

# Ontwerpt u nog steeds op het aantal kilo's?



De doelmatigheid van een staalconstructie in een verdiepinggebouw wordt in Nederland vaak gerelateerd aan de gebruikte hoeveelheid staal per m<sup>2</sup> bruto vloeroppervlak. Het rekenen met bedragen van twee tot vijf gulden per kilo voor een staalconstructie is echter te ongenueanceerd. Het zijn namelijk niet uitsluitend de kilo's staal die bepalen of een staalconstructie efficiënt en kostenbewust is ontworpen. Ook andere aspecten spelen daarbij een rol: deze worden in dit artikel op een rij gezet. Het uitgangspunt is een staalskelet voor een verdiepinggebouw, waarbij de stabiliteit is ontleend aan stalen verbanden dan wel aan betonnen schijven of kernen.

Het proces dat moet leiden tot een optimale draagconstructie bestaat ruwweg uit drie fasen. De eerste omvat het ontwerpen van mogelijke draagconstructies die passen binnen het programma van eisen en het daarvoor vervaardigde voorlopig ontwerp. Tijdens de tweede fase vindt de keuze plaats van de vorm en het materiaal van de draagconstructie. Het is belangrijk te beseffen dat in deze fase niet uitsluitend de kosten van de draagconstructie van belang zijn. Van belang is namelijk ook de invloed van een draagconstructie op de kosten van andere begrotingselementen, zoals de fundering, de gevel, de installaties en de voorbereidings- en bouwtijd. Als op basis hiervan is gekozen voor een stalen draagconstructie, is er tijdens de derde fase een verdere optimalisatie van de kosten mogelijk door het nader onderzoeken van de kostenconsequenties van materiaal-specifieke aspecten van staal. De belangrijkste aspecten die van invloed kunnen zijn op de kosten van de constructie zijn het (buiten)klimaat, de staalsoort (in relatie tot het klimaat en de constructie), de fabricage, de conservering, de montage en de brandwerende voorzieningen.

## Buitenklimaat en levensduur

De levensduur van een staalconstructie hangt af van de corrosiesnelheid, de keuze en de dimensionering van de staalprofielen, de verbindingen en het conserveringssysteem. De agressiviteit van het buitenklimaat waaraan de constructie kan blootstaan (de klimaatklasse) bepaalt de corrosiesnelheid en de wijze van conserveren. Conserveren zorgt ervoor dat de verlangde levensduur van de staalconstructie, dan wel de sterkte van de constructie gedurende die periode, wordt gegarandeerd. Bedenk daarbij wel dat op plaatsen waar vocht en vuil zich kunnen ophopen de corrosiesnelheid hoger zal zijn dan volgens de klimaatklasse is te verwachten. Het negatie-

ve effect van de hogere corrosiesnelheid is te compenseren door plaatselijk een agressiever klimaat te veronderstellen met de daarbij vereiste conservering. Daarentegen is het niet nodig om constructies die niet blootstaan aan het buitenklimaat te conserveren. Dat is bijvoorbeeld het geval voor kantoren, waarvoor klimaatklasse C<sub>1</sub> geldt: in dit binnenklimaat is corrosie namelijk uiterst gering. Het overdimensioneren met een zogeheeten corrosietoeslag was in het verleden een gangbare methode om de onderhoudskosten te beperken. Deze methode is tegenwoordig in onbruik is geraakt, maar in sommige situaties zeker het overwegen waard. Daarbij valt te denken aan tijdelijke constructies en aan constructies waaraan geen esthetische eisen worden gesteld. Ook een juiste profielkeuze draagt bij aan een verlenging van de onderhoudsvrije periode. Een voorbeeld is het toepassen van kokers in plaats van HE-profielen. Kokers zijn namelijk zodanig uit te voeren dat er aan de binnenzijde geen corrosie optreedt.

## Staalsoort

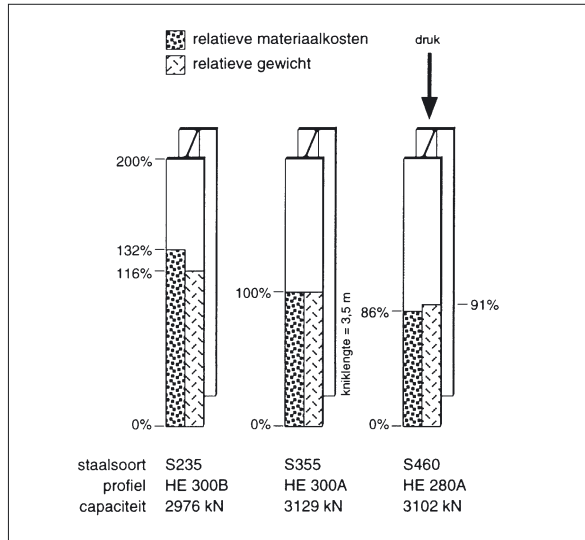
De tijd dat de materiaalkosten bepalend waren voor de kosten van een staalconstructie is voorbij. Tegenwoordig kost vijftig kilo staal namelijk even veel als een mensuur arbeid. Het beperken van de hoeveelheid staal is daarom uitsluitend zinvol als dit nauwelijks extra kosten tot gevolg heeft, bijvoorbeeld voor de fabricage. Eén van de mogelijkheden tot gewichtsbeparing is het kiezen van de juiste staalsoort. In Nederland wordt meestal gekozen voor staal met een vloeigrens van 235 N/mm<sup>2</sup>. Het gebruik van staal met een hogere sterkte leidt dan tot minder kilo's, indien de sterkte maatgevend is. Daarbij moet wel worden onderzocht of de meerkosten van de hogere kiloprijs voldoende opwegen tegen de besparing op het totale staalgewicht.

dr.ir. R. Hamerlinck en ir. W.H. Verburg  
*Staalbouw Instituut, Rotterdam*

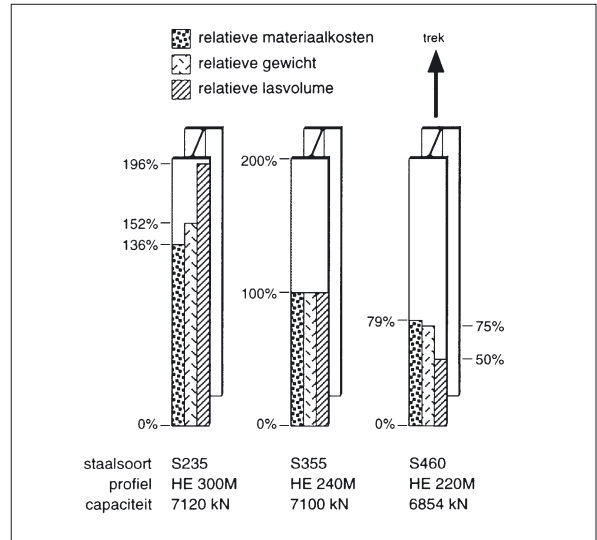
### Kenmerken van drie, veelgebruikte staalsoorten in de bouw.

staalsoort	vloei grens $f_{y;d}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	prijsverhouding	'vergelijkbare' betonkwaliteit
S235	235	100%	B390
S355	355	110-115%	B590
S460	460	120-125%	B765

Het toepassen van staal met een hogere sterkte leidt bij kolommen tot lagere kosten.



Relatie tussen de staalsoort en de kosten van het laswerk bij een getrokken profiel van een sluitverbinding.



profielgegevens geïntegreerde ligger	S235					S355				
	capaciteit [kNm]	massa [kg/m]	materiaalkosten* [f/kg]	[f/m]	[f/kNm]	capaciteit [kNm]	massa [kg/m]	materiaalkosten* [f/kg]	[f/m]	[f/kNm]
HE 180M + pl. 20x400	281	154,6	1,70	263	0,93	425	154,6	1,89	292	0,69
coupe HE 400B + pl. 15x500	367	139,2	1,90	264	0,72	556	139,2	2,05	285	0,51
THQ 200x8-300x30-500x15	377	145,6	2,00	291	0,77	571	145,6	2,15	313	0,55

Relatie tussen staalsoort, momentcapaciteit en materiaalkosten voor drie typen geïntegreerde liggers.

Voor kolommen heeft Arbed een dergelijke onderzoek uitgevoerd. In het algemeen worden er aan kolommen geen stijfheidseisen gesteld. Het toepassen van staal met een hoge sterkte is daarom goed mogelijk en heeft een gunstig effect op de kosten van een staalconstructie. Wanneer echter de stijfheid van de constructie maatgevend is, ligt het gebruik van hogesterkte staal minder voor de hand; de elasticiteitsmodulus van S235 en S355 zijn immers gelijk. Stijfheid is bijvoorbeeld van belang bij de diagonalen in stabiliteitsverbanden. Bij vloerliggers met een zeeg daarentegen is de hoge sterkte van het staal wél optimaal te benutten. Een voorbeeld zijn geïntegreerde liggers, die overigens altijd worden uitgevoerd in S355. Het toepassing van staal met een hogere sterkte leidt echter tot aanzienlijk lagere kosten.

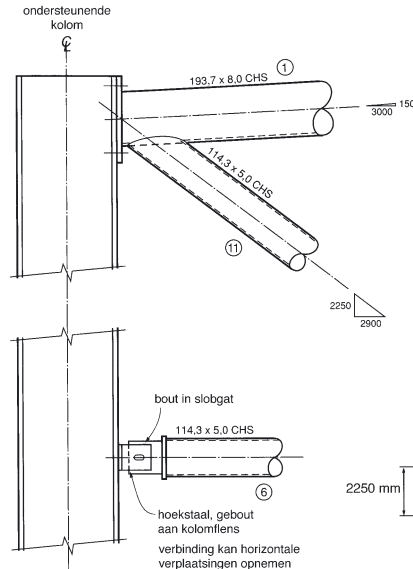
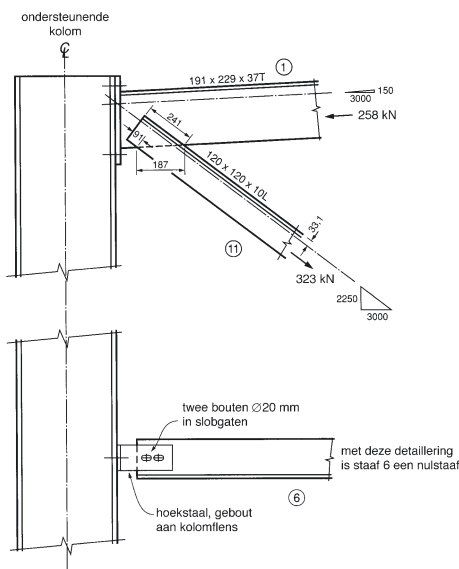
### Lasvolume

Kiezen voor staal met een hoge sterkte kan het lasvolume belangrijk beperken. Zeker bij constructies met veel laswerk compenseert de beperking van het lasvolume ruimschoots de hogere kosten voor het staal. De invloed van het laswerk op de kosten van liggers komt het meest duidelijk naar voren bij raatliggers. Dit type ligger is ontwikkeld vanuit het streven naar een optimaal materiaalgebruik en vanuit de opvatting dat het besparen van materiaal lonend is. Het tegendeel is vaak waar, zeker wanneer de raatligger nog op de traditionele manier wordt vervaardigd, namelijk het meandervormig doorsnijden van een walsprofiel en de twee helften daarna is

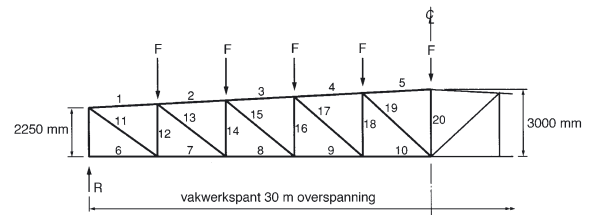
### Overzicht van de (atmosferische) corrosieclassen met kenmerkende milieus volgens ISO/DIS 12944-2.

klimaat- klasse	corrosi- viteit	afname van massa en dikte in eerste jaar				voorbeelden van kenmerkende milieus en toepassingen in een gematigd klimaat	
		constructiestaal massa [g/m <sup>2</sup> ]	dikte [mm]	zink massa [g/m <sup>2</sup> ]	dikte [mm]	buiten	binnen
C <sub>1</sub>	zeer laag	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	n.v.t.	verwarmd met droge lucht (kantoren, winkels, scholen, hotels)
C <sub>2</sub>	laag	10-200	1,3-25	0,7-5	0,1-0,7	landelijke gebieden met droog milieu en weinig vervuiling.	onverwarmde gebouwen met kans op condensatie (hallen)
C <sub>3</sub>	gemiddeld	200-400	25-50	5-15	0,7-2,1	stedelijk en industrieel milieu met matige vervuiling door zwaveldioxide. Kustgebieden (laag zoutgehalte)	productieruimten met hoge vochtigheid en geringe luchtvervuiling (voedingsindustrie, wasserijen, brouwerijen)
C <sub>4</sub>	hoog	400-600	50-80	15-30	2,1-4,2	industriële en kustgebieden (matig zoutgehalte)	chemische fabrieken, zwembaden
C <sub>5i</sub>	zeer hoog (industrie)	650-1500	80-200	30-60	4,2-8,4	industriële gebieden met hoge vochtigheid en agressief milieu	n.v.t.
C <sub>5m</sub>	zeer hoog (maritiem)	650-1500	80-200	30-60	4,2-8,4	kustgebieden en offshore (hoog zoutgehalte)	n.v.t.

- De afname van massa en dikte is ontleend aan ISO 9223.
- In warme en vochtige kustgebieden kan de afname van massa en dikte meer bedragen dan de waarden die zijn vermeld voor klimaatklasse C<sub>5m</sub>. De keuze van het conserveringssysteem verdient in dat geval speciale aandacht.



*Een vakwerk uitgevoerd met kokerprofielen vraagt minder staal dan een uitvoering met hoek- en T-profielen, maar is duurder vanwege de hogere materiaalprijs.*



een verschoven positie aan elkaar lassen. Het snijden geschiedt weliswaar automatisch, maar het lassen is vaak handwerk en dus duur. Een modern alternatief is het uitsnijden van de raten (of ronde gaten) uit een gewalste ligger. In beide gevallen is er nauwelijks sprake van een besparing van kosten. Uit kosten oogpunt zijn raatliggers daarom tegenwoordig minder interessant dan dertig jaar geleden. Raatliggers werden in het verleden meestal gekozen vanwege de materiaaleconomie, maar tegenwoordig vaak vanwege de architectuur òf vanwege het gemak om leidingen door te kunnen voeren.

Maar ook in meer algemene zin is de keuze van het type profiel van invloed op de kosten. Gewalste profielen zijn per kilo goedkoper dan kokerprofielen. Een keuze voor kokers is dan gebaseerd op andere afwegingen dan uitsluitend de materiaalprijs, bijvoorbeeld een besparing op onderhoudskosten of de verschijningsvorm van een ronde of vierkante doorsnede. Nederland is een land met een uitgesproken voorkeur voor kokerprofielen. Het lijkt bijna of vakwerkliggers nog uitsluitend met kokerprofielen zijn te maken! Uit een vergelijking tussen een vakwerkspant uitgevoerd in kokerprofielen en in hoek- en T-profielen, blijkt dat er minder kilo's buisprofielen nodig zijn. Echter door het verschil in de kiloprijs zijn spanten uitgevoerd in gewalste profielen toch goedkoper.

## Fabricage

Onder de fabricage vallen alle handelingen die nodig zijn om van een halfpro-

dukt of staalprofiel een constructiedeel te maken, zoals zagen, gaten boren, platen snijden en lassen. Gemiddeld bedragen de fabricagekosten veertig procent van de totale kosten van een staalconstructie. Daarom is het, evenals bij de materiaalkosten, aantrekkelijk extra materiaal toe te passen om daardoor te besparen op de dure fabricagewerkzaamheden.

De eenvoudigste manier om de fabricagekosten te drukken, is nog steeds het achterwege laten van werkzaamheden. Denk daarbij bijvoorbeeld aan het weglaten van verstijvingsschotten. Naast een verlaging van de fabricagekosten, levert het weglaten van schotjes ook een positieve bijdrage aan het verminderen van de onderhoudskosten. Weglaten blijkt in de praktijk vaak minder eenvoudig te zijn dan het lijkt. Het is voor constructeurs namelijk aantrekkelijker een schotje te tekenen, dan te controleren of er echt een schotje nodig is. Een verdere beperking van de fabricagekosten is te bereiken door het ontwerp zodanig op te zetten dat de constructie automatisch is te fabriceren.

Scharnierende aansluitingen van liggers aan kolommen of het gebruik van hoekprofielen bij verbindingen zijn daarvoorbeelden van. Het bewerken van hoekprofielen gebeurt in een zogeheten 'hoekstalencentrum': een machine die de gaten ponst en het hoekprofiel op de gewenste lengte afknijpt. Met een zaagboorstraat worden de balken gemaakt. Zowel een hoekstalencentrum als een zaagboorstraat zijn numeriek aan te sturen. De daartoe vereiste data wordt

gegenereerd vanuit een CAD-systeem dat de 'werkplaatstekeningen' maakt. Verbindingen met hoekstalen zijn zeer goedkoop, omdat ze geen laswerk vereisen. In de praktijk komt het echter nauwelijks voor dat men bij het ontwerp van een vakwerk de kosten vergelijkt van de verschillende wijzen van uitvoeren. Nu is het niet altijd mogelijk vanuit het oogpunt van fabricage de meest economische verbindingmethode te kiezen. Verbindingen kunnen namelijk ook een functie vervullen in het architectonisch ontwerp. Daarbij worden echter zelden de meerkosten van deze esthetische eisen zichtbaar gemaakt.

## Conservering

In de praktijk beschouwen velen het conserveren van de staalconstructie als een aparte kostenpost. Dat is echter niet juist. Bij constructies zijn namelijk niet de bouwkosten of de onderhoudskosten relevant, maar de netto contant gemaakte kosten gedurende de levensduur. Uitsluitend voor constructies die géén onderhoud behoeven – zoals klimaatklasse C<sub>1</sub> – kan er naar bouwkosten worden geoptimaliseerd. Immers hier is geen onderhoud vereist en is conservering zelfs overbodig.

Aan constructies in klimaatklasse C<sub>2</sub> worden geen aanvullende eisen gesteld. Voor een nieuwbouwsituatie is het dan voldoende te volstaan met een verfsysteem met een voldoende lange levensduur. Maar om in een agresief klimaat een levensduur van meer dan 10 á 15 jaar te garanderen, moet al bij het ontwerp rekening worden gehouden met het

*Parkeergarage Tivoli in Tilburg. De 13 m lange kolommen zijn verzinkt en in één lengte aangevoerd. De kolommen verjongen halverwege; de delen zijn in de werkplaats aan elkaar gelast. Hierdoor is bespaard op de kosten van zowel montage als fabricage.*

*Scharnierende verbindingen met hoekstalen zijn goedkoop te fabriceren en te monteren.*



onderhoud van de constructie. Er zijn dan twee extreme situaties denkbaar, namelijk: een zeer onderhoudsvriendelijke constructie in combinatie met inspectief onderhoud of een constructie waarbij de technische levensduur korter is dan de gewenste levensduur. De tweede mogelijkheid impliceert dat constructies gedurende de gewenste levensduur vervangen (moeten) worden. Dit is vooral aantrekkelijk voor constructies toegepast in klasse C<sub>51</sub>, waaraan geen esthetische eisen worden gesteld.

#### **Overbodige conservering**

Het nemen van overbodige en derhalve kostenverhogende conserveringsmaatregelen is in de huidige praktijk helaas geen uitzondering. Een voorbeeld is het thermisch verzinken van constructies samengesteld uit buisprofielen.

Thermisch verzinken betekent namelijk dat elke buis alzijdig, dus buiten én binnen, wordt geconserveerd door onderdompeling in een zinkbad. Het thermisch verzinken van buisprofielen is uitsluitend praktisch mogelijk indien ook de binnenkant voor het vloeibare zink toegankelijk is. Afsloten ruimten moeten worden voorkomen, omdat de opgesloten lucht bij verwarming gaat uitzetten en daarbij hoge spanningen veroorzaakt en omdat ook voor zink de wet van Archimedes opgaat (opdriven

van het werkstuk). Hoewel thermisch verzinken een goede bescherming biedt, is het voor buisconstructies vaak een overbodige en te dure oplossing. De kosten van thermisch verzinken hangen namelijk met name af van de hoeveelheid aan te brengen zink. Zeker voor grote kokers is daarom deze wijze van conserveren voor wat betreft de kosten niet optimaal.

Buisconstructies in de klimaatklasse C<sub>1</sub> tot en met C<sub>4</sub> corroderen aan de binnenzijde nauwelijks. Conserveren van de binnenzijde is derhalve absoluut overbodig. Maar ook in meer agressieve klimaten is het niet nodig. Het luchtdicht afdichten van de buizen kan ervoor zorgen dat er in de koker een niet-corrosief klimaat ontstaat. De buitenzijde is vervolgens te conserveren via een organische deklaag. Deze oplossing, waarbij slechts de helft van de constructie wordt geconserveerd, kan ook in agressieve klimaten een lange levensduur garanderen.

#### **Montage**

Montagekosten hebben betrekking op het samenbouwen van constructiedelen tot een complete constructie. De montage van staalconstructies geschiedt vaak met behulp van mobiele kranen. Het gewicht van het zwaarste constructiedeel is doorgaans bepalend voor het type kraan. De montagekosten zijn ech-

ter niet zozeer een functie van het te hijsen gewicht, maar meer van de montage-snelheid per constructiedeel en het aantal te monteren delen. Een staalconstructie die is samengesteld uit kleine, en dus lichte, onderdelen is vanwege het grote aantal kraanbewegingen een dure constructie.

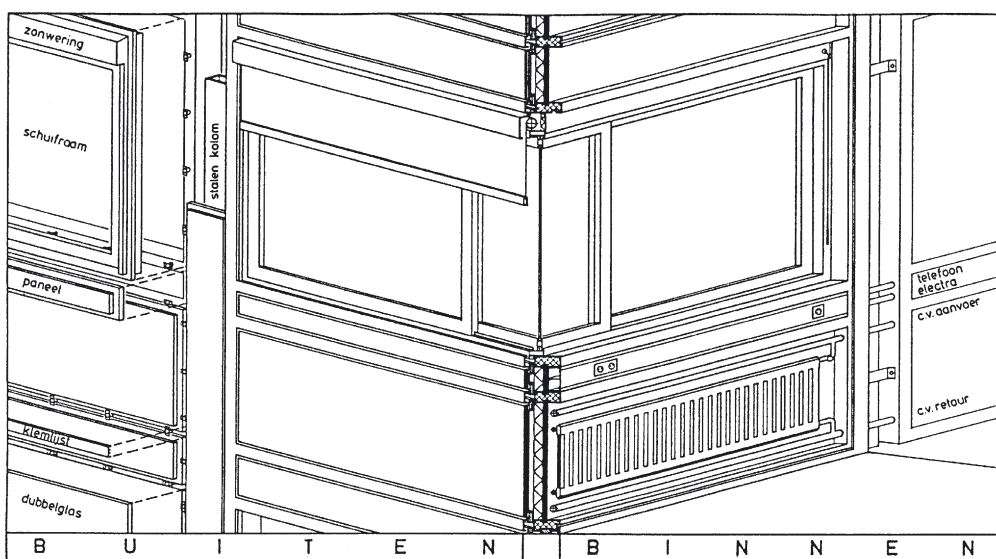
De hoogte van het gebouw speelt nauwelijks meer een rol voor de montage-snelheid wegens de grote hijs-snelheid van de moderne hydraulische kranen. De montagetijd van een balk of kolom die met bouten moet worden bevestigd, bedraagt ongeveer 10 tot 15 minuten, exclusief het stellen van de kolommen. Al eerder, bij het onderwerp fabricagekosten, is gepleit voor scharnierende verbindingen in verband met het beperken van de kosten. Scharnierende verbindingen zijn, gelet op de montagekosten, te prefereren boven (semi-)stijve verbindingen. Het over minimaal twee lagen uitvoeren van kolommen bij verdiepinggebouwen levert ook een aanzienlijke bijdrage in het beperken van de montagekosten.

#### **Brandwerende voorzieningen**

Een veelgehoord argument in de praktijk om verdiepinggebouwen niet in staal uit te voeren, zijn de (vermeende) hoge kosten van brandwerende voorzieningen. Nu is het inderdaad mogelijk een staalconstructie zodanig te ontwerpen dat de kosten van brandwerende voorzieningen hoog zijn. Meestal komt dat doordat niet tijdig of niet efficiënt rekening is gehouden met de eisen uit het Bouwbesluit. Voor bijvoorbeeld een kantoor van twee lagen stelt het Bouwbesluit geen eisen aan de brandwerendheid van de hoofd draagconstructie.

**Kosten van thermisch verzinken en organische deklagen (1 grondlaag + 2 deklagen). (bron: Stichting Doelmatig Verzinken)**

type constructie	thermisch verzinken		organische deklagen	
	m <sup>2</sup> per ton	gulden per ton	gulden per m <sup>2</sup>	gulden per m <sup>2</sup>
zeer zwaar	10-15	350-450	31	30
zwaar	15-20	400-500	23-30	36
middelzwaar	20-30	450-600	17-26	43
licht	30-40	500-650	16-20	50



Bouwkundige integratie van een staalconstructie, voor gebouwen tot zes lagen. Voor hogere gebouwen passen de kolommen van de onderste lagen niet meer binnen dikte van de gevel.

Brandwerende bekleding van een vloerligger met platen minerale wol.

Hooguit kan in bepaalde gevallen een eis van 30 minuten gelden in verband met ontvluchten of brandoverslag. Wanneer dan de draagconstructie voor een dergelijk kantoor wordt ontworpen op een brandwerendheid van 60 minuten, leidt dat tot onnodige kosten. Hetzelfde geldt voor open parkeergarages. Behoudens uitzonderingen, worden er op basis van gelijkwaardigheid geen brandwerendheidseisen gesteld aan de draagconstructie. Door de lage vuurbelasting, in combinatie met ventilatie en lage temperaturen, is namelijk geen bescherming van het staal vereist.

#### Bouwkundige integratie

Bouwkundige integratie beperkt veelal ook de kosten van brandwerende voorzieningen. Geïntegreerde liggers zijn zonder aanvullende voorzieningen minimaal 30 minuten brandwerend. Is een hogere brandwerendheid vereist, dan kan de onderflens van de liggers op diverse manieren brandwerend worden bekleed. Voor constructies die niet in het zicht blijven, bijvoorbeeld doordat er een plafond onder de vloer komt, is het bekleeden van de niet-geconserveerde onderflens met minerale wol efficiënt. Een aantrekkelijk alternatief voor zichtwerk is de keuze voor een opschuimende verf. Hierdoor kan de 'gewone' verf achterwege blijven en dat levert al ongeveer de helft op van de meerkosten van een opschuimende verf.

Voor vrijstaande kolommen is meestal wel een brandwerende bescherming vereist. Dat kan zijn een uitwendige bekleding of een inwendige vulling met (al of niet gewapend) beton. Overigens zijn gevelkolommen vaak goed te integreren in het binnenblad van de gevelconstructie.

#### Brandwerend bekleden met minerale wol

Een bekleding van de onderflens van geïntegreerde liggers met minerale wol, met een brandwerendheid van 60 minuten, kost  $f$  30 per m of  $f$  4,20 per  $m^2$  bvo bij een liggerafstand van 7,2 m. Met een 15 mm dikke plaat is een brandwerendheid van zowel 60 als 120 minuten te bereiken. Het brandwerend bekleden van stalen vloerliggers met een profielhoogte van 260 mm kost  $f$  45 per m of  $f$  12,50 per  $m^2$  bvo bij een liggerafstand van 3,6 m. Voor kolommen hangen de kosten van brandwerende voorzieningen sterk af van de gekozen uitvoering. Voor vrijstaande kolommen kan worden gerekend op  $f$  5 per  $m^2$  bvo. Voor gevelkolommen die bouwkundig zijn geïntegreerd in de gevel ligt dit bedrag aanzienlijk lager.



#### Eenhedsprijzen van brandwerende bekleding met plaatmaterialen (prijspeil 1996).

plaatmateriaal		materiaal [ $f/m^3$ ]	verwerken [ $f/m^2$ ]	aanbrengen [ $f/m^2$ ]
gipsvezel	4-zijdig	1200,00	30,00	12,00
vermiculite	3-zijdig	1000,00	25,00	5,00
vermiculite	4-zijdig	1000,00	40,00	15,00
silicaat	3-zijdig	2000,00	30,00	5,00
silicaat	4-zijdig	2000,00	35,00	10,00
steenwol	1-zijdig <sup>(a)</sup>	1400,00	20,00	5,00
steenwol	3-zijdig <sup>(b)</sup>	1400,00	22,00	5,00

a. Vlakke platen met twee aangeliijde opstanden voor geïntegreerde liggers, bevestigd met klemshots op lasstiften

b. Vlakke platen op klossen voor walsprofielen, geliijmd en geniet

#### Eenhedsprijzen van profielvolgende pleisters en opschuimende coatings (prijspeil 1996).

materiaal	laagdikte [mm]	materiaal en verwerken	aanbrengen [ $f/m^2$ ]
sputpleister minerale vezel	5-15	2000,00 [ $f/m^3$ ]	10,00
vermiculite spuitpleister	5-15	2500,00 [ $f/m^3$ ]	13,50
opschuimende coating	0,5-1,0	80,00 [ $f/liter$ ]	15,00

#### Kosten voor het vullen van buiskolommen (prijspeil 1996).

vulling	materiaal- en loonkosten [ $f/m^3$ ]	materieel- en loonkosten [ $f/stuk$ ]
mortel (Spramex)	300 + 28 = 328,00	-
betonmortel (centrale) <sup>(a)</sup>	160 + 50 = 210,00	70 + 46 = 116,00
wapening 2% (korf)	350,00	33 + 23 = 56,00

a. Gestort per bouwlaag met stortkoker, kubel en 50-tons kraan; ploeg van 3 werklieden, 3 kolommen per uur.