.0	69
I4/4 × 20/80 Case B	263	2.4	2781
I3/4 × 40/120 Case C	629	1.0	649
I5/1 × 150/50 Case D	13601	4.7	29

Tabel 4.8. Gemodelleerde eigenschappen van de I-core ligger; Ref. [20].

De overspanningslengte (B) verschilt per ligger, daardoor kunnen de uitkomsten uit tabel 4.8 niet één op één met elkaar vergeleken worden. Er kunnen wel de volgende algemene conclusies getrokken worden:

- Een ligger gedraagt zich vooral als een afschuifligger bij een grote verhouding tussen de flensafstand en de profielhoogte
- Een I-core ligger gedraagt zich vooral als een buigligger bij een grote profielhoogte en een kleine lijfstand en een dikkere flens

FE-analyse

De eindige elementen berekening is gedaan met 3D-thin Shell elementen (type S8R in Abaqus); zie Fig. 4.22. De Shell elementen ter plaatse van het lijf en de flensplaat zijn direct met elkaar verbonden. De vergelijkingen van de analytische resultaten en de numerieke resultaten zijn opgesomd in Tabel 4.9.

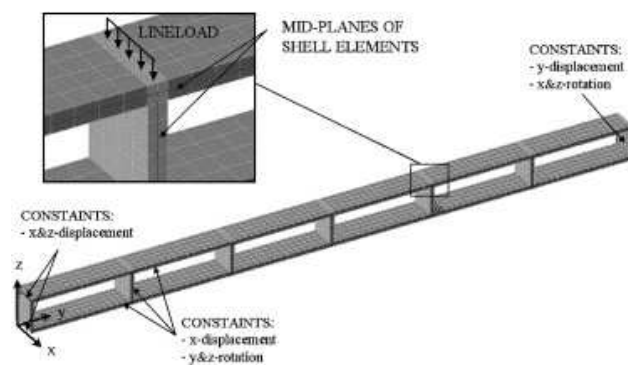


Fig. 4.22. 3d-modelling; Ref. [20].

Case	A [mm]	B [mm]	C [mm]	D [mm]
FEM	-4.703	-0.2325	-0.8985	-1.289
Plane frame	-4.700	-0.2286	-0.8928	-1.289
HB-method	-4.709	-0.2322	-0.9051	-1.326

Tabel 4.9. Vergelijking van de doorbuigingen bij een belasting van 1 kN/m; Ref. [20].

De verschillen tussen de analytische rekenmethodes en de numerieke analyse zijn klein. Doordat de overspanningslengten van de platen verschillen is het niet goed mogelijk de verschillende liggers met elkaar te vergelijken. De doorbuiging blijkt in grotere mate af te hangen van de afschuifstijfheid dan van het opneembaar buigend moment. Hoe stijver het element in dwarsrichting, hoe beter de belasting verspreidt wordt. Wil men een puntlast laten spreiden, zodat het door meer ribben wordt opgenomen, dan moet het I-core element zo gedimensioneerd worden dat de het element een hoge afschuifstijfheid heeft in dwarsrichting.

4.3 Laser welded steel bridge decks

In het afstudeeronderzoek *Laser welded steel bridge decks*; Ref. [21], is onderzoek gedaan naar het vermoeiingsgedrag van stalen brugdekken. Er is ook gekeken naar toepassing van I-core panelen als topplaat ondersteund door verstijvers (bulb flat); zie Fig. 4.23. Deze panelen gedragen zich stijver dan de orthotrope platen en dat verhoogt de levensduur van de daarop gelegen rijvloer.

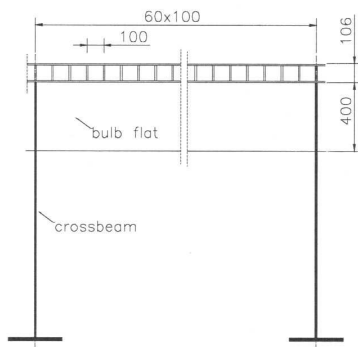


Fig. 4.23. I-core panelen als topplaat in brugligger; Ref [21].

Meer onderzoek is nog nodig naar het vermoeiingsgedrag van axiaal belaste T-lassen en de spanningen in de verbinding tussen de verstijvers en de I-core panelen.

4.4 Conclusies

Door diverse universiteiten en onderzoeksinstituten is onderzoek gedaan naar het gedrag van lasergelaste sandwichpanelen. De belangrijkste conclusies die uit deze onderzoeken getrokken kunnen worden zijn:

De ontwikkelde analytische rekenmodellen komen goed overeen met eindige elementen modellen en praktijktesten.

In gevallen waarbij de afschuifvervorming dominant is, heeft het al dan niet vullen van de panelen met een kernmateriaal grote invloed op de doorbuiging.

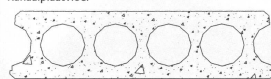
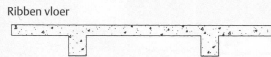
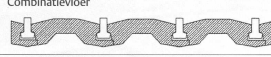
De mate waarin een I-core ligger zich als een afschuifligger gedraagt, is afhankelijk van de verhouding tussen de flens en de lijven en is afhankelijk van de verhouding tussen de hoogte en de lijfstand van de ligger.

De op buiging getest panelen vertonen een taai gedrag. Tegelijk zijn de elementen niet heel stijf, waardoor de doorbuiging in veel gevallen maatgevend zal zijn en niet de sterkte. Het vullen van de panelen met kernmateriaal, heeft bij panelen die vooral op buiging belast worden weinig invloed op de doorbuiging en de sterkte. De plaatdikte en de hoogte van de panelen bepalen de grootte van de doorbuiging en de sterkte.

Bij de op druk belaste elementen treden verschillende bezwijkmechanismen op, zowel globale als lokale bezwijkmechanismen. Ook voor deze elementen geldt dat de hoogte van het paneel en de plaatdikte de druksterkte bepaald en dat de vulling een geringe invloed heeft op de sterkte van het paneel.

5 Overzicht vloersystemen

De totale vloerenmarkt in Nederland bedraagt ca. 33 miljoen m² per jaar. Een groot deel daarvan zijn ter plaatse gestorte vloeren. De markt voor prefab vloersystemen wordt geschat op ca. 15 miljoen m² per jaar; Ref. [22]. Deze prefab vloerelementen zijn weer onder te verdelen in verschillende typen. Het marktaandeel van de verschillende traditionele vloersystemen is te zien in Tabel 5.1.

Vloerproducten	Woningbouw (overspanning 5-6 m.)	Overige (kantoren etc.) (overspanning 6-14 m.)
Breedplaatvloer 	5,5	0,5
Kanaalplaatvloer 	2,5	2,0
Ribben vloer 	1,0	1,0
Combinatievloer 	1,5	0,1
Diversen	0,2	0,9
TOTAAL	10,7	4,5

Tabel 5.1. De markt van prefabvloeren (in m² x 10⁶), gemiddelde over de periode 1995 – 2000; Ref. [22].

Breedplaatvloeren en kanaalplaatvloeren domineren de markt, maar met name in de utiliteitsbouw hebben de overige vloersystemen een redelijk groot marktaandeel (20%). De markt is aan het veranderen door nieuwe, door de overheid gestimuleerde trends, zoals IFD (Industrieel, Flexibel en Demontabel)-bouwen en DuBo (Duurzaam Bouwen). Deze trends hebben de laatste tien jaar geleid tot de ontwikkeling van een groot aantal nieuwe, innovatieve constructievloeren. Deze vloeren kenmerken zich door een of meerdere van de volgende eigenschappen: een industriële vervaardiging, laag eigengewicht, minimale constructiehoogte, grote ontwerpvrijheid en flexibele integratie van de leidingen.

In dit hoofdstuk wordt een kort overzicht gegeven van de traditionele verdiepingsvloeren. Vervolgens wordt gekeken welke innovatieve vloersystemen er zijn en waarom ze op de markt gebracht zijn. De ribbenvloer en de combinatievloer worden niet behandeld, omdat deze bijna niet als verdiepingsvloer worden toegepast. De technische specificaties van de in dit hoofdstuk beschreven vloeren staan in Bijlage A.

5.1 Traditionele vloersystemen

De traditionele vloersystemen hebben lange tijd de markt gedomineerd. Toch zijn er de laatste jaren nieuwe systemen op de markt gekomen. We kijken in deze paragraaf naar de sterke en de zwakke punten van deze traditionele vloersystemen.

Breedplaatvloer

De breedplaatvloer bestaat uit een vooraf vervaardigde gewapende en eventueel voorgespannen betonnen schil (bekistingsplaat) van 50 – 100 mm. In de bekistingsplaat worden tralieliggers ingestort. Op het werk wordt dan de bovenwapening aangebracht op de tralieliggers en wordt de vloer gestort. De sterke punten van de vloer zijn de ontwerpvrijheid, het leidingwerk kan eenvoudig worden aangebracht in alle richtingen en de vloer kan steunpuntsmomenten opnemen. De zwakke punten zijn het hoge eigengewicht, de leidingen zijn achteraf niet bereikbaar en de vloeren moeten tijdens de uitvoeringsfase onderstempeld worden.

Kanaalplaatvloeren

Kanaalplaatvloeren zijn volledig geprefabriceerde voorgespannen vloerplaten waarbij, ter besparing van het eigengewicht holle kanalen zijn ingebouwd. De kanaalplaten kunnen op de boven- of onderflens van de ondersteunende liggers geplaatst worden. Worden de kanaalplaten op de onderflens van de liggers geplaatst dan ontstaan er geïntegreerde liggers, waardoor de constructiehoogte wordt beperkt. Op de elementen wordt nog een al dan niet constructieve afwerkvloer gestort. De sterke punten van kanaalplaatvloeren zijn het lage eigengewicht en de geringe constructiehoogte. Het zwakke punt is vooral dat leidingen niet in de vloer opgenomen kunnen worden, deze komen dus of in de afwerkvloer, of onder de vloerconstructie.

Staalplaatbetonvloeren

Een staalplaatbetonvloer bestaat uit een staalplaat, gelegen op primaire en vaak ook secundaire liggers. Op de staalplaat wordt in het werk een constructief gewapende betonlaag gestort. Deze betonlaag werkt constructief samen met de staalplaten. De staalplaten dienen als bekisting en als onderwapening. De sterke punten van dit vloersysteem zijn de ontwerpvrijheid en het lage eigen gewicht. Het nadeel van dit vloersysteem is de kleine overspanning (ca. 3,5 m) die bereikt kan worden, waardoor er een netwerk van primaire en secundaire liggers nodig is. Een ander nadeel is, dat tijdens de bouwphase de vloeren onderstempeld moeten worden. Er is ook een systeem op de markt met hoge staalplaten. Met dit systeem kunnen grotere overspanningen worden gecreëerd, ca. 5 m zonder onderstempeling en 8 m met onderstempeling.

5.2 Innovatieve vloersystemen

In deze paragraaf kijken we waarom de nieuwe vloersystemen zijn ontwikkeld en waar ze worden toegepast. Als er cijfers van bekend zijn, wordt er ook gekeken hoe het de nieuwe vloersystemen is vergaan op de markt.

Bollenplaatvloer

De bollenplaatvloer; zie Fig. 5.1, ontwikkeld door Bubbledeck is een variant op de breedplaatvloer. De vloer is ontworpen i.v.m. de gewichtsbesparing die deze vloer oplevert. De vloer bestaat uit een betonnen schil met daarop de onder- en bovenwapening. Ter besparing van het gewicht zijn er kunststof bollen tussen de onder en boven wapening geplaatst. Dit levert ca. 35% gewichtsbesparing op t.o.v. een massieve betonnen vloer.

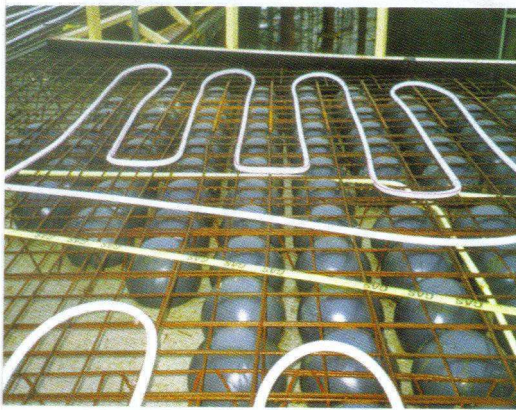


Fig. 5.1. Bollenplaatvloer tijdens de uitvoering; Ref. [26].

De vloer draagt in vier richtingen en wordt toegepast in zowel woning- als utiliteitsbouw. De vloer heeft een relatief groot marktaandeel bereikt, ca. 200.000 m² / jaar. Er kleven nog steeds nadelen aan deze vloer. De vloer moet tijdens de bouwfase onderstempeld worden en de leidingen zijn achteraf niet meer bereikbaar.

VBI-leidingen vloer

Deze vloer is een variant op de kanaalplaatvloer en is specifiek voor de woningbouw ontworpen. De vloer is ontworpen doordat bij de traditionele kanaalplaatvloer de leidingen niet in de vloer zelf verwerkt kunnen worden. De vloer wordt voorzien van een ringsleuf waarin achteraf leidingen in geplaatst kunnen worden; zie Fig. 5.2.



Fig. 5.2. VBI-leidingvloer tijdens uitvoering; Ref. [26].

De sleuven zijn 100 mm diep en hebben een breedte van 140, 240 of 340 mm, waardoor ook de leidingen voor mechanische ventilatie op te nemen zijn. De vloer is direct al vol belastbaar. Achteraf worden de sleuven dichtgestort en de vloer van een afwerklaag voorzien. De kostprijs van de vloer is afhankelijk van het aantal aangebrachte sleuven. De vloer is succesvol gebleken. Binnen twee jaar na het begin van de productie zijn 12.000 woningen gedeeltelijk voorzien van een VBI-leidingvloer. De consument kan zelf de afbouw bepalen. Dit maakt de woning aantrekkelijk voor de consument. Er is ook eenzelfde type vloer voor appartementen ontworpen, de appartementenvloer. Deze vloer heeft een overspanning van max. 12 m en voldoet aan de hoge geluidseisen van het bouwbesluit 2003.

Wing-vloer van Betonson

Deze vloer is een combinatie van een kanaalplaat- en een breedplaatvloer en heeft de bedoeling om de sterke punten van beide vloeren te combineren. De middelste strook is een kanaalplaat en aan beide zijde is over de gehele lengte een leidingsleuf van 600 mm opgenomen. Liggen twee elementen naast elkaar, dan is er een leidingsleuf van 1200 mm; zie Fig. 5.3.



Fig. 5.3. Wing-vloer tijdens de uitvoering; Ref. [26].

In de kanaalplaat zijn ook dwarssparingen opgenomen, waardoor leidingverkeer in twee richtingen mogelijk is. De vloer hoeft niet meer onderstempeld te worden in de bouwphase en de leidingen kunnen achteraf geplaatst worden. Het dichtleggen van de goten kan gebeuren door afdichtplaten (leidingen achteraf bereikbaar) of door de sparingen vol te storten met beton (goedkopere oplossing). De vloer is voorzien van een kopbalk, waardoor een randbekisting overbodig is. De vloer is toegepast in zowel de utiliteitsbouw als in de woningbouw, maar voor zover bekend nog niet op grote schaal.

Kant & Klaar vloer

De Kant & Klaar-vloer van Orion beton; zie Fig. 5.4, is een variant op de massieve betonnen vloer. In deze vloer worden de leidingen al in de fabriek ingestort, dit kan gebruikersspecifiek gebeuren. De afzet van de vloer is ca. 60.000 m² per jaar.



Fig. 5.4. Kant & Klaar vloer tijdens fabricage; Ref. [26].

Het sterke punt van deze vloer is de bouwsnelheid. Zwakke punten zijn dat de leidingen achteraf niet bereikbaar zijn en de vloer heeft een hoog eigen gewicht.

Infra⁺-vloer

De Infra⁺-vloer, zie Fig. 5.5, bestaat uit een 70 mm dikke betonplaat met daarin gestorte stalen ribben, vaak IPE-profielen met doorvoergaten.



Fig. 5.5. Infra⁺-vloer; Ref. [21].

Tussen de ribben is er plaats voor leidingen. Leidingverkeer is dus in twee richtingen mogelijk. De vloer wordt afgedekt met een topvloer naar keuze. Door het dubbelschalige systeem voldoet de vloer ruimschoots aan de geluidseisen voor woningbouw. De vloer is al sinds 1998 op de markt, maar is nog niet op grote schaal toegepast. De vloer is wel in een aantal demonstratie projecten toegepast. Nadeel waar tegenaan gelopen is, is dat de vloer niet stijf is, waardoor, bij woningen gebouwd volgens het stapelbouwsysteem zich stabiliteitsproblemen voordeden. Het sterke punt van deze vloer is dat de leidingen ook achteraf bereikbaar zijn. Deze vloer is dus flexibel in zowel de gebruiks- als in de uitvoeringsfase.

IDES-vloer

Een IDES-vloer; zie Fig. 5.6, is een stalen vloersysteem dat is opgebouwd uit stalen cassettes die steunen op geïntegreerde liggers. Dwars op de cassettes wordt een staalplaat aangebracht, waarop een afwerklaag van anhydriet wordt aangebracht.

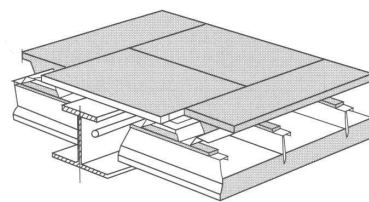


Fig. 5.6 IDES-vloer; Ref. [25].

De leidingen kunnen in de stalen vloer worden opgenomen. Voordelen zijn het lage eigengewicht en de integratie van leidingen. Nadeel is de relatief grote constructiehoogte en kleine overspanning die bereikt kan worden (max. 4,8 m).

Staalframevloer

Deze elementen; zie Fig. 5.7, bestaan uit twee stalen platen met daartussen een frame bestaande uit koudgevormde C- en U profielen met staaldiktes van 1 tot 4 mm. Bij deze vloerelementen dragen de C-profielen in de overspanningsrichting en de U-profielen vormen de randliggers bij de ondersteuning. De platen worden op het frame geschroefd of genageld, waardoor de platen constructief meewerken aan de krachtwerving. Door de schijfwerking treedt er geen kip en knik op van de profielen.



Fig. 5.7. Plaatsing staalframe vloerelement; Ref. [28].

Leidingen kunnen in de vloer verwerkt worden, maar moeten bij prefabricage wel van tevoren worden aangebracht. Het grootste probleem bij deze lichte staalframevloeren is de trillingsgevoeligheid.

Staalframe vloeren worden toegepast als onderdeel van de Staalframebouw. Dit is een bouwmethode waarbij de gehele constructie is opgebouwd uit staalframe wand- en vloerelementen. Deze bouwmethode wordt ook toegepast als optopconstructies op al bestaande draagconstructies. In landen als Engeland en Zweden, wordt deze bouwmethode veel toegepast. In Nederland is deze vloer nog maar bij enkele projecten toegepast.

5.3 Conclusies

Het grootste gedeelte van de markt wordt nog steeds gedomineerd door de traditionele vloersystemen, maar de nieuwe innovatieve vloersystemen zijn in opmars. Deze nieuwe vloersystemen zijn voornamelijk ontwikkeld om leidingen makkelijk te kunnen verwerken (flexibiliteit) en om gewicht te besparen.

De traditionele vloerenmarkt voor verdiepingsvloeren kan in twee hoofdcategoryen worden ingedeeld: De halfgeprefabriceerde vloeren (breedplaatvloer) en de geheel prefab vloeren (kanaalplaatvloer). Een al lang bestaande variant op de breedplaatvloer is de staalplaat betonvloer, voornamelijk ontwikkeld om gewicht te besparen. De nieuw ontwikkelde vloersystemen zijn vaak varianten op de bestaande vloeren.

De variant op de breedplaatvloer is de bollenplaatvloer. De ontwikkelde variant op de kanaalplaatvloer is de leidingenvloer. Wingvloer is een variant die op beide vloersystemen is gebaseerd.

Een nieuwe categorie vormen de lichte stalen vloeren, waarbij achteraf de leidingen nog bereikbaar zijn. Nieuw ontwikkelde vloeren in deze categorie zijn de Infa+-vloer, de IDES-vloer en de Staalframevloer. Deze vloeren hebben tot nu toe geen groot marktaandeel weten te verwerven. Dit komt door de onbekendheid van deze producten in Nederland en doordat de constructieve eigenschappen van deze vloeren nog niet optimaal zijn.

De nieuwe vloersystemen die een marktaandeel hebben weten te verwerven zijn allemaal gebaseerd op een traditioneel vloersysteem. Deze vloeren zijn aangepast en verbeterd op het gebied van flexibiliteit en eigen gewicht. De nieuwe stalen vloersystemen weten tot nu toe geen groot marktaandeel te verwerven, ondanks hun lage gewicht en flexibiliteit in zowel de bouw- als de gebruiksfase. Voor het ontwerp van de I-core vloer lijkt het dus verstandig om een bekend vloersysteem als basis te nemen en deze te verbeteren. In H8 worden een aantal vloervarianten ontwikkeld.

H6 Overzicht gevelsystemen

De gevel van een gebouw kent twee functies: Het afschermen van de binnenkant tegen invloeden van buiten (primaire functie) en het geven van informatie over de functie of eigenaar van het gebouw (secundaire functie). De gevels kunnen deel uit maken van de draagconstructie, maar kunnen ook los van de draagconstructie functioneren. In Nederland worden gevels van verschillende materialen gemaakt. We kennen metselwerkgevels, gevels van prefab beton, natuursteen gevels, gevels bestaande uit lichte plaatmaterialen, vliesgevels en actieve gevels. In Amerika wordt als binnenspouwblad van een metselwerkgevel ook gebruik gemaakt van stalen vakwerkpanelen.

Een I-core paneel is een lichtgewicht, gesloten paneel met goede constructieve eigenschappen. Een mogelijke toepassing van dit paneel zou zijn als vervanging van de zware prefab betonnen gevelelementen. In dit hoofdstuk onderzoeken we welke prefab betonnen gevels er zijn. In Amerika worden er stalen frames toegepast als vervanger van de prefab betonnen binnenspouwbladen. In Par. 6.2. wordt verder op deze elementen ingegaan.

6.1 Prefabbeton gevel

Prefabbeton gevels werden vroeger alleen als constructief element toegepast. Later werden deze elementen ook steeds vaker als architectonisch element toegepast. Er wordt onderscheid gemaakt tussen dragende en niet-dragende elementen. Niet-dragende elementen dragen alleen de windbelasting en hun eigen gewicht. Dragende elementen maken deel uit van de draagconstructie en kunnen minder makkelijk vervangen worden.

Dragende prefabbeton elementen

Dragende elementen dragen naast hun eigen gewicht en de windbelasting ook een deel van de verticale belasting uit de vloeren. De elementen kunnen als borstweringselement; zie Fig. 6.1 en als verdiepingshoge wandelementen worden toegepast; zie Fig. 6.2.

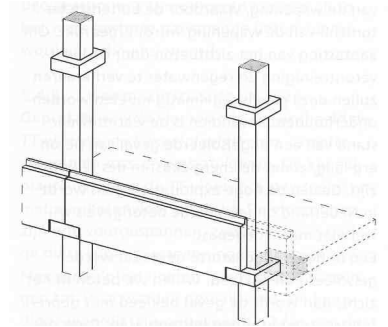


Fig. 6.1. Borstwering; Ref. [29].

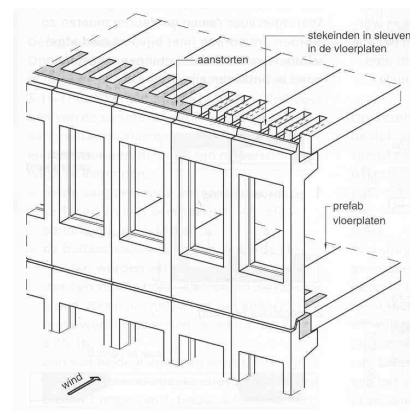


Fig. 6.2. Wandelement; Ref. [30].

Borstweringslementen dragen hun belasting af als balken en verdiepingshoge elementen als wanden. Deze wandelementen kunnen ook als schoren dienen in het vlak van de gevel.

De gevelelementen kunnen enkelschalig zijn of sandwichelementen zijn; zie Fig. 6.3.

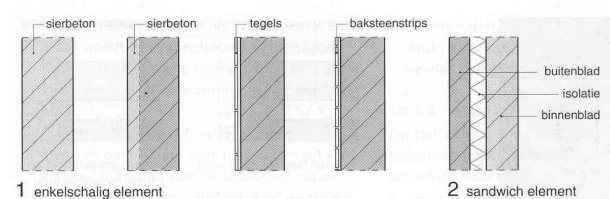


Fig. 6.3. Typen gevelelementen; Ref. [30].

Bij de sandwichelementen moeten het binnen- en buitenblad vrij van elkaar kunnen vervormen. Het buitenblad wordt zo dun mogelijk gemaakt om de ankers zo weinig mogelijk te belasten en om de spanningen door vervorming zo laag mogelijk te houden. Dit buitenblad is 80 a 90 mm dik en het binnenblad 120 a 200 mm, afhankelijk van de op te nemen krachten.

Niet-dragende prefabbeton elementen

Deze elementen dragen alleen hun eigen gewicht en een deel van de windbelasting af aan de draagconstructie. Ze maken zelf geen deel uit van de draagconstructie. Hierdoor kunnen ze betrekkelijk eenvoudig worden verwijderd en vervangen. Het buitenblad van een sandwichelement; zie Fig. 6.3, kan als een niet dragend element worden beschouwd. Ook bij de niet dragende elementen wordt onderscheid gemaakt tussen borstweringselementen en wandelementen.

Niet-dragende borstweringselementen worden als gestapeld of als zelfdragend element uitgevoerd; zie Fig. 6.4.

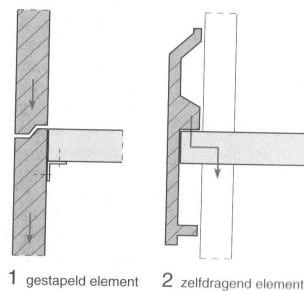


Fig. 6.4. Niet-dragend borstweringselement; Ref. [29].

Niet-dragende wandelementen worden meestal aan de beide vloeren bevestigd. Het element kan rusten op de vloer of hangen aan een stalen nok; zie Fig. 6.5.

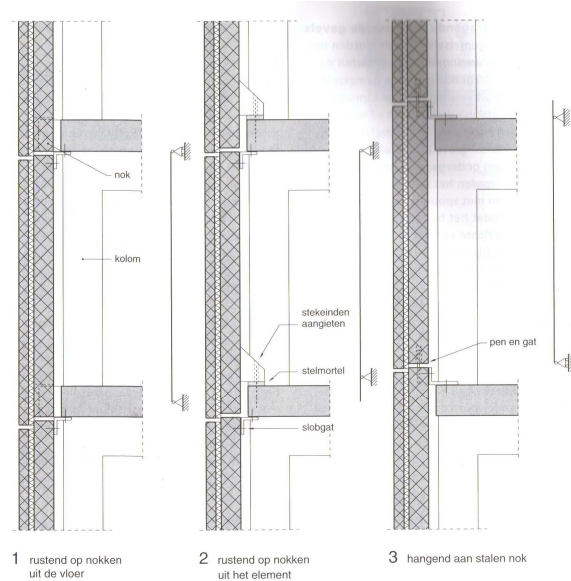


Fig. 6.5. Ophangmethodes voor niet-dragende betonnen wandelementen; Ref. [30].

6.2 Stalen vakwerkpaneel

In de VS worden stalen vakwerkpanelen als binnenspouwblad van een metselwerkgevel toegepast. Aan het binnenspouwblad zijn ankers bevestigd, waarop de metselwerkbladen rusten. Tussen het binnen- en buitenspouwblad zit isolatie. Het belangrijkste voordeel is het lage eigengewicht van deze elementen. De panelen komen in verschillende configuraties voor. Ze worden toegepast als verticale panelen of als horizontale panelen. Tussen de dragende panelen worden raamelementen geplaatst. Het meest toegepast is het horizontale borstweringselement, het “Spandrel truss panel”; zie Fig. 6.6.

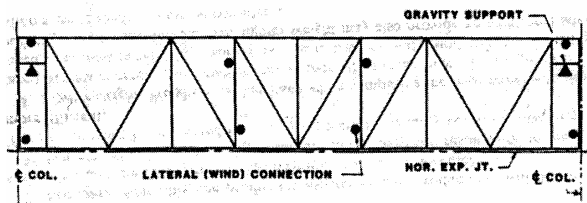


Fig. 6.6. Spandrel truss panel; Ref. [31].

Een andere toepassing is een combinatie van borstweringselement en een zelfdragend raamelement. Deze elementen worden op het werk gekoppeld, waarna de tijdelijke diagonalen in de raamelementen worden verwijderd en wordt de draagwerking door de borstweringselementen over genomen; zie Fig. 6.7.

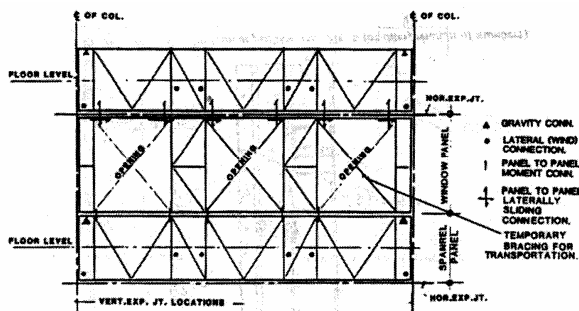


Fig. 6.7. Gecombineerd borstwerings- en raamelement; Ref. [31].

De elementen kunnen ook in één keer als prefab element geleverd worden. Dit verminderd het aantal verbindingen dat op het werk gemaakt moet worden; zie Fig. 6.8.

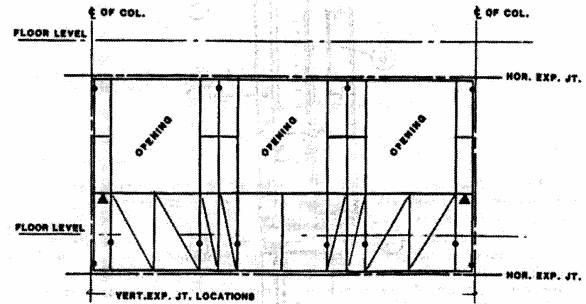


Fig. 6.8. Wandelement; Ref. [31].

Ontwerp van het vakwerkpaneel en verbindingen

Het paneel is gelast en stijf in zijn vlak. Daardoor brengt het geen krachten over naar de ankers. De verbindingen naar het gebouw toe zijn een belangrijk onderdeel. De frames zijn stijf in hun vlak, maar het gebouw beweegt wel. Deze bewegingen moeten plaats kunnen vinden zonder dat er krachten op het frame worden overgedragen. De bewegingen die opgenomen moeten worden zijn:

- Doorbuiging door o.a. wind, $1/500$ van de hoogte van het gebouw
- Krimp van de betonkolommen
- Doorbuiging van de dragende balken onder de vloer door de variabele belasting.
- Verschil in temperatuuruitzetting van het binnen- en buitenblad

Om vrijheid voor deze bewegingen te waarborgen en standzekerheid te verzekeren, heeft per element één verbinding geen vrijheidsgraden en één verbinding alleen een horizontale vrijheidsgraad. De overige verbindingen hebben twee vrijheidsgraden, in horizontale en in verticale richting; zie Fig. 6.9.

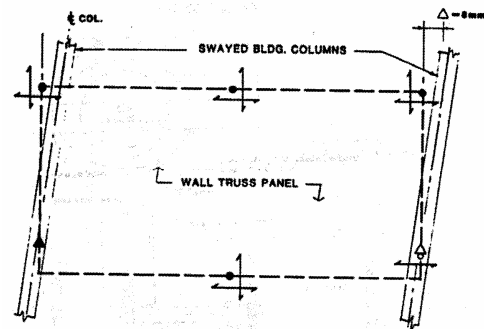


Fig. 6.9. Vrijheidsgraden van het vakwerkpaneel; Ref. [25].

6.3 Conclusies

Door de constructieve eigenschappen van het I-core paneel komt dit element het meest tot recht als vervanging van prefab betonnen gevelelementen. Voor deze elementen zijn er de volgende bestaande varianten:

- Borstwering- of wandelement
- Dragend of niet-dragend element

In de VS is ervaring opgedaan met stalen vakwerkpanelen als binnenspouwblad. Het grote voordeel is de besparing op het eigen gewicht dat met deze panelen bereikt kan worden. Diverse panelen zijn ontworpen, zowel borstwering- als wandelementen en combinaties ertussen. Onderzocht moet worden welke elementen mogelijk zijn met de stalen I-core elementen.

De verbindingen tussen de gevel en het gebouw vormen een belangrijk constructief aspect. Onderzocht moet worden op welke wijze de verbindingen tussen het I-core paneel en het gebouw tot stand kan komen zodat deze in vrijheid van elkaar kunnen bewegen.

H7 Conclusies en aanbevelingen

In H7 en H8 van dit onderzoek worden verschillende vloer- en gevelvarianten ontworpen. Dit hoofdstuk geeft de belangrijkste aanbevelingen voor deze ontwerpen nog een keer weer.

7.1 Aanbevelingen vloerpanelen

Het doel waarom I-core panelen voor de scheepsbouw industrie ontworpen zijn is de gewichtbesparing. De panelen moeten niet gevuld worden met beton, want staalbeton sandwichpanelen zijn niet geschikt voor horizontale toepassingen.

Het vullen van panelen heeft vooral nut in gevallen waarbij de invloed in dwarsrichting groot is. Voor liggers die vooral in een richting overspannen heeft de vulling weinig invloed op de doorbuiging.

De vloer moet extra functies hebben t.o.v. conventionele vloersystemen en gebaseerd zijn op een bestaande vloer, zodat het nieuwe vloersysteem makkelijk geïntegreerd kan worden in een nieuw bouwproject.

7.2 Aanbevelingen gevelpanelen

Op druk belaste panelen moeten zo ontworpen worden dat knikgedrag niet overheerst, zodat er een redelijke drukspanning kan worden bereikt voordat het element bezwijkt door knik.

Gevels worden opgedeeld in vier categorieën:

- Niet dragend borstweringselement
- Dragend borstweringselement
- Niet dragend wandelement
- Dragend wandelement

Onderzocht moet worden voor welke categorie het I-core paneel het meest geschikt is.

Het belangrijkste bij het ontwerpen van de gevels is dat de gevel vrij moet kunnen vervormen t.o.v. de achterliggende draagconstructie. Om dit te waarborgen moeten er voldoende vrijheidsgraden zijn.

8 Ontwerp vloervarianten

In H5 zijn de bestaande vloeren die als verdiepingsvloer worden toegepast in drie categorieën opgedeeld. Deze drie categorieën zijn:

- Halfgeprefabriceerde vloeren
- Prefab vloeren
- Lichtgewicht stalen vloeren met toegankelijk leidingwerk

Voor elk van deze drie categorieën wordt er in dit hoofdstuk een I-core variant ontworpen en vergeleken met de al bestaande vloer en daarop ontwikkelde varianten. In de categorie halfgeprefabriceerde vloeren worden twee varianten ontwikkeld. Aan het einde van het hoofdstuk worden de belangrijkste eigenschappen van de vloeren in Tabel 8.5. met elkaar vergeleken. De eigenschappen zijn:

- Constructiehoogte
- Totale massa
- Massa prefab paneel
- Frequentiegedrag
- Gedrag bij brand
- Geluidwerendheid
- Flexibiliteit van de leidingen
- Uitvoering
- Sparingen
- Raveling
- Afwerking
- Scheurvorming bij steunpunten
- Opname steunpuntmomenten

Vloeren worden in diverse soorten gebouwen toegepast met verschillende overspanningen. De vergelijking in dit hoofdstuk richt zich op verdiepingsvloeren van kantoorgebouwen met de veel toegepaste overspanning van 7,2m. Om tot realistische afmetingen te komen van de I-core varianten is er voor elke variant een ontwerpberekening gemaakt, waarin de vloeren op de maatgevende constructieve aspecten berekend zijn; zie Bijlage A1, A2, A3 en A4. Uitgangspunten voor alle ontwerpberekeningen zijn:

- Overspanning van 7,2m
- Staalkwaliteit I-core paneel: S460
- Kwaliteit beton: B25

8.1 Variant 1, I-core Staalbetonpaneel

Dit I-core Staalbetonpaneel valt binnen de categorie halfgeprefabriceerde vloeren. Het traditionele vloertype in deze categorie is de breedplaatvloer. Een al langer bestaande variant hierop is de staalplaat betonvloer. De innovatieve variant die op deze vloer ontwikkelde is, is de bollenplaatvloer, zie H5. Het grote nadeel van deze varianten is dat ze nog steeds tijdens de uitvoeringsfase onderstempeld moeten worden. Uitgangspunt bij het ontwerp van het I-core Staalbetonpaneel is dat de vloer niet onderstempeld hoeft te worden tijdens de uitvoeringsfase.

In deze paragraaf worden de eigenschappen van het I-core Staalbetonpaneel besproken en vergeleken met de breedplaatvloer, de bollenplaatvloer en de staalplaatbetonvloer. De gebruikte gegevens zijn afkomstig van de volgende fabrikanten:

- Bekistingsplaatvloer van Dycore;
- Bollenplaatvloer van Bubbledeck;
- Staalplaatbeton vloer van Dutch Engineering;

Bij het I-core Staalbeton paneel vormt het I-core paneel het prefab onderpaneel, waarop in het werk een constructief meewerkende betonlaag wordt gestort. Het paneel dient als bekisting en als onderwapening. Doordat het I-core paneel niet onderstempeld wordt, buigt het element tijdens de periode dat het beton nog niet verhard is veel door. Om dit op te lossen zijn er twee subvarianten ontwikkeld:

8.1.1 Constructief gedrag variant 1a, met zeeg

Bij variant 1a, wordt het I-core paneel van een zeeg voorzien die de doorbuiging compenseert. De hoogte van de zeeg, de paneelhoogte en de dikte van de constructieve betonlaag worden zo op elkaar afgestemd, dat de vloer na het storten van het beton vlak is en dat nadat het beton verhard is, de bijkomende doorbuiging acceptabel is. Deze oplossing resulteert in een slank I-core paneel en een slanke totale constructie. In Bijlage A1 is deze variant op constructief doorgerekend en de optimale afmetingen berekend. In deze paragraaf worden de belangrijkste rekenresultaten gepresenteerd.

Uit de berekening volgt dat er per element (2,4m breed) 12 perFOBonds nodig zijn. Deze hoeven niet over de hele lengte door te lopen; zie Fig. 8.5.

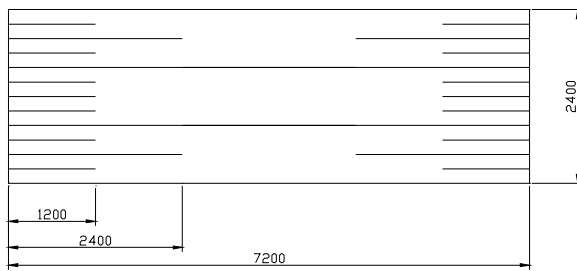


Fig. 8.5. Bovenaanzicht met verdeling perfobonds over het paneel

Controle van het stortproces

Door de toepassing van een zeeg kan niet al het beton in één keer tegelijk gestort worden. Het stortproces mislukt als het I-core paneel niet genoeg doorbuigt, waardoor het beton aan de zijkanten blijft staan en niet naar het midden toeloopt.

Wanneer het stortproces goed verloopt, buigt het I-core paneel steeds iets meer door, waardoor er weer beton bijgestort kan worden. Dit is een continu proces. In Bijlage A1 is dit proces benaderd door de doorbuigingsberekening in vier stappen uit te voeren. De conclusie is dat het proces correct verloopt. De resultaten van deze berekening staan in Tabel 8.2. Zie Bijlage A1 voor de uitgewerkte berekening.

Rekenstap	(alleen eigen gewicht)	1	2	3	4
Doorbuiging (mm)	15	65	87	97	101

Tabel 8.2. Iteratieve doorbuigingen tijdens het storten

8.1.1 Constructief gedrag variant 1b, zonder zeeg

Bij deze variant is zijn de hoogte van het I-core paneel en de hoogte van de betonzone zo op elkaar afgestemd dat er geen onderstempeling nodig is en geen zeeg nodig is.

In Bijlage A2 is deze variant op constructief doorgerekend en de optimale afmetingen berekend. In deze paragraaf worden de belangrijkste rekenresultaten gepresenteerd.

Uit de berekeningen volgde het element met de afmetingen zoals in Fig. 8.6. De berekening is uitgevoerd voor een paneel met een breedte van één meter.

Benodigde afmetingen van het paneel:

Dikte onderflens:	2 mm
Dikte bovenflens:	3 mm
Lijfdikte:	3 mm
Betonhoogte:	80 mm
Paneelhoogte:	160 mm
Lijfafstand	200mm
Totaal traagheidsmoment:	$6,88 \times 10^7 \text{ mm}^4$
Traagheidsmoment I-core paneel:	$3,03 \times 10^7 \text{ mm}^4$

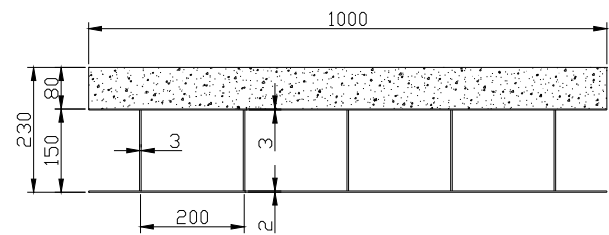


Fig. 8.6. Doorsnede variant 1b

Fase 1: Stortfase

De dikte van de bovenflens is gecontroleerd op plooi tijdens de stortfase. Nadat het beton gestort is, maar nog niet verhard, zijn er de volgende spanningen in het I-core paneel in de uiterste grenstoestand (UGT) en de bruikbaarheids grenstoestand (BGT); zie Tabel 8.3.

	UGT	BGT
Spanning onderflens (N/mm ²)	42	35
Spanning bovenflens (N/mm ²)	54	45

Tabel 8.3 Spanningen tijdens stortfase

Fase 2: Eindtoestand

In de eindtoestand heeft het samengestelde element een plastische opnamecapaciteit van 185 kNm. Het optredende maximale moment is 51,3 kNm.

De einddoorbuiging is 27 mm. De eis voor de maximale doorbuiging is 29 mm.

De maximale spanning aan de onderflens van het I-core paneel wordt 153 N/mm² (UGT) en 115 N/mm² (BGT).

Opname schuifkracht

De afschuifkracht, welke zorgt voor de samenwerking tussen beton en staal kan op dezelfde manieren worden opgenomen als bij variant 1a. Er zijn geen staalplaten met het benodigde staal per meter. De maximale dikte is 1,2mm. Een betere oplossing is die met perfobond. Deze verbinding is in Bijlage A2 berekend. Uit de berekening volgt dat er per element (2,4m breed) 6 perfobonds nodig zijn. Deze hoeven niet over de hele lengte door te lopen; zie Fig. 8.7.

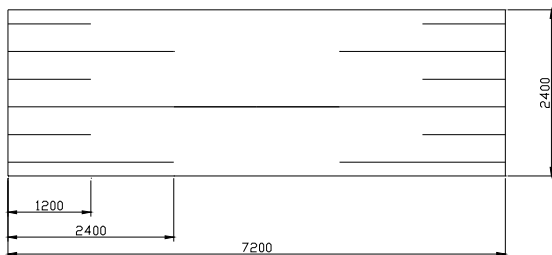


Fig. 8.7. Bovenkant met verdeling perfobonds over het paneel

Frequentiegedrag

Een vloer voldoet altijd aan de trillingseisen als de massa van de permanente en momentane belasting meer dan 5 kN/m² bedraagt; Ref [32]. Variant 1a voldoet aan deze eis. Variant 1b voldoet niet aan deze eis. Indien de massa van de vloer onder deze eis zit, dan moet de eigenfrequentie van de vloer worden bepaald. Volgens NEN 6702 moet deze boven de 3 Hz. zitten. Deze eigenfrequentie kan als volgt berekend worden; Ref. [32]:

$$f_e = \sqrt{\frac{a}{\delta}}, \text{ waarin}$$

- a = getalswaarde trillingsversnelling van de constructie in m. Te bepalen met Fig. 35 uit NEN 6702. Voor een vrij opgelegde vloer wordt a 0,415 m/s²
- δ = Maximale doorbuiging bij momentane belasting.

Uit de eis dat de eigenfrequentie boven de 3 Hz moet zitten, volgt dat de vloer altijd voldoet aan de trillingseis, als de doorbuiging minder dan 34 mm bedraagt. De vloer voldoet aan deze eis.

De eis in NEN 6702 is ontwikkeld voor zwaardere vloeren. Bij de staalframebouw methode is op basis van gebruikerservaringen een strengere eis ontwikkeld. De eis geldt daar dat de eigenfrequentie meer dan 8 Hz moet bedragen. Deze eigenfrequentie wordt als volgt berekend; Ref. [33]:

$$f_e = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}, \text{ waarin}$$

- EI_x = plaatstijfheid = 1,44 × 10⁷ Nm²;
 l = overspanning
 μ = eigen gewicht per m² = 250 kg/m²

$$f_e = \frac{\pi}{2 \cdot 7,2^2} \cdot \sqrt{\frac{1,45 \cdot 10^7}{250}} = 7,3 \text{ Hz}$$

De vloer voldoet net niet aan deze strengere eis voor het frequentie gedrag, maar zit ruim boven de eis van de NEN norm van 3 Hz.

8.1.3 Constructiehoogte en massa

Constructiehoogte

De Bollenplaatvloer heeft bij een overspanning van 7,2 m een constructiehoogte van 1/30 maal de overspanning. De breedplaat vloer en de staalplaat-betenvloer zit hier boven met een constructiehoogte 1/25 maal de overspanning. De I-core variant 1b heeft bij een overspanning van 7,2 m een constructiehoogte van 1/30 maal de overspanning. en de I-core variant 1a zit eronder met een constructiehoogte van 1/35 maal de overspanning.

Massa van het prefab paneel

De staalplaat betenvloer heeft de laagste massa per m², ca. 20 kg/m². De beide I-core varianten zitten hier boven met een massa van ca. 50 kg/m². De massa van het prefab element van de breedplaatvloer en de bollenplaatvloer is afhankelijk van de dikte van het element. De massa is minimaal 120 kg/m² bij de breedplaatvloer en minimaal 144 kg/m² bij de bollenplaatvloer. De dikte van de onderschil heeft invloed op de brandwerendheid en de minimale stempelafstand.

Totale massa

De totale massa van de breedplaatvloer is het hoogste, 672 kg/m². De Bollenplaatvloer, de staalplaat betenvloer en I-core variant 1a verschillen weinig qua massa. Alle drie zitten ze zo rond de 350 kg/m². I-core variant 1b is duidelijk de lichtste variant, ca. 240 kg/m².

8.1.4 Overige aspecten

Gedrag bij brand

De breedplaatvloer en de bollenplaatvloer hebben een goed brandwerend gedrag door het hoge warmte absorberend vermogen van de betonlaag. Bij het toepassen van voldoende dekking op de wapening is een brandwerendheid van 120 min. mogelijk. De staalplaat betonvloer heeft ook een goed brandwerend gedrag. Brandwerendheid van 90 min. is eenvoudig haalbaar.

Als we het brandgedrag van de I-core elementen inschatten, dan zal het brandgedrag van deze elementen minder zijn, met name die van variant 1b door de dunnere betonlaag en het daarbij behorende lagere absorberende vermogen. Door de overcapaciteit van het I-core paneel in combinatie met extra wapening, is een hoge brandwerendheid mogelijk. Mogelijke extra maatregel is de onderkant van de vloer brandwerend te bekleden of te brandwerend te bespuiten.

Geluidwerend gedrag

De vloeren voldoen aan de eis van lucht- en contact isolatie voor kantoren door zijn totale massa en de dikte van de betonlaag. Massawet: $R_{500} = 17,5 \cdot \log m + 3$; Ref. [38]. Een betonvloer van 80mm dik heeft dan een isolatie van 43dB. De eis voor kantoren is 40 dB.

Flexibiliteit van de Leidingen

Bij de breedplaatvloer, de bollenplaatvloer en de staalplaatbetonvloer worden de leidingen aan de bovenzijde ingestort en zijn achteraf niet bereikbaar.

Bij I-core variant 1a, kunnen de leidingen aan de bovenzijde worden ingestort. Kleine leidingen tot rond 50 mm kunnen ook aan de onderzijde in het I-core paneel geplaatst worden en blijven ook achteraf bereikbaar. Bij I-core variant 1b kunnen kleine leidingen aan de bovenkant ingestort worden in het beton. Grote (en kleine) leidingen, zoals de riolering kunnen in het I-core paneel worden opgenomen.

Uitvoering

Bij alle bestaande varianten wordt eerst de onderstempeling aangebracht, vervolgens het prefab paneel ingehesen en geplaatst, de wapening en de bekisting gesteld en vervolgens de betonvloer gestort. Het voordeel van de breedplaat is dat het stellen van de wapening door de tralieliggers eenvoudiger is. Dit geldt nog meer voor de bollenplaatvloer, die met bovenwapening en al wordt aangeleverd. Het voordeel van de staalplaat betonvloer is de lage massa van de staalplaten.

Het grote voordeel van de I-core panelen is dat deze niet onderstempeld hoeft te worden. Ook is de massa van het onderpaneel laag vergeleken met de breedplaat- en de bollenplaatvloer.

Sparingen

Bij de bestaande varianten worden sparings aangebracht door blokken cellenbeton of polystyreen mee in te storten. Achteraf worden de sparings dan in de onderschil uitgeboord. Bij grotere gaten wordt extra raveelwapening aangebracht.

Bij de I-core panelen worden kleine sparings uitgeboord. De grote van deze sparings is afhankelijk van de lijfstanden. Voor grotere sparings wordt van tevoren extra raveling aangebracht en kunnen vervolgens ook geboord worden. Centraaldozen zijn in beide varianten aan te brengen.

Raveling

Bij grote sparings, bijvoorbeeld voor trapgaten is raveling nodig. Bij staalplaat betonvloeren wordt deze raveling tot stand gebracht door een betonnen balk in te storten. De bollenplaatvloer en de breedplaatvloer passen extra wapening toe.

Bij I-core variant 1a, extra wapening aanbrengen. Bij I-core variant 1b raveling tussen de panelen aanbrengen.

Afwerking

De I-core elementen kunnen voegloos tegen elkaar aangelegd worden in lengterichting. Bij de overige varianten is een kleine voeg aan de onderzijde zichtbaar. Alle vloeren hebben een vlakke afwerking aan de bovenzijde.

Scheurvorming bij steunpunten

Bij statisch onbepaalde liggers, die over meerdere velden doorlopen, kan door toepassen van extra wapening kan bij alle varianten grote scheurvorming voorkomen worden.

Opname steunpuntsmomenten

Bij alle varianten is het opnemen van steunpuntsmomenten mogelijk. Bij de I-core varianten, vooral bij variant 1b, moet op plooi van de onderflens gelet worden. Deze moet eventueel zwaarder uitgevoerd worden.

Overspanningsbereik

De beide varianten zijn geschikt voor overspanningen vanaf ca. 6 m. Voor overspanningen tot 6 m, zijn de I-core panelen relatief zwaar en kan er beter voor een staalplaatbetonvloer worden gekozen. Qua grotere overspanningen kan variant 1a, met zeeg ongeveer worden toegepast tot 10 m. Daarna wordt het effect van de zeeg kleiner, omdat de max. zeeg 150 mm is, anders worden de spanningen te hoog. Variant 1b kan makkelijk 16 m overspannen door het kiezen van een steeds hoger paneel. Om plooi tegen te gaan kan er beter onderstempeld worden bij grotere overspanningen.

8.2 Variant 2, variant op kanaalplaatvloer

Dit I-core paneel valt binnen de categorie prefab vloersystemen. Het traditionele vloertype in deze categorie is de kanaalplaatvloer. Al bestaande varianten op deze vloer zijn de leidingenvloer van VBI en de Wingvloer van Betonson. De leidingenvloer van VBI richt zich specifiek op de woningbouw, daarom wordt de I-core variant vergeleken met de kanaalplaatvloer en de Wingvloer van Betonson.

8.2.1 Constructief gedrag

Deze vloer bestaat uit een I-core paneel met daarop een dunne afwerklaag; zie Fig. 8.8. De leidingen moeten in hun geheel in het paneel verwerkt worden. Door de grootte van de sparingen in het I-core paneel is het aanbrengen van mechanische ventilatie in het paneel zelf mogelijk.

De vloer is in Bijlage A3 constructief berekend en de afmetingen van deze vloer zijn geoptimaliseerd om de massa zo laag mogelijk te houden. De belangrijkste uitkomsten van de berekening worden in deze paragraaf gepubliceerd.

Berekende afmetingen:

Dikte onderflens:	2 mm
Dikte bovenflens:	3,5 mm
Lijfdikte:	3 mm
Betonhoogte:	30 mm
Paneelhoogte:	200 mm
Lijfafstand:	240 mm
Totaal traagheidsmoment:	$5,52 \times 10^7 \text{ mm}^4$

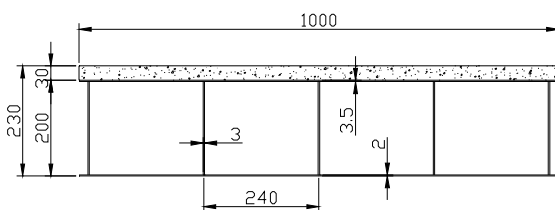


Fig. 8.8 Doorsnede variant 2

De bovenflens van de ligger is gecontroleerd op plooiën. Voor de optredende spanningen zie Tabel 8.1.

	UGT
Spanning onderflens (N/mm ²)	123
Spanning bovenflens (N/mm ²)	85

Tabel 8.4 Optredende spanningen

De einddoorbuiging is 20 mm. De eis voor de maximale doorbuiging is 29 mm.

Frequentiegedrag

Een vloer voldoet altijd aan de trillingseisen als de massa van de permanente en momentane belasting meer dan 5 kN/m²; bedraagt Ref [32]. Indien de massa van de vloer onder deze eis zit, dan moet de eigenfrequentie van de vloer worden bepaald. Volgens NEN 6702 moet deze boven de 3 Hz. zitten. Een vloer voldoet aan deze norm als de doorbuiging onder de 34mm zit. De vloer voldoet bij een overspanning van 7,2m aan deze doorbuigingseis.

De eis in NEN 6702 is ontwikkeld voor zwaardere vloeren. Bij de staalframebouw methode is op basis van gebruikerservaringen een strengere eis ontwikkeld. De eis geldt daar dat de eigenfrequentie meer dan 8 Hz moet bedragen. Deze eigenfrequentie wordt als volgt berekend; Ref. [33]:

$$f_e = \frac{\pi}{2 \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI_x}{\mu}}, \text{ waarin}$$

EI_x = plaatstijfheid = $1,16 \times 10^7 \text{ Nm}^2$;
 l = overspanning = 7,2m
 μ = eigen gewicht per m² = 120 kg/m²

$$f_e = \frac{\pi}{2 \cdot 7,2^2} \cdot \sqrt{\frac{1,16 \cdot 10^7}{120}} = 9,4 \text{ Hz}$$

De vloer voldoet aan deze strengere eis voor het frequentie gedrag.

8.2.1 Afmetingen en massa

Constructiehoogte

De kanaalplaatvloer heeft met een afwerklaag van 30 mm een slankheid van 1/40 bij een overspanning van 7,2m. De I-core variant en de wingvloer zijn iets minder slank en hebben een slankheid van 1/30.

Massa prefab paneel

De kanaalplaatvloer weegt ca. 260 kg/m² en de Wingvloer 225 kg/m². De I-core vloer zit hier ver onder met een massa van 60 kg/m². Bij alle vloeren komt de massa van de afwerklaag (60 kg/m²) daar nog bij.

8.2.3 Overige aspecten

Brandwerendheid

De kanaalplaatvloer heeft een brandwerendheid van 60 min. Door te kiezen voor overcapaciteit kan de brandwerendheid tot 90 min. verhoogd worden.

De Wingvloer heeft een standaard brandwerendheid van 60 min. Een brandwerendheid van 90 en van 120 min. behoort ook tot de mogelijkheden.

Wil het I-core paneel aan dezelfde eisen voldoen, dan zal het waarschijnlijk brandwerend bekleed moeten worden.

Geluid

Kanaalplaatvloer en Wingvloer voldoen door hun massa aan de eis van lucht- en contactgeluidisolatie voor kantoren.

Bij de I-core variant zullen mogelijk extra voorzieningen zoals een zwevende dekvloer moeten worden aangebracht.

Flexibiliteit van de leidingen

Bij de kanaalplaatvloer kunnen kleine leidingen in de afwerkvloer meegestort worden. Grote leidingen komen onder of boven de vloer en zorgen voor extra constructiehoogte.

Bij de wingvloer worden de leidingen van boven aangebracht in de sparingen en blijven achteraf bereikbaar, mits de sparingen niet dichtgestort worden.

Bij de I-core variant worden de leidingen aan de onderkant aangebracht en zijn achteraf bereikbaar. Kleine leidingen kunnen eventueel in de afwerklaag worden ingestort.

Uitvoering

Elementen worden neergelegd en vervolgens wordt de afwerklaag gestort. De sparingen in de Wing-vloer moeten eerst nog worden gedicht.

Sparingen

Bij de Wingvloer en de Kanaalplaatvloer worden sparingen fabrieksmatig aangebracht. Bij de I-core vloer kunnen kleine sparingen (<150mm) in het werk worden uitgeboord tussen de lijven. Grotere sparingen moeten fabrieksmatig worden aangebracht.

Raveling

Raveling kan bij alle drie de varianten tot stand worden gebracht door het opnemen van raveelijzers.

Doorloping over steunpunten

Bij alle varianten ontstaat scheurvorming boven doorlopende steunpunten door de dunne afwerklaag.

Doorlopende ligger

Kanaalplaatvloer en wingvloer worden niet als doorlopend over meerdere steunpunten uitgevoerd. De I-core variant is hier, door de scheurvorming boven de steunpunten ook niet geschikt voor.

Afwerking

Bij de kanaalplaatvloer en de wingvloer is er een velling kant aan de onderzijde. Het I-core paneel is glad aan de onderzijde. Alle varianten hebben een gladde afwerkvloer aan de bovenzijde.

Overspanningsbereik

De I-core variant heeft een overspanningsbereik gelijk aan de kanaalplaatvloer. Bij grotere overspanningen gaat de plooi van de bovenflens domineren. De massa van het paneel zal daardoor steeds meer toenemen.

De vloer voldoet aan deze strengere eis voor het frequentie gedrag.

8.3.2 Constructiehoogte en massa

Constructiehoogte

De constructiehoogte is afhankelijk van het type ligger dat er gebruikt wordt (IPE of HEA). Als we uitgaan van IPE-liggers dan heeft de Infra+-vloer een slankheid van 1/20 en de I-core variant een slankheid van 1/25. Toepassing van HEA-profielen verhoogt de slankheid.

Massa prefab paneel

De massa van de Infra+-vloer is ca. 195 kg/m² (168 kg/m² beton en ca. 25 kg/m² staalprofielen) De I-core variant is een stuk lichter, 40 kg/m² (20 kg/m² I-core paneel en 20 kg/m² IPE-profielen).

Totale massa

De totale massa is afhankelijk van de gekozen dekvloer. Bij een Anhydriet vloer komt er nog zo'n 100 kg/m² bij, zodat de totale massa van de Infra+-vloer op 300 kg/m² komt en de I-core variant op 140 kg/m².

Raveling

Infra+-vloer: Raveelconstructie wordt in de vloerplaat opgenomen.

Raveling wordt tussen de IPE-profielen opgenomen.

Doorloping steunpunten

Scheurvorming doordat geen wapening is aangebracht in de topvloer.

Doorlopende ligger

Infra+-ligger is daar niet geschikt voor. I-core variant ook niet, tenzij de dekvloer constructief meewerkt. .

Afwerking

Vellingkant aan de onderzijde bij de Infra+-vloer.

De I-core variant is glad aan de onderzijde.

Overspanningsbereik

De vloer heeft een overspanningsbereik vanaf 7m.

8.3.3 Overige aspecten

Brandwerendheid

De Infra+-vloer is getest op brandwerend gedrag en heeft een brandwerendheid van meer dan 140 min. Doordat bij de I-core variant de onderschil van staal is i.p.v. beton zal het brandgedrag minder zijn. Om dit te verbeteren kan het onderpaneel brandwerend bekleed en/of gevuld worden.

Geluid

Door het dubbelwandige systeem heeft de Infra+-vloer goed geluidswerend gedrag. Dit geldt ook voor de I-core variant. Het I-core paneel kan eventueel met geluidwerend materiaal gevuld worden.

Leidingen

Leidingen worden aan de bovenkant aangebracht en zijn afhankelijk van de gekozen topvloer achteraf goed bereikbaar.

Uitvoering

Vloer wordt neergelegd, leidingwerk wordt aangebracht en vervolgens de zwaluwstaartplaten erop genageld en de afwerkvloer gestort.

Sparingen

Bij de Infra+-vloer worden sparingen fabrieksmatig in de betonnen schil aangebracht.

Bij de I-core variant zijn sparingen tussen de IPE-profielen mogelijk en in het werk te maken.

Eigenschap	Breedplaat- vloer	Bollenplaat- vloer	Staalplaat- Betonvloer	I-core variant 1a	I-core varinat 1b	Kanaal- plaatvloer	Wing- vloer	I-core variant 2	Infra+- vloer	I-core variant 3
Totale constructiehoogte	- 280 mm	+/- 240 mm	- 300 mm	+ 200 mm	+/- 230 mm	+ 180 mm	+/- 210 mm	+/- 230 mm	- 320 mm	- 300 mm
Massa prefab paneel per m ²	+/- 120 kg/m ²	- 144 kg/m ²	++ 20 kg/m ²	+ 50 kg/m ²	+ 50 kg/m ²	- 260 kg/m ²	- 225 kg/m ²	+ 60 kg/m ²	- 200 kg/m ²	+ 40 kg/m ²
Totale massa per m ²	-- 670 kg/m ²	- 350 kg/m ²	- 350 kg/m ²	- 350 kg/m ²	+ 240 kg/m ²	- 320 kg/m ²	+/- 285 kg/m ²	++ 120 kg/m ²	+/- 300 kg/m ²	++ 140 kg/m ²
Gedrag bij brand	++	++	+	+	+/-	+	+	-	+	+/-
Geluidwerendheid	++	+	+	+	+/-	+	+	-	+	+/-
Flexibiliteit van de leidingen	++	++	++	+/-	+/-	-	+/-	+/-	+/-	+
Bereikbaarheid Leidingen achteraf	-	-	-	+/-	+	-	+/-	+	++	++
Uitvoering	--	--	-	+	+	+/-	+/-	++	+	+
Sparingen vooraf	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Sparingen achteraf	-	--	-	-	+/-	-	-	+	+	+
Raveling	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Afwerking	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Scheurvorming bij Steunpunten	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Opname steunpunts- momenten	++	++	++	+	+/-	-	-	+/-	+/-	+/-

Tabel 8.5. Vergelijking van de verschillende vloervarianten op de belangrijkste ontwerpaspecten

8.4 Conclusies en aanbevelingen

Bekijken we de uitwerkingen van de varianten dan is de belangrijkste conclusie dat alle varianten mogelijk zijn. Niet alle varianten zijn even concurrerend t.o.v. de bestaande vloervarianten. Om de vloer op de markt te brengen moet met het meest concurrerende type begonnen worden. Dit is Variant 1b om de volgende redenen:

I-core variant 2, de concurrent van de kanaalplaatvloer, is vooral door zijn dunne betonlaag op punten van brandveiligheid en geluidswerendheid minder dan de andere varianten.

Variant 3, de concurrent van de Infra+vloer scoort op verschillende punten beter dan de Infra+-vloer. Het nadeel van deze variant is, dat de Infra+-vloer nog relatief onbekend is en dat de constructieve eigenschappen van het I-core paneel niet volledig benut worden, daar deze alleen als onderflens van de IPE-profielen dient.

De varianten op de halfgeprefabriceerde vloeren zijn de beste concurrenten. Variant 1b is een betere variant dan variant 1a. Dit om de volgende redenen.

- Constructiehoogte van variant 1b is hoger dan 1a, maar gelijk of lager aan die van de bestaande vloeren, zoals de Bollenplaatvloer.
- Bij variant 1a treden er grote spanningen op door de zeeg. Hierdoor is het paneel tijdens de uitvoeringsfase nog gevoeliger voor plooi.
- De schuifspanningen zijn lager bij variant 1b, hierdoor zijn er minder Perfo-bond strips nodig.
- Variant 1b is stijver dan variant 1a. Hierdoor is de bijkomende doorbuiging kleiner.
- Bij variant 1a kunnen er grotere leidingen in het paneel zelf verwerkt worden, waardoor ze achteraf nog bereikbaar zijn.

Aspecten die nog verder onderzocht moeten worden zijn o.a. het de maximaal mogelijke grootte van sparingen in het paneel i.v.m. doorvoeren van leidingen. Ook het gedag van de vloer bij een inklemming of als de vloer over meerdere steunpunten doorloopt moet nog nader onderzocht worden.

9 Ontwerp gevelvarianten

In H6 zijn verschillende betonnen gevelsystemen besproken. In dit hoofdstuk plaatsen we tegenover deze systemen een variant met een stalen I-core paneel. De elementen worden net als in H6 onderscheiden in dragende- en niet dragende elementen en in borstwerings- en wandelementen. Er wordt gekeken naar de krachtafdracht, de verbindingen en naar andere aspecten zoals de montage en het transport. In een aparte paragraaf wordt nog kort ingegaan op de mogelijkheden om de buitenbekleding aan het I-core paneel te bevestigen.

9.1 Niet-dragend borstweringselement

Borstweringselementen zijn elementen van ca. 1,5m hoog die aan de kolommen worden opgehangen; zie Fig. 9.1. Tussen deze borstweringselementen worden de raamelementen geplaatst. Dit zorgt voor een grote ontwerpvrijheid.

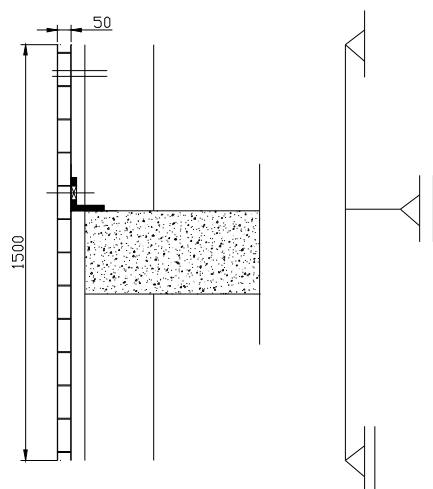


Fig. 9.1. Niet dragend borstweringselement;
Links: doorsnede; Rechts: mechanisch schema

De belastingen op dit element zijn vrij laag. Het voordeel t.o.v. betonnen elementen zal liggen op het veel lagere eigen gewicht van de I-core panelen. In dit hoofdstuk wordt gekeken hoe de belastingen worden afgedragen en hoe de elementen met de draagconstructie worden verbonden. Dit wordt vergeleken met een betonnen borstweringselement.

9.1.1 Krachtsafdracht

Het element wordt opgehangen aan de kolommen en alleen in horizontale richting gekoppeld aan de vloer, zie het mechanisch schema in Fig. 9.1. Door deze koppeling kunnen de vloer en het gevelelement vrij van elkaar bewegen.

Het element moet het eigen gewicht; zie Fig. 9.2 (I-core paneel en bekleding) en de windbelasting; zie Fig. 9.3 afdragen aan de draagconstructie. Het eigen gewicht wordt via een verbinding tussen het I-core paneel en de kolommen afgedragen. De windbelasting wordt voornamelijk via buiging aan de vloer afgedragen. De krachtsafdracht bij een betonnen borstwerings-element verloopt op dezelfde manier.

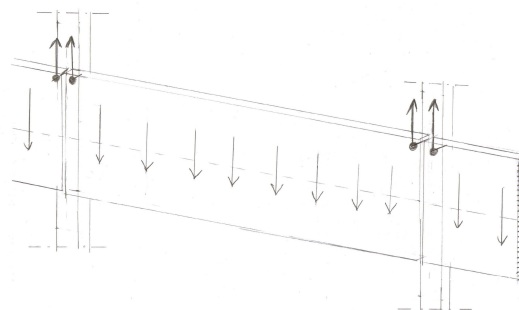


Fig. 9.2. Krachtsafdracht van de verticale belasting

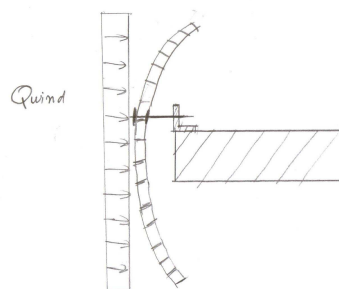


Fig. 9.3. Krachtsafdracht van de windbelasting

Orde van grootte van de krachten

Bij het bepalen van de grootte van de krachten wordt uitgegaan van een buitenbekleding met het maximale gewicht van 100 kg/m^2 . Hierdoor is een bekleding met bijvoorbeeld natuursteen mogelijk.

Er wordt uitgegaan van een paneel van 1,5 bij 7,2 m. Per verbinding wordt er dan $5,4 \text{ m}^2$ gevel aan de kolom afgedragen.

Totale verticale belasting:	
Paneel:	$35 \text{ kg/m}^2 \times 5,4 \text{ m}^2 = 1.89 \text{ kN}$
Gevel:	$100 \text{ kg/m}^2 \times 12 \text{ m}^2 = 12 \text{ kN}$
Totaal:	14 kN
Rekenwaarde:	$1,2 \times 14 \text{ kN} = 17 \text{ kN}$

Doordat de belasting excentrisch aangrijpt ontstaat er een extra moment. Dit moment kan door de kolom of door het I-core element worden opgenomen. Zie Par. 9.1.2. voor de uitwerking van deze verbinding.

Windbelasting:

Voor de rekenwaarde van de windbelasting wordt uitgegaan van $1,5 \text{ kN/m}^2$. De raamelementen, met een totale hoogte van 1,7 meter, zullen hun windbelasting op de borstweringselementen afdragen. Dit zorgt voor een extra lijnbelasting van: $1,5 \text{ kN/m}^2 \times 0,85 \text{ m} = 1,3 \text{ kN/m}$.

Opname windbelasting

Op de onderste helft van het I-core paneel zal de meeste windbelasting aangrijpen. De lengte van dit deel is ongeveer 1m. Dit gedeelte kan als volgt geschematiseerd worden; zie Fig. 9.4.

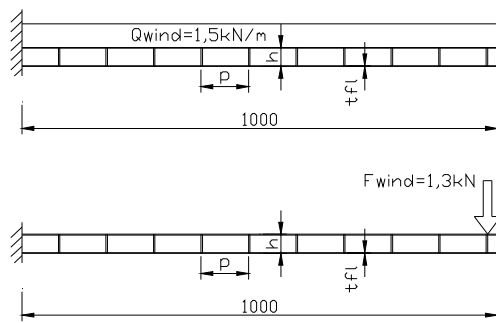


Fig. 9.4. Boven: afdracht directe windbelasting op paneel
Onder: afdracht windbelasting uit raamelementen

Bij dit type ligger is de vervorming door afschuiving vaak maatgevend; zie Ref. [36]. De ligger wordt als een afschuifligger berekend en vermenigvuldigt met een factor Q, die het aandeel van de buigvervorming in de totale vervorming meeneemt. In H4 is ingegaan op onderzoek dat verricht is naar het afschuifgedrag van een I-core ligger. De conclusies uit dat onderzoek waren dat een I-core ligger zich vooral als een afschuifligger gedraagt bij een niet te grootte verhouding tussen het lijf en de flens en bij een grotere verhouding tussen de lijfstand (p) en de hoogte van het profiel. De I-core liggers in dit hoofdstuk hebben deze eigenschappen, waardoor ze als een afschuifligger berekend kunnen worden.

Berekening doorbuiging t.g.v. de windbelasting

Algemene gegevens:

Lijfstand h.o.h.:	$p = \text{variabel}$
Profielhoogte:	$h = \text{variabel}$
Flensdikte:	$t_f = \text{variabel}$
Dikte lijf:	$t_l = 3 \text{ mm}$
Belasting:	$q_d = 1,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}, q_{rep} = 1,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$ $F_d = 1,3 \text{ kN}, F_{rep} = 0,9 \text{ kN}$
E-modulus:	$E = 2,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Lengte ligger:	$l = 1,0 \text{ m}$

Traagheidsmomenten:

$$\text{Traagheidsmoment flens: } I_{flens} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot t_f^3$$

$$\text{Traagheidsmoment lijf: } I_{lijf} = \frac{1}{12} \cdot b \cdot t_l^3$$

Stel dat de lijven van het I-core paneel als oneindig stijf worden beschouwd; zie Fig. 9.5.

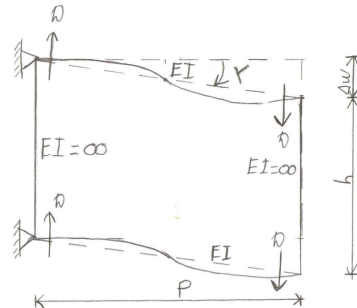


Fig. 9.5. Raamwerk met oneindig stijve lijven

De dwarskracht voor twee flenzen wordt dan:

$$D = \frac{24 \cdot EI}{p^3} \cdot \Delta w \text{ en } \gamma = \frac{\Delta w}{p},$$

hieruit volgt:

$$D = GA \cdot \gamma = \frac{24 \cdot EI}{p^2} \cdot \gamma, \quad GA = \frac{24EI}{p^2}.$$

In werkelijkheid zijn de lijven niet oneindig stijf. Wordt dit in de berekening meegenomen, dan wordt de afschuifstijfheid:

$$GA = \frac{24}{p^2 \cdot \left(\frac{1}{EI_{flens}} + \frac{1}{EI_{lijf}} \right)}$$

Differentiaalvergelijking voor afschuiving:

$$q_d = -GA \cdot \frac{d^2 w}{dx^2}$$

Hieruit volgt voor de dwarskracht:

$$D = GA \cdot \gamma = GA \cdot \frac{dw}{dx} = -q \cdot x + C_1$$

Na eenmaal integreren wordt de verplaatsing:

$$w = \frac{-\frac{1}{2} \cdot q_{rep} \cdot x^2}{GA} + \frac{C_1 \cdot x}{GA} + C_2$$

C_1 en C_2 kunnen door de randvoorwaarden worden bepaald:

Voor de q-belasting geldt:

- Randvoorwaarde 1: Voor $x(0)$ geldt: $x = 0$ en $w = 0$, hieruit volgt: $C_2 = 0$
- Randvoorwaarde 2: Voor $x(l)$ geldt: $D = 0$, waaruit volgt: $C_1 = q \cdot l$

De maximale verplaatsing is bij $x = l$:

$$w = \frac{-\frac{1}{2} \cdot q_{rep} \cdot l^2}{GA} + \frac{q_{rep} \cdot l^2}{GA} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_{rep} \cdot l^2}{GA}$$

1^e afgeleide bij $x = l$:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{-q_d \cdot x}{GA} + \frac{C_1}{GA} = \frac{q_d \cdot l}{GA}$$

Maximaal moment in de flenzen:

$$M = \frac{1}{2} \cdot D \cdot \frac{1}{2} \cdot h = \frac{1}{4} \cdot GA \cdot h \cdot \frac{dw}{dx}$$

Weerstandsmoment flens:

$$W = \frac{I_{fl}}{\frac{1}{2} \cdot t_{fl}}$$

Buigspanning in flens:

$$\sigma_m = \frac{M}{W_{fl}}$$

Normaalkracht in de flenzen; Fig. 9.6

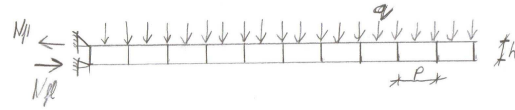


Fig. 9.6. Normaalkracht in de flenzen

$$N_{fl} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_d \cdot l^2}{h}$$

Normaalspanning in de flenzen:

$$\sigma_n = \frac{N_{fl}}{b \cdot t_{fl}}$$

Voor de punt-belasting geldt:

- Randvoorwaarde 1: Voor $x(0)$ geldt: $x = 0$ en $w = 0$, hieruit volgt: $C_2 = 0$
- Randvoorwaarde 2: Voor $x(l)$ geldt: $D = 0$, waaruit volgt: $C_1 = F$

De maximale verplaatsing is bij $x = l$:

$$w = \frac{F_{rep} \cdot l}{GA}$$

1^e afgeleide bij $x = l$:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{F_d}{GA}$$

Maximaal moment in de flenzen:

$$M = \frac{1}{4} \cdot GA \cdot h \cdot \frac{dw}{dx} = \frac{1}{4} \cdot h \cdot F_d$$

Weerstandsmoment flens:

$$W = \frac{I_{fl}}{\frac{1}{2} \cdot t_{fl}}$$

Buigspanning in flens:

$$\sigma_m = \frac{M}{W_{fl}}$$

Normaalkracht in de flenzen:

$$N_{fl} = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_d \cdot l^2}{h}$$

Normaalspanning in de flenzen:

$$\sigma_n = \frac{N_{fl}}{b \cdot t_{fl}}$$

Bovenop de vervorming door afschuiving komt ook nog vervorming door buiging. Deze vervorming kan met de volgende formule worden geschat:

$$Q = \frac{\left(\frac{l}{h}\right)^2}{\left(\frac{p}{t_{fl}}\right)^2},$$

de maximale doorbuiging wordt dan:

$$w_{tot} = w \cdot (Q + 1)$$

De massa van het profiel wordt dan per kg/m²:

$$G = \rho_s \cdot \left(2 \cdot t_{fl} + \frac{t_l \cdot [h - 2 \cdot t_{fl}]}{p} \right)$$

Analyse:

h, p en d worden gevarieerd en het effect op de afschuifstijfheid (GA), de spanningen, de doorbuiging en het percentage vervorming door buiging worden geanalyseerd; zie Tabel 9.1.

h	P	d	GA	σ_m	σ_n	w	Q	G
40	80	1,5	197	75	34	9	0,22	34
40	80	2	405	42	26	5	0,39	42
40	120	1,5	88	75	34	19	0,10	31
40	120	2	180	42	26	10	0,17	39
60	80	1,5	197	112	23	8	0,10	40
60	80	2	405	63	17	4	0,17	48
60	120	1,5	88	112	23	18	0,04	35
60	120	2	180	63	17	9	0,08	42

Tabel 9.1. Analyse berekeningsresultaten

Conclusies:

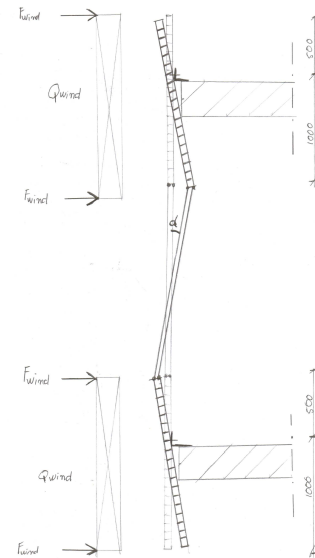
- Dikkere buitenplaat heeft grote invloed op zowel de spanningen als de doorbuiging.
- Hoger profiel heeft weinig invloed op doorbuiging, maar veroorzaakt wel hogere spanningen.
- Vergroting van de lijfstand heeft alleen invloed op doorbuiging, die wordt er groter door.

De conclusies uit H 4.2 zien we in dit gedrag weer terugkomen. Hoe kleiner de waarden uit de kolom Q, hoe meer de ligger zich als een afschuifligger gedraagt. Dit is het geval bij een grote verhouding tussen p en h. Hoe dikker de flenzen, hoe meer de ligger zich als een buigligger gaat gedrag.

De buitenbekleding en het raamelement moeten de vervormingen op kunnen nemen. We stellen daarom de eis dat de maximale doorbuiging 10 mm mag zijn. Dit is de totale verplaatsing door de doorbuiging en de rotatie; zie Fig. 9.7. We berekenen nu eerst de rotatie.

Berekening rotatie

Door de niet symmetrische aangrijping van de krachten zal het element gaan roteren. Dit effect is het grootst in het midden tussen twee kolommen, want deze rotatie wordt door de kolommen verhinderd, doordat het element wordt vastgemaakt aan de kolommen. Door deze rotatie zullen ook de raamelementen onder een hoek komen te staan. Zie Fig. 9.7.



Figuur 9.7. Rotatie van het I-core paneel

Berekening rotatie

Door de excentrische aangrijping van de windbelasting ontstaat er een moment op het I-core paneel welke een rotatie veroorzaakt. De grootte van dit moment per meter is:

$$M_w = F_{wind} \cdot 0,5m + Q_{wind} \cdot 1,5m \cdot 0,25m$$

$$M_w = 1,3kN \cdot 0,5m + 1,5kN/m \cdot 1,5m \cdot 0,25m = 0,37kNm/m$$

Dit moment wordt door de torsieweerstand van het paneel opgenomen. Het totale torsie moment wordt:

$$M_t = \frac{1}{2} \cdot 0,37 \cdot 7,2 = 1,33kNm ; \text{Zie Fig. 9.8.}$$

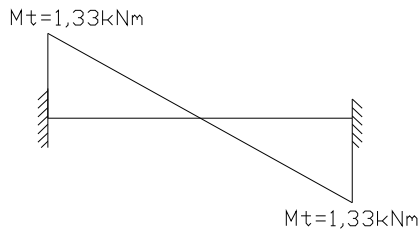


Fig. 9.8. Wringende momentenlijn

De doorsnede kan berekend worden als een dunwandig profiel.

Schuifspanning t.g.v. het wringend moment:

Doordat de wind een gelijkmatig verdeelde belasting is wordt er van uitgegaan dat alle “buizen” meewerken wordt het wringend moment per buis (h.o.h. afstand p tussen twee lijven): $M_t = \frac{1,33 \text{ kNm}}{1,5 \text{ m}} \cdot p$.

Afschuifmodulus: $G = 81 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Paneelhoogte: $h = \text{var iabel}$

Lijfstand: $p = \text{var iabel}$

Flensdikte: $t_f = \text{var iabel}$

Lijfdikte: $t_l = 3 \text{ mm}$

Lengte I-core ligger: $l = 7,2 \text{ m}$

Oppervlakte binnen hartlijnen doorsnede:

$$A_m = (h - t_f) \cdot (p - t_l)$$

Spanning t.g.v. het wringend moment: $\tau = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t_f}$

Wringstijfheid: $I_t = \frac{4 \cdot A_m^2}{2 \cdot \frac{h - t_f}{t_f} + 2 \cdot \frac{p - t_l}{t_l}}$

Afschuifhoek: $\varphi = \frac{M_t \cdot \frac{1}{2} l}{G \cdot I_t}$

Verplaatsing: $u = \varphi \cdot 1,0 \text{ m}$

De berekening wordt met de verschillende variabelen diverse malen uitgevoerd. De uitkomsten daarvan staan in Tabel 9.2

h (mm)	p (mm)	t (mm)	τ (N/mm ²)	u (mm)
40	80	1.5	8,0	9,2
40	80	2	6,1	8,2
40	120	1.5	7,9	7,5
40	120	2	6,0	6,9
60	80	1.5	5,2	5,0
60	80	2	4,0	4,3
60	120	1.5	5,2	3,9
60	120	2	3,9	3,5

Tabel 9.2. Analyse berekening

Conclusies:

- Optredende spanningen door de torsie zijn te verwaarlozen
- De hoogte van het profiel heeft de meeste invloed op de vervorming
- Een grotere lijfstand leidt tot een kleinere vervorming.

Combineren we de resultaten uit Tabel 9.1 en Tabel 9.2, dan komen we uit bij een max. verplaatsing van 10mm op het volgende profiel

60-80-2 (hoogte-lijfstand-flensdikte)
 $G = 48 \text{ kg/m}^2$.

Torsievrij paneel

Een andere mogelijkheid is om het paneel in het midden van de vloer in horizontale richting te ondersteunen, zodat de windbelasting centrisc an grijpt. Het nadeel van deze oplossing is, dat het in de uitvoeringsfase moeilijker is, om de verbinding in het midden van de vloer te maken, dan om de verbinding op vloer te maken. De uitvoerder kan zelf beslissen voor welke oplossing hij kiest. We voeren de berekening nogmaals uit voor deze centrisc belasting. De lengte van de ligger is dan 0,75 m. We rekenen met een lengte van 0,8 m.

h	P	d	GA	σ_m	σ_n	w	Q	G
40	60	1,0	113	162	42	11	0,11	31
40	60	1,5	350	72	28	4	0,25	38
40	100	1,5	126	72	28	10	0,09	32
40	140	2,0	132	41	21	9	0,08	38

We kiezen voor het profiel 40 – 60 – 1,5. Dit door het stijve gedrag van dit profiel.

9.1.2 Verbindingen

Verbinding aan kolommen

De gevel wordt aan de kolommen van het gebouw bevestigd. De verbinding tussen gevel en de kolommen kan een eenvoudige dwarskrachtverbinding zijn. Op de kolom wordt een U-profiel vast gemaakt, met daartussen een stalen buis of bout. Op het I-core paneel wordt een stalen strip gelast, met een oog dat over de stalen buis heen valt, zie Fig. 9.9.

De verbinding moet een verticale kracht van 17 kN over kunnen brengen. Door de excentrische aangrijping van deze kracht, ontstaat er ook een moment dat opgenomen moet worden. Dit moment wordt opgenomen door de horizontale krachten uit de verbinding aan de onder- en bovenzijde van het paneel; zie Fig. 9.9.

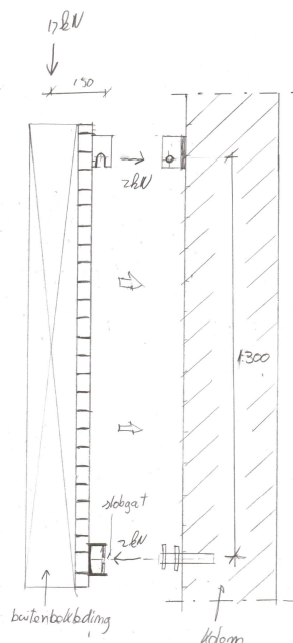


Fig. 9.9. Verbinding met kolom

Opname van de verticale krachten bij de bout:

De verticale kracht van 17 kN + de horizontale kracht van 4,3 kN zijn geen probleem om op te nemen bij de bovenste verbinding: Een M12 bout heeft al een afschuif draagvermogen van:

$$F_v = 0.48 \cdot 800 \frac{N}{mm^2} \cdot 113 mm^2 = 44 kN$$

De horizontale kracht aan de onderzijde van 2 kN, wordt gespreid door een U-profiel en naar het lijf afgedragen, zodat de er geen pons of knik optreedt op de plaats waar de kracht aangrijpt. Wordt de kracht over 100mm van het lijf gespreid, dan wordt de spanning in het lijf:

$$\sigma = \frac{2000 N}{3 mm \cdot 100 mm} = 7 \frac{N}{mm^2}.$$

Bij een dergelijk lage spanning zal het lijf niet gaan knikken.

Betonnen borstweringselementen worden op dezelfde wijze met de kolom verbonden. De momentvaste verbindingen zijn met beton eenvoudiger te maken, doordat ankers ingestort kunnen worden.

Verbindingen tussen twee elementen

De elementen zijn door middel van eenvoudige verbindingstukken aan elkaar te verbinden. Meyer heeft al een aantal oplossingen ontwikkeld. In Fig. 9.10 is een voorbeeld van zo'n verbinding te zien. De verbindingselementen bestaan uit twee hoeklijntjes.

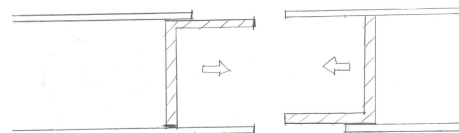


Fig. 9.10. Verbinding tussen 2 I-core elementen

De onderlinge verbinding bij betonnen borstweringselementen vereist minder nauwkeurigheid omdat de elementen veel groter zijn.

9.1.3 Overige eigenschappen

Massa paneel

De massa van het paneel is zo'n 35 kg/m². De massa van een betonnen niet-dragend borstweringselement is 300 kg/m² (dikte element 120mm). Dit element weegt dus bijna 10x zo veel.

Montage

De elementen worden afgeleverd met eventueel buitenbekleding, met de kraan omhoog gehesen en opgehangen aan de kolommen. Vervolgens wordt het paneel vastgebouwd aan de hoeklijnen op de vloer. Tijdens de montage blijft het element in de kraan hangen. De montage van een betonnen borstweringselement werk op een vergelijkbare wijze.

Transport

Door het lage gewicht en de beperkte afmetingen (1,5 × 7,2 m) kunnen de panelen eenvoudig vervoerd worden. Met een belading van 30 ton kunnen ca. 20 elementen inclusief bekleding vervoerd worden.

Door het hoge gewicht van de betonnen borstweringselementen kunnen er van deze elementen maar enkele per vrachtwagen vervoerd worden.

9.2 Niet-dragend wandelement

Dit element bestaat uit een slank I-core paneel; zie Fig. 9.11. Het is een licht wandelement. Niet-dragende wandelementen van beton worden aan de vloeren opgehangen, of ze steunen met nokken op de vloer. Door het lage gewicht van de I-core elementen kunnen de losse elementen worden samengesteld tot één wandelement welke van kolom tot kolom overspant. De voordelen hiervan zijn dat de gevelelementen geen hinder ondervinden van bewegingen van de vloer, er zijn veel minder kraanbewegingen nodig en er zijn minder verbindingen

Het doel is om de kolomstroken zo smal mogelijk te houden, zodat de architect zoveel mogelijk ontwerprijheid heeft. Er wordt eerst gekeken hoe de krachten worden afgedragen. Vervolgens wordt gekeken hoe de elementen met elkaar en met de draagconstructie verbonden kunnen worden. Tenslotte wordt er nog gekeken naar overige aspecten zoals transport en montage.

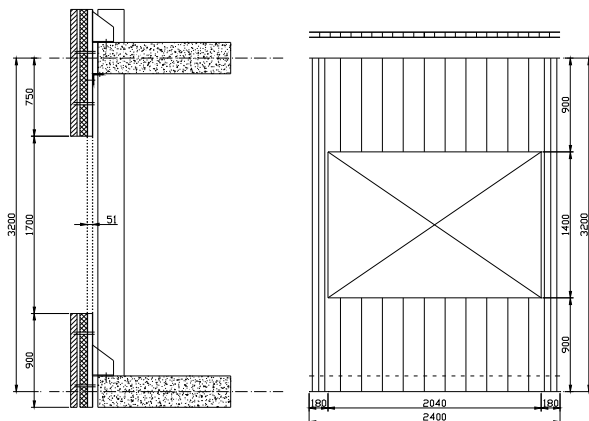


Fig. 9.11. Niet dragend wandelement

9.2.1 Krachtsafdracht

Het samengestelde element wordt opgehangen aan de kolommen en alleen in horizontale richting gekoppeld aan de vloer. Door deze koppeling kunnen vloer en gevelelement vrij van elkaar bewegen.

Het eigen gewicht wordt via een verbinding tussen het I-core paneel en de kolommen afgedragen; zie Fig. 9.12. Het buigend moment dat door het eigen gewicht optreedt, moet door het element zelf worden opgenomen. De windbelasting wordt via buiging aan de vloer afgedragen; zie Fig. 9.13. De gevel functioneert als een verticale stroken gevel.

Betonnen niet-dragende wandelementen rusten vaak op de vloer en dragen hun belasting direct aan de vloeren af.

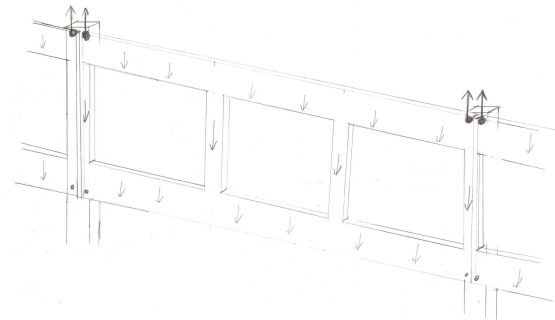


Fig. 9.12. Afdracht van de verticale belasting

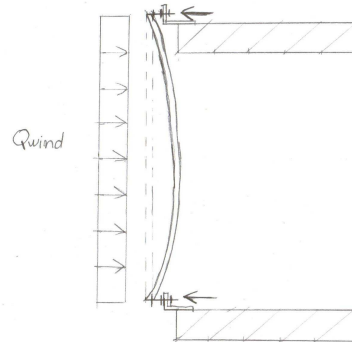


Fig. 9.13. Afdracht van de windbelasting

Orde van grootte van de krachten

Totale verticale belasting:

Paneel: $40 \text{ kg/m}^2 \times 3,5 \text{ m} = 1,3 \text{ kN/m}$

Gevel: $100 \text{ kg/m}^2 \times 3,5 \text{ m} = 3,5 \text{ kN/m}$

Totaal: $4,7 \text{ kN/m}$

Rekenwaarde: $1,2 \times 4,7 \text{ kN} = 5,6 \text{ kN/m}$

Er zijn twee ophangpunten per element, waardoor de belasting per ophangpunt wordt:

$$5,6 \text{ kN} / \text{m} \cdot 3,6 \text{ m} = 20 \text{ kN}$$

Doordat de belasting excentrisch aangrijpt ontstaat er een extra moment. Dit moment kan door de kolom of door het I-core element worden opgenomen. Zie par. 9.1.2. voor de uitwerking van deze verbinding.

De windbelasting wordt door het gedeelte tussen de ramen opgenomen. De belasting op dit gedeelte is:

$$q_{\text{wind}} = 1,5 \text{ kN/m}^2 \times 2,4 \text{ m} = 3,6 \text{ kN/m}$$

Opname windbelasting

Om de raamopening zo groot mogelijk te kunnen maken wordt t.p.v. de kolomstroken voor de minimale profielafstand van 60mm gekozen. Vier lijven werken mee in de krachtsafdracht, de totale breedte hiervan wordt dan 240mm; zie Fig. 9.14.

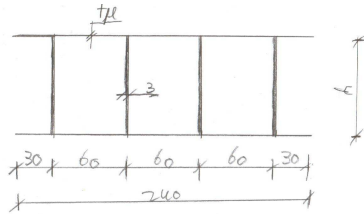


Fig. 9.14. Doorsnede over kolomstrook

Lengte overspanning:	$l = 3,2m$
Lijfafstand h.o.h.:	$p = 60mm$
Profielhoogte:	h
Flensdikte:	t_f
Dikte lijf:	$t_l = 3mm$
Hoogte lijf:	$h_l = h - 2 \cdot t_f$
Zwaartelij:	$e = \frac{1}{2} \cdot h$
E-modulus:	$E = 2,1 \cdot 10^5 \frac{N}{mm^2}$
Belasting:	$q_{rep} = 2,4 \frac{kN}{m}$ $q_d = 3,6 \frac{kN}{m}$
Traagheidsmoment ligger per lijf n:	

$$I_t = 4 \cdot \frac{1}{12} \cdot t_l \cdot h_l^3 + 2 \cdot \left[p \cdot t_f^3 + p \cdot t_f \cdot \left(e_0 - \frac{1}{2} \cdot t_f \right)^2 \right]$$

Optredend moment:

$$M_d = \frac{1}{8} \cdot q_d \cdot l^2$$

Optredende spanning:

$$\sigma_d = \frac{M_d \cdot e}{I_t}$$

Controle plooispanning volgens NEN 6700 par. 10.2.4.1:

$$\frac{p}{t_f} \leq 42 \cdot a_y,$$

waarin:

$$a_y = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_b}}$$

$$p = \frac{p}{42 \cdot a_y \cdot t_f}$$

Controle doorbuiging:

$$u = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_{rep} \cdot l^4}{E \cdot I} < 20mm$$

Analyse:

De p wordt minimaal genomen (60 mm). h en d worden gevarieerd en het effect op de spanningen, plooispanning en doorbuiging wordt geanalyseerd. De eis voor de maximale doorbuiging is 20mm; zie Tabel 9.3.

h (mm)	d (mm)	σ_m (N/mm ²)	plooi	w (mm)
60	2.5	143	0.32	19
80	1.0	180	0.89	18
80	1.5	141	0.53	14

Tabel 9.3. Analyse berekeningen

We kiezen voor 80-60-1.5. Tussen de kolomstroken kan de afstand tussen de lijven dan verdubbeld worden tot 120mm. Het gemiddelde gewicht is 45 kg/m².

9.2.2 Verbindingen

De verbindingen zijn volgens hetzelfde principe als bij het borstweringselement. De krachten die de verbinding over moet brengen zijn ook ongeveer even groot. De gevelelementen worden aan de bovenzijde van de vloer opgehangen en brengen aan de onderzijde een horizontale kracht over aan de vloer, zie Fig. 9.15.

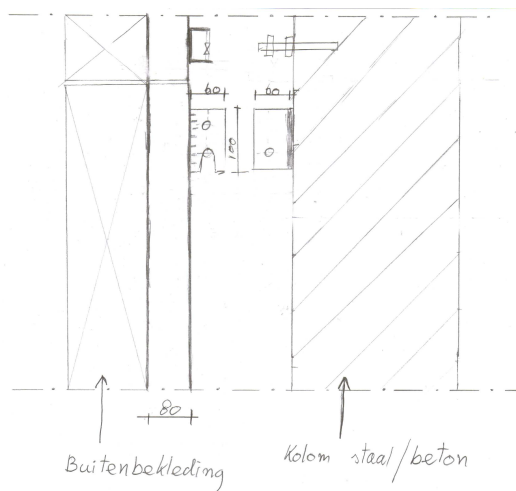
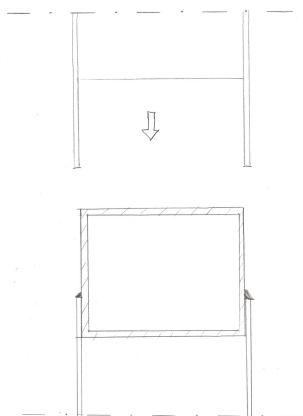


Fig. 9.15. Verbinding I-core paneel met kolom

Niet dragende betonnen wandelementen rusten met een nok op de vloer, of worden opgehangen door middel van stalen profielen aan de vloer.

Verbindingen tussen de elementen onderling

Naast de verbindingen tussen de elementen onderling in de lengterichting, moeten ook de elementen die aan de bovenzijde op elkaar aansluiten met elkaar bevestigd worden. Hier zijn verschillende oplossingen voor. Een mogelijke oplossing is zoals in Fig. 9.16.



9.16. Verbinding tussen I-core panelen

9.2.3 Overige eigenschappen

Massa paneel

De massa van een paneel van 3,2 m bij 7,4 m is ongeveer 500 kg. Hier komt dan nog de massa van de buitenbekleding en het raamelement bij.

Een betonnen element van dezelfde afmetingen weegt al snel 3000 kg.

Montage

De I-core panelen worden door een kraan op hun plaats gehangen. Het I-core paneel wordt opgehangen aan de verbinding bij de kolom. Vervolgens wordt de koppeling met de vloer tot stand gebracht.

De montage bij een betonnen element verloopt op dezelfde wijze. Bij het betonnen element zijn er wel meer verbindingen die gemonteerd moeten worden.

Transport

Door de afmetingen van de samengestelde gevelelementen zal het vervoer met een dieplader plaats moeten vinden. Door het lage gewicht kunnen meerdere (5 tot 10) elementen tegelijk vervoerd worden.

Door de massa van het betonnen element kunnen er maar enkele tegelijk verwordt worden.

9.3 Dragend borstweringselement

Dragende elementen vormen naast omhulling ook een onderdeel van de draagconstructie. Dit element draagt zijn eigen gewicht en het gewicht van de vloer af aan de kolommen. Ze dragen dus hun belasting als balken af aan de kolommen. Door de excentrische belasting vanuit de vloer ontstaat er een wringend moment dat door het I-core paneel moet worden opgenomen; zie Fig. 9.17. Bij betonnen borstweringselementen wordt dit door extra wapening opgenomen. Onderzocht gaat nu worden of het ook doormiddel van de I-core panelen opgenomen kan worden.

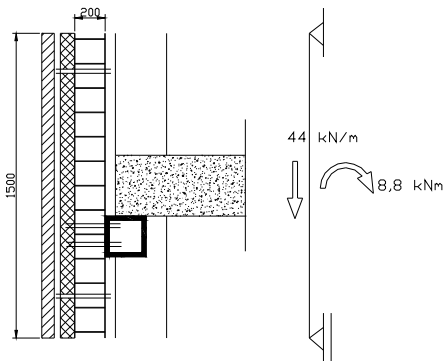


Fig. 9.17. Dragend borstweringselement

9.3.1 Krachtsafdracht

De vloer wordt opgelegd op het I-core paneel. Deze draagt de belasting van de vloer en het eigen gewicht af aan de kolommen. De windbelasting wordt door middel van buiging afgedragen aan de kolommen.

Orde van grootte van de krachten

Stel overspanning in één keer:

Rekenwaarde belasting: 10 kN/m^2
(zie vloerberekening)

Belasting per paneel per verdieping:

$3,6 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^2 = 36 \text{ kN/m}$

Twee oplegpunten per element. Belasting per oplegging: $1,2 \text{ m} \times 36 \text{ kN/m} = 44 \text{ kN}$.

Excentriciteit: $0,2 \text{ m}$

Totaal moment: $0,2 \text{ m} \times 44 \text{ kN} = 8,8 \text{ kNm/m}$.

Opname van dit moment:

Doorsnede wordt op een wringend moment belast van $8,8 \text{ kNm/m}$. Het maximaal wringend moment wordt

dan: $M_w = \frac{1}{2} \cdot 8,8 \cdot 7,2 = 31,7 \text{ kNm}$ Zie de momentenlijn

voor wringing; Fig. 9.18

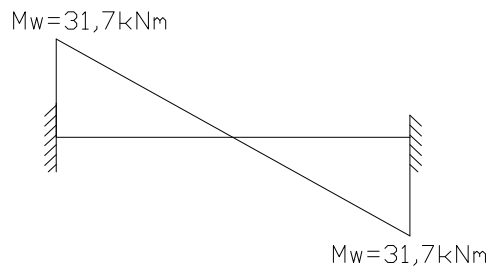


Fig. 9.18. Momentenlijn van de wringende momenten

De doorsnede kan berekend worden als een dunwandig profiel.

Schuifspanning t.g.v. het wringend moment:

Belangrijk is het oppervlakte dat meewerkt bij het opnemen van de schuifspanning; Fig. 9.19. Er wordt gerekend met een hoogte van 600 mm . De kokerligger heeft een hoogte van 400 mm . Het is aannemelijk dat het meewerkende gebied nog iets groter is.

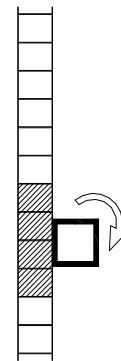


Fig. 9.19. Meewerkend gedeelte bij opname van de torsie

Afschuifmodulus: $G = 81 \cdot 10^3 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Paneelhoogte: $h = \text{var iabel}$

Flensdikte: $t_f = \text{var iabel}$

Lijfdikte: $t_l = 3 \text{ mm}$

Lengte I-core ligger: $l = 7,2 \text{ m}$

Arm (hoogte opleggligger) $a = 0,4 \text{ m}$

Torsie moment: $M_t = 32 \text{ kNm}$

Oppervlakte binnen hartlijnen doorsnede:

$$A_m = (h - t_f) \cdot (p - t_l)$$

Spanning t.g.v. het wringend moment: $\tau = \frac{M_t}{2 \cdot A_m \cdot t_{fl}}$

waarin A_m is het gearceerde oppervlakte in Fig. 9.19.

$$A_m = (h - t_{fl}) \cdot 600mm$$

$$\text{Wringstijfheid: } I_t = \frac{4 \cdot A_m^2}{2 \cdot \frac{h - t_{fl}}{t_{fl}} + 2 \cdot \frac{p - t_l}{t_l}}$$

$$\text{Afschuifhoek: } \varphi = \frac{M_t \cdot \frac{1}{2} l}{G \cdot I_t}$$

$$\text{Verplaatsing: } u = \varphi \cdot 600mm$$

We variëren nu h , p en t_{fl} en analyseren de effecten van deze variatie op de schuifspanning en op de verplaatsing; zie Tabel 9.4.

h	T	τ	u
150	2	91	15
150	4	46	13
200	2	68	9
200	4	34	8

Tabel 9.4. Analyse berekening

- De schuifspanning zijn bij alle combinaties dermate laag, dat ze niet maatgevend zullen zijn. De vervormingen zijn dus maatgevend.
- De hoogte van het profiel is maatgevend bij het opnemen van de torsie. De flensdikte heeft hier een beperkte invloed op.

De vraag is welke vervormingen nog toelaatbaar zijn. De gevelbekleding moet de vervormingen op kunnen nemen. We houden de vervormingen onder de 10mm. Dit betekent wel dat ter plaatse van de aangrijping de vloerbelasting er een plaatselijke vervorming optreedt van 1/60. De buitenbekleding moet deze vervormingen op kunnen nemen.

We onderzoeken nu welk profiel nodig is om de verticale belasting op te kunnen nemen.

Opname verticale belasting

Het dragend I-core paneel functioneert als een balk. We zullen eerst de optredende spanning berekenen en vervolgens controleren of de gedrukte flenzen niet uitknikken.

Controle sterkte

Paneelhoogte: $d = \text{variabel}$

Flensdikte: $t_{fl} = 2mm$

Lijfdikte: $t_l = 3mm$

Hoogte paneel: $h = 1200mm$

Flensafstand: $p = \text{variabel}$

Rekenwaarde belasting: $q_d = 37 \frac{kN}{m}$

Lengte overspanning: $l = 7,2m$

Traagheidsmoment:

$$I = 2 \cdot \frac{1}{12} \cdot t_{fl} \cdot h^3 + \frac{h}{p} \cdot \frac{1}{12} \cdot d \cdot t_l^3 + (d - 2 \cdot t_{fl}) \cdot t_l \cdot \frac{h}{p} \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot h \right)^2$$

Weerstandsmoment: $w = \frac{I}{\frac{1}{2} \cdot d}$

Optredend moment: $M_d = \frac{1}{8} \cdot q_d \cdot l^2$

Optredende spanning: $\sigma_d = \frac{M_d}{W}$

Controle plooi van de flenzen

Max. plooispanning: $\sigma_{ploo} = k_p \cdot \sigma_e$

waarin:

Plooiëfficiënt: $k_d = 23,9$

(zuivere buiging)

Eulerse knikspanning: $\sigma_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \left(\frac{p}{t_{fl}} \right)^2}$

waarin:

Poissonfactor: $\nu = 0,3$

Controle: $\sigma_{ploo} \geq \sigma_d$

Controle verstijvers

Kokerprofiel mag als vierzijdig opgelegd worden beschouwd.

Meewerkende breedte: $b_e = 1,33 \cdot t_{fl} \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$

$$b_e = 56,8mm$$

Oppervlakte van verstijver:

$$A_v = t_l \cdot (h - 2 \cdot t_l) + p \cdot t_{fl} + b_e \cdot t_{fl} = 946mm^2$$

Kracht op verstijver: $F_d = \sigma_d \cdot A_v = 167,4kN$

Afstand flens – neutrale lijn: $e = \frac{1}{2} \cdot h = 150mm$

Hoogte lijf: $h_l = h - 2 \cdot t_{fl} = 146 \text{ mm}$

Traagheidsmoment verstijver:

$$I_v = \frac{1}{12} \cdot t_l \cdot h_l^3 + 2 \cdot \left[\frac{1}{12} \cdot p \cdot t_{fl}^3 + p \cdot t_{fl} \cdot \left(e - \frac{1}{2} \cdot t_{fl} \right)^2 \right]$$

Kniklengte: $l_{buc} = 7,2 \text{ m}$

Eulerse knikkracht:

$$F_{z,E} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_v}{l_{buc}^2} = 206,3 \text{ kN}$$

Slankheid verstijver: $\lambda = \frac{l_{buc}}{i_y} = 97,5$, waarin

$$i_y = \sqrt{\frac{I_v}{A_v}}$$

$$\lambda_e = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 67,1$$

Relatieve slankheid: $\lambda_{z,rel} = \frac{\lambda}{\lambda_e} = 1,5$

Knikfactor: $\omega_{buc} = 0,39$

Max. knikkracht: $F_k = \omega_{buc} \cdot f_y \cdot A_v = 171 \text{ kN}$

Controle: $F_k \geq F_d$

Verstijver voldoet.

We voeren de berekening uit voor een aantal combinaties van h en p; zie Tabel 9.6.

H (mm)	P (mm)	σ_d	σ_{ploo}	F_d (kN)	F_{knik} (kN)	G (kg/m ²)
100	150	118	806	82	60	47
100	200	126	454	100	77	43
150	150	103	806	87	137	54
150	200	113	454	107	171	49
200	150	92	806	92	239	62
200	200	103	454	113	287	55

Tabel 9.6. Analyse berekening

Een profiel van 200-200-2 (hoogte – profielafstand – flensdikte) voldoet aan de sterkte.

Een dragend betonnen borstweringselement heeft ongeveer dezelfde hoogte.

9.3.2 Verbindingen

Verbinding aan kolommen

De verbinding kan op dezelfde manier plaatsvinden als bij het niet dragend borstweringselement. Het grootste verschil is dat de krachten die overgedragen moeten worden veel groter zijn. De gevel wordt aan de

kolommen van het gebouw bevestigd. Op de kolom wordt een U-profiel vast gemaakt, met daartussen een stalen buis of bout. Op het I-core paneel wordt een stalen strip gelast, met een oog dat over de stalen buis heen valt, zie Fig. 9.9.

De verbinding moet een verticale kracht van 130 kN over kunnen brengen. Door de excentrische aangrijping van deze kracht, ontstaat er ook een moment dat opgenomen moet worden. Dit moment wordt opgenomen door de horizontale krachten uit de verbindingen aan de boven- en onderzijde van het paneel; zie Fig. 9.9.

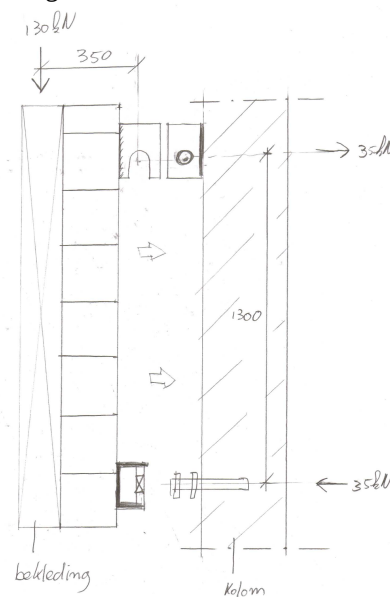


Fig. 9.9. Verbinding met kolom

Opname van de verticale krachten bij de bout:

De verticale kracht van 130 kN + de horizontale kracht van 35 kN zijn geen probleem om op te nemen bij de bovenste verbinding: Een M27 bout heeft een afschuif draagvermogen van:

$$F_v = 0,48 \cdot 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 572 \text{ mm}^2 = 220 \text{ kN}$$

De horizontale kracht aan de onderzijde van 35 kN, wordt gespreid door een U-profiel en naar het lijf afgedragen, zodat de er geen pons of knik optreedt op de plaats waar de kracht aangrijpt. Wordt de kracht over 300 mm van het lijf gespreid, dan wordt de spanning in het lijf:

$$\sigma = \frac{35 \text{ kN}}{3 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm}} = 39 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bij een dergelijk lage spanning zal het lijf niet gaan knikken.

Betonnen borstweringselementen worden op dezelfde wijze met de kolom verbonden. De momentvaste verbindingen zijn met beton eenvoudiger te maken, doordat ankers ingestort kunnen worden.

Verbinding met vloer

De vloer kan op de kokerligger bevestigd worden. Hoe de bevestiging tot stand wordt gebracht is afhankelijk van het vloertype. Er moet een koppeling komen tussen de vloer en de kokerligger, zodat de vloer niet van de ondersteuning af gaat glijden, wanneer het I-core element gaat roteren, zie Fig. 9.20.

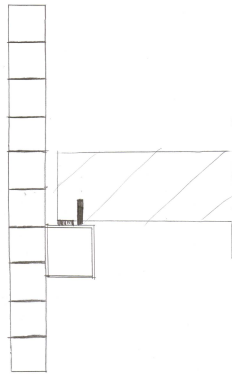


Fig. 9.20. Verbinding I-core paneel met vloer

9.3.3 Overige aspecten

Massa paneel

Het paneel weegt 55g/m^2

Een betonnen element weegt $400 - 500\text{ kg/m}^2$.

Montage

De elementen worden afgeleverd met eventueel buitenbekleding, met de kraan omhoog gehesen en opgehangen aan de kolommen. Vervolgens wordt het paneel vastgebout aan de hoeklijnen op de vloer. Tijdens de montage blijft het element in de kraan hangen. De montage van een betonnen borstweringselement werk op een vergelijkbare wijze.

Transport

Door het lage gewicht en de beperkte afmetingen kunnen de panelen eenvoudig vervoerd worden.

Door het hoge gewicht van de betonnen elementen zullen deze met veel minder tegelijk kunnen worden vervoerd.

9.4 Dragend wandelement

Een dragend wandelement draagt zowel zijn eigen gewicht als de vloer en de vloeren en elementen van eventueel daarboven gelegen verdiepingen; zie Fig. 9.20. Het element bestaat uit twee dragende kolomstroken aan de uiteinden van het element.

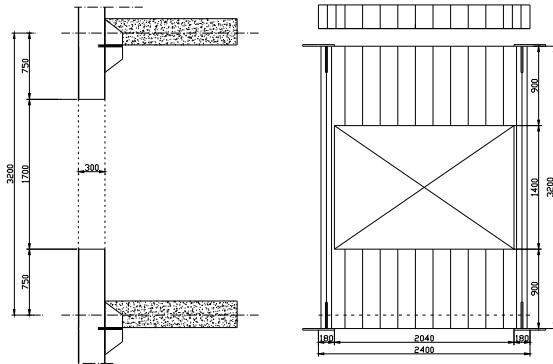


Fig. 9.20. Dragend wandelement

Dragende gevelelementen worden vaak toegepast in ongeschoorde gebouwen. De gevels verzorgen dan door een momentvaste koppeling met de vloer voor de stabiliteit. De overspanning tussen de gevels is groot en zonder ondersteuning van kolommen, waardoor er een grote ontwerp vrijheid is.

9.4.1 Krachtsafdracht

De vloeren dragen hun belasting via consoles op de I-core elementen af, zodat de vloeren ongehinderd kunnen doorbuigen. De I-core elementen dragen hun belasting direct via drukkrachten af aan het daaronder gelegen I-core element. Om de stabiliteit te verzorgen werken de vloeren als een schijf en zijn momentvast aan de I-core elementen verbonden, dit veroorzaakt weer een extra moment. Doordat de constructie ongeschoord is, is de kniklengte minimaal twee maal de verdiepingshoogte, afhankelijk van de stijfheidsverhoudingen tussen de vloer en de gevel. We gaan voor de ontwerpberekening uit van een kniklengte van 2,5 maal de lengte. De vloeren overspannen 14m. Bij de berekening wordt uitgegaan van een gebouw met 5 verdiepingen, met een verdiepingshoogte van 3,2m.

Orde van grootte van krachten

Belasting:

Rekenwaarde belasting: 10 kN/m^2
(zie vloerberekening)

Belasting per paneel per verdieping:

$14 \text{ m} \times 10 \text{ kN/m}^2 = 140 \text{ kN/m}$

Twee oplegpunten per element van 2,4m breedte..

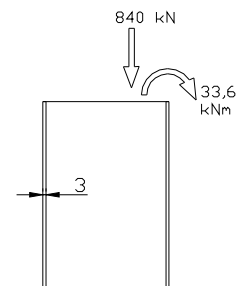
Belasting per oplegging: $1,2 \times 140 \text{ kN/m} = 168 \text{ kN}$.

Belasting op onderste verdieping: per oplegging
 $5 \times 168 \text{ kN/m} = 840 \text{ kN}$

Excentriciteit: 0,2m

Totaal moment: $0,2 \text{ m} \times 168 \text{ kN} = 33,6 \text{ kNm}$

Verbindingen



3 strips h.o.h. 60 mm werken mee per element, zie Fig. 9.21.

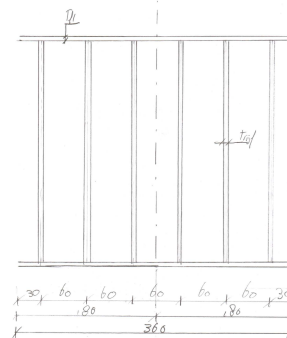


Fig. 9.21. Doorsnede kolomstrook

Door het moment ontstaat een 2^e orde effect, waardoor de doorbuiging nog meer toeneemt. Om dit te voorkomen mag de optredende drukspanning niet meer dan 150 N/mm^2 zijn (Bij de druktesten uit H4 werd 200 N/mm^2 behaald). De benodigde oppervlakte staal in de kolomdoorsnede wordt dan:

$$A_s = \frac{F_d}{\sigma} = \frac{840 \text{ kN}}{150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 5600 \text{ mm}^2$$

Bij een profielhoogte van 400mm komen we dan uit op een flensdikte en lijfdikte van 4mm. De massa van dit element is dan 270 kg/m^2 . Er is zoveel staal nodig dat er geen praktische uitvoering mogelijk is. Het I-core paneel is geen optie voor een dragend wandelement.

9.4.2 Verbindingen

Bevestiging aan gebouw

De elementen vormen zelf de hoofddraagconstructie waaraan de vloeren bevestigd zijn.

Verbinding vloer – gevel

De verbinding tussen vloer en gevel moet een momentvaste verbinding zijn. Bij betonnen elementen wordt deze verbinding tot stand gebracht door een randbalk te storten. Om deze verbinding met het I-core paneel te maken zal een zeer zware verbinding gemaakt moeten worden.

9.4.2 Overige aspecten

Massa paneel

Het paneel weegt zo'n 250 kg/m^2 in de kolomstroken. Het betonnen paneel is zwaarder, maar beton is veel goedkoper dan staal.

Montage

Elementen worden direct geplaatst.

Transport

Doordat de I-core panelen iets lichter zijn dan de betonnen wandelementen kunnen er meer elementen per vrachtwagenlading vervoerd worden.

9.5 Verbinding buitenbekleding

De verbinding van de buitenbekleding met het binnenblad gebeurt bij betonnen elementen op verschillende manieren. Er zijn verbindingen met ankers, beugels of met haarspelden; zie Fig. 9.22. Het is belangrijk dat het buitenblad vrij kan bewegen van het binnenblad.

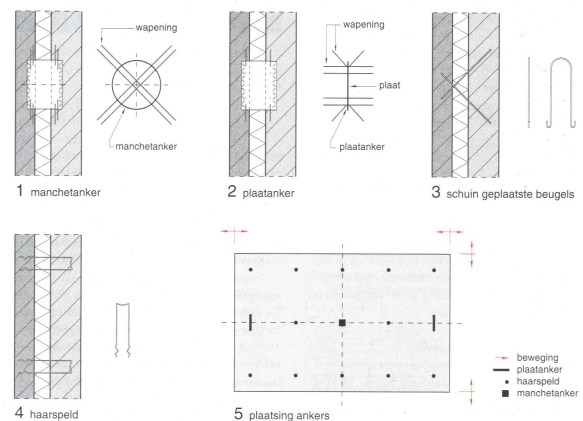


Fig. 9.22. Verbindingsmiddelen tussen binnen- en buitenblad bij betonnen gevelelementen; Ref. [29]

Bij de I-core panelen kunnen geen ankers of beugels ingestort worden. Om de buitenbekleding aan het binnenblad te bevestigen kunnen koudgewalste profielen op het I-core paneel vastgemaakt worden. Aan deze profielen wordt het buitenblad vastgemaakt. Tussen de profielen wordt de isolatie geplaatst; Zie Fig. 9.23. De h.o.h. afstand van de profielen en de afmetingen van de profielen zullen afhankelijk van het type buitenblad verschillen.

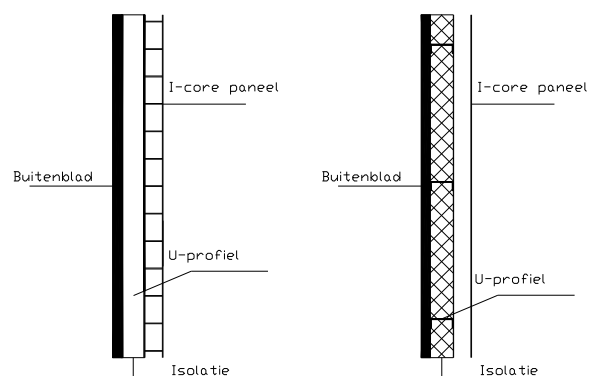


Fig. 9.23. Verbinding tussen binnen- en buitenblad bij de I-core panelen gevelelementen; Links: doorsnede; Rechts: bovenaanzicht.

9.6 Conclusies en aanbevelingen

Het belangrijkste doel waarvoor de I-core elementen door Meyer Werft ontwikkeld zijn, namelijk gewichtsbesparing, is het grootste voordeel bij de I-core gevelelementen. Met name bij de niet-dragende elementen kan veel gewicht en ruimte bespaart worden, doordat de minimale afmetingen van het I-core paneel veel kleiner zijn dan de minimale afmetingen van de betonnen gevelelementen. Hieronder staan de sterke en zwakke punten van de varianten opgesomd.

Niet- dragend I-core borstweringselement

- ++ Lage massa
- + Ruimtebesparing.
- + Eenvoudige montage

Niet- dragend I-core wandselement

- ++ Lage massa
- + Ruimtebesparing.
- + Eenvoudige montage
- + Vloer losgekoppeld van het gevelement

Dragend borstweringselement

- + Gewichtsbesparing
- Verbinding met vloer
- Inleiding van de krachten uit de vloer in het element

Dragend wandelement

- Verbinding met vloer
- Onderlinge verbindingen
- Veel staal nodig voor hoog traagheidsmoment voor opname van knik en 2^e orde effecten

Het I-core element is het meest geschikt voor de niet-dragende elementen. De afmetingen en het gewicht zijn hier een stuk lager dan de betonnen varianten. Het dragend borstweringselement is ook mogelijk, maar levert alleen gewichtsbesparing op. Het dragend wandelement is niet geschikt om de grote krachten die bij dit type gevel ontstaan op te nemen.

Punten die nog meer onderzoek vereisen zijn het effect van vulling van de elementen op de doorbuiging bij de borstweringselementen. Ook het bouwfysische gedrag van de gevelelementen moet nog onderzocht worden.

Referenties

H2 Toepassing Sandwichpanelen

- [1] J.R. Vinson, *The Behavior of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials*. Technomic Publishing Company Book, Pennsylvania, 1999
- [2] *Metalen sandwichelementen in de bouw*. Bouwen met Staal, Zoetermeer, 2004
- [3] R. Koschade, *Die Sandwichbauweise*. Ernst & Sohn, Berlin, 2000
- [4] S. van der Vossen, *Staalbeton Sandwichelementen*. TU Delft, 1999
- [5] J.W.P.M. Brekelmans, L. Carrión Lara, S. van der Vossen, “Tunnelconstructies in staal en staal-beton”. *Bouwen met staal* 155, 2000, jaargang 33, pag. 32 – 36.
- [6] M. van Heesch, *Toepassingsgebied voor Bi-steel*. TU Delft, 2001
- [7] J. Romanoff, P. Varsta, “Bending response of web-core sandwich beams”. *Composite Structures* 73, 2006, pag. 478 – 487.
- [8] P. Kujala, A. Klanac, “Steel sandwichpanels in Marine Applications”. *Brodogradnja* 56, 2005, pag. 305 – 318.
- [9] K.C. Meinert, “Laserwelded Lightweight Structures” *iMAST Quarterly nr.1*, 2005, pag. 3 – 6.
- [10] E.W. Reutzel, Kevin L. Koudela, “Lightweight Laser-Welded Stiffened Structures” *iMAST Quarterly nr.1*, 2005, pag. 3 – 6.
- [11] J. L. Meyer, *Laser-Welded I-core Panels*. Papenburg

H3 Laserlassen

- [12] C. Dawes, *Laser welding, A practical guide*. Ambington Publishing, Cambridge, 1992
- [13] W.W. Duley, *Laser welding*. A-Wiley-Interscience publication, New York, 1999
- [14] J. Meijer, F.W. Ploegman, *Materiaalbewerking met lasers*. Universiteit Twente, 2005
- [15] B. Hu, *Nd/YAG Laser-assisted Arc Welding*. TU Delft, 2002
- [16] J. L. Meyer, *Laser-Welded I-core Panels*. Papenburg

H4 Onderzoek lasergelaste sandwichpanelen

- [17] T. Reinert, M. Lehne, “Overview on Sandwich” *Powerpointpresentatie*, Papenburg, 2003
- [18] D. Zenkert, “Practical design solutions for laser welded Sandwich panels” *Powerpointpresentatie*, Papenburg, 2003
- [19] J. Kozak, B. Metschkow, “Sandwich testing procedure” *Powerpointpresentatie*, Papenburg, 2003
- [20] J. Romanoff, P. Varsta, “Bending response of web-core sandwich beams”. *Composite Structures* 73, 2006, pag. 478 – 487.
- [21] H. Stam, *Laser welded steel decks*. TU Delft, 2006

H5 Overzicht vloersystemen

- [22] J.J.N. Lichtenberg, “Ontwikkelingen in prefab vloersystemen”. *Cement nummer 8*, 2001, pag. 39 – 43.
- [23] *Hogere Bouwkunde, deel 9 Utiliteitsbouw*. ThiemeMeulenhoff, Utrecht/Zutphen, 2001
- [24] *Hogere Bouwkunde, deel 3 Draagstructuur*. ThiemeMeulenhoff, Utrecht/Zutphen, 2001
- [25] *Funderingen, Vloeren en Daken; Serie Bouw- en Installatietechniek*. Reed Business Informatien, Doetinchem, 2004
- [26] F. de Groot, “IFD en DUBO stimuleren vloerinnovaties”. *Cement nummer 8*, 2002, pag. 11 – 16.
- [27] *Handboek Staalframebouw*. Bouwen met Staal, Zoetermeer, 2004
- [28] W.H. Verburg, *Bouwen op toplocaties. Optoppen met staalframebouw*. Bouwen met Staal, Rotterdam, 2000

H6 Overzicht gevelsystemen

- [29] *Hogere Bouwkunde, deel 4b Omhulling - Gevels*. ThiemeMeulenhoff, Utrecht/Zutphen, 2001
- [30] *Hogere Bouwkunde, deel 9 Utiliteitsbouw*. ThiemeMeulenhoff, Utrecht/Zutphen, 2001
- [31] S. Gulyas, “Truss Supported Stone Panel Systems” *New Stone Technology, Design, and Construction for Exterior Wall Systems, ASTM STP 996*, 1988, pag. 69 – 86.

H8 Ontwerp vloervarianten

- [32] *NEN 6702 Belastingen en vervormingen*. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 1993
- [33] W.H. Verburg, *Bouwen op toplocaties. Optoppen met staalframebouw*. Bouwen met Staal, Rotterdam, 2000
- [34] *NEN 6770 Staalconstructies*. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 1999
- [35] *NEN 6771 Staalconstructies - Stabiliteit*. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 2000
- [36] *(Over)spannend staal, deel 2 - Construeren A*. Staalbouwkundig Genootschap, Rotterdam 1997
- [37] *(Over)spannend staal, deel 3 - Construeren B*. Staalbouwkundig Genootschap, Rotterdam 1996
- [38] *Bouwfysica*. A.C. van der Linden, ThiemeMeulenhoof, Utrecht/Zutphen, 2000

H9 Ontwerp gevelvarianten

- [39] A.L. Bouma, *Mechanica van constructies; elasto-statica van slanke structuren*. Delft, 2000
- [40] C. Hartsuijker, *Toegepaste Mechanica deel 2; Spanningen, vervormingen, verplaatsingen*. Schoonhoven, 2003
- [41] *NEN 6770 Staalconstructies*. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 1999
- [42] *NEN 6771 Staalconstructies - Stabiliteit*. Nederlands Normalisatie-instituut, Delft, 2000

Overig

- [43] W. Hoogland, *Rapport over rapporteren; Rapporteren in theorie en praktijk*. 3^e druk, Wolters-Noordhoff, Groningen, 1998.

Bijlagen

A1 Ontwerpberekening variant 1a

A2 Ontwerpberekening variant 1b

A3 Ontwerpberekening variant 2

A4 Ontwerpberekening variant 3