

Dictaat Draagconstructies I



Prof. Ir. Rob Nijse

TU Delft, Faculteit Bouwkunde
Afdeling Architectural Engineering + Technology
Leerstoel Ontwerpen van Draagconstructies

Delft, november 2013

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Voorwoord | 5 |
| 2 | Wat is een constructie? | 6 |
| 3 | Ordering in het ontwerp | 7 |
| 3.1 | Coördinaten | 7 |
| 3.2 | Grid, stramien, assenstelsel | 7 |
| 4 | Basiseisen constructie, de drie S-en | 10 |
| 4.1 | Sterkte | 11 |
| 4.2 | Stijfheid | 16 |
| 4.3 | Stabiliteit | 19 |
| 5 | Hoofdtypes spanningen | 20 |
| 5.1 | Axiaal | 20 |
| 5.2 | Buiging..... | 21 |
| 5.3 | Afschuiving | 22 |
| 5.4 | Torsie of Wringing | 24 |
| 6 | Elementen van een constructie | 26 |
| 6.1 | Lineaire constructie-elementen | 26 |
| a. | <i>Balk of ligger</i> | <i>26</i> |
| b. | <i>Kolom</i> | <i>29</i> |
| 6.2 | Vlakke constructie-elementen | 31 |
| a. | <i>Vloer</i> | <i>32</i> |
| b. | <i>Wand</i> | <i>32</i> |
| c. | <i>Dak</i> | <i>32</i> |
| d. | <i>Gevel.....</i> | <i>32</i> |
| e. | <i>Balkenrooster</i> | <i>33</i> |
| 6.3 | Bijzondere constructie-elementen | 33 |
| a. | <i>Schoor en diagonaal (1D).....</i> | <i>33</i> |
| b. | <i>Onderspannen ligger</i> | <i>33</i> |
| c. | <i>Draad, Kabel en Ketting (1D)</i> | <i>34</i> |
| d. | <i>Net (3D).....</i> | <i>36</i> |
| e. | <i>Hanger of hangstaaf (1D).....</i> | <i>36</i> |
| f. | <i>Pyloon (1D)</i> | <i>37</i> |
| g. | <i>Vakwerk.....</i> | <i>37</i> |
| h. | <i>Vierendeel</i> | <i>39</i> |
| i. | <i>Boog (1D).....</i> | <i>40</i> |
| j. | <i>Koepel (3D)</i> | <i>43</i> |

| | | |
|-----------|---|------------|
| k. | <i>Schaal (3D)</i> | 44 |
| l. | <i>Membraan (3D)</i> | 45 |
| m. | <i>Sandwich plaat</i> | 47 |
| n. | <i>Paal</i> | 47 |
| o. | <i>Poer</i> | 47 |
| p. | <i>Console</i> | 48 |
| 7 | Belastingen | 50 |
| 7.1 | Types belastingen..... | 50 |
| a. | <i>Rustende belastingen</i> | 50 |
| b. | <i>Veranderlijke belasting</i> | 51 |
| c. | <i>Bijzondere belastingen</i> | 51 |
| 7.2 | Veiligheidsfilosofie | 51 |
| a. | <i>Normen</i> | 51 |
| b. | <i>Veiligheid en bruikbaarheid bouwconstructies</i> | 51 |
| c. | <i>Belastingen</i> | 53 |
| d. | <i>Voorgescreven belastingcombinaties</i> | 55 |
| e. | <i>Vervormingen</i> | 57 |
| f. | <i>Waarden voor eigen gewicht van bouwwerkdelen</i> | 58 |
| g. | <i>Waarden voor veranderlijke belastingen</i> | 58 |
| h. | <i>Belasting door regenwater; wateraccumulatie vermijden!</i> | 61 |
| i. | <i>Windbelasting</i> | 62 |
| j. | <i>Sneeuwbelasting op daken</i> | 67 |
| 8 | Opleggingen | 70 |
| 8.1 | Rol..... | 70 |
| 8.2 | Scharnier..... | 71 |
| 8.3 | Inklemming | 71 |
| 8.4 | 'Veer' | 72 |
| 9 | Bouwmaterialen | 74 |
| 9.1 | Hout | 75 |
| 9.2 | Metselwerk, natuursteen | 84 |
| 9.3 | Staal..... | 88 |
| 9.4 | Beton | 100 |
| 9.5 | Glas | 107 |
| 9.6 | Composiet..... | 108 |
| 10 | Balken | 111 |
| 10.1 | Overspannen vierkante ruimte..... | 111 |
| 10.2 | Slanke ligger versus gedrongen ligger..... | 116 |
| 10.3 | Overzicht momenten en vervormingen..... | 117 |
| 10.4 | Balken met een uitkraging | 119 |
| 10.5 | Doorgaande balken | 124 |
| 11 | Vloeren | 128 |
| 11.1 | Houten vloeren | 128 |
| 11.2 | Betonnen vloeren | 130 |
| a. | <i>Balkenvloer</i> | 131 |
| b. | <i>Vlakke plaatvloer</i> | 132 |
| c. | <i>Bollenvloer en Airdeck-vloer</i> | 133 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| d. | Cassettevloer..... | 136 |
| e. | Breedplaatvloer..... | 137 |
| f. | Kanaalplaatvloer..... | 138 |
| g. | Dubbel-T-liggers en andere (super)liggers..... | 141 |
| h. | Ribbenvloer..... | 143 |
| i. | Broodjesvloer of combinatie vloer..... | 145 |
| j. | PS-isolatie vloer..... | 146 |
| 11.3 | Stalen vloeren..... | 147 |
| 12 | Kolommen..... | 153 |
| 12.1 | Gewichtsberekening voor een gebouw..... | 154 |
| 12.2 | Knik bij kolommen..... | 156 |
| 13 | Stabiliteit..... | 160 |

| | |
|--|------------|
| Bijlage 1: Sterkte-eigenschappen constructiematerialen..... | 174 |
| Bijlage 2: Vergeet-mij-nietjes..... | 176 |
| Bijlage 3: Samenvatting vuistregels..... | 177 |
| Bijlage 4: Schattingsregels overspanningsconstructies..... | 178 |



Kariatiden in de gevel van de Winkel van Sinkel te Utrecht (1839).

1 Voorwoord

Dit dictaat is bedoeld voor de eerste en tweedejaars studenten van de Technische Universiteit Delft, afdeling Architectuur. Het richt zich op een belangrijk onderdeel van de Architectuur, de Draagconstructie. Immers, gaf de Romeinse architectuurschrijver Vitruvius rond het jaar 50 na Chr. al niet aan dat goede architectuur is opgebouwd uit drie delen: de Schoonheid (Venustas), de Bruikbaarheid (Commoditas) en de Stevigheid (Firmitas). Misschien dat in daar onze huidige tijd het begrip Prijs (Economitas?) aan toegevoegd mag worden. Firmitas (Stevigheid) dat is het begrip waar Draagconstructies zich mee bezig houdt. Behandeld worden alle uitgangspunten die van nut kunnen zijn om een student op weg te helpen om een mooie, functionele, stevige en economische draagconstructie voor hun ontwerpen te kunnen opzetten en, belangrijk, te kunnen integreren in hun architectonische ontwerp, zodat het eindresultaat beantwoord aan de drie (plus 1) eisen die Vitruvius stelde aan Goede Architectuur. Daarnaast is dit dictaat ook een belangrijke hulp bij het maken van de eerste- en tweedejaars ontwerpprojecten.

Voor de kwaliteit van dit dictaat ben ik veel dank verschuldigd aan ir. Jan Arends, die de lay-out van het dictaat heeft verzorgd en daarbij ook indirect heeft bijgedragen aan de inhoud van dit dictaat.

Naast dit dictaat kan de studenten ook informatie vinden op de blackboardsite van de Faculteit Bouwkunde, afdeling Architectural Engineering + Technology, leerstoel Ontwerpen van Draagconstructies. Verder is op het Internet bij de producerende firma van bouwmaterialen en onderdelen informatie te vinden maar vergeet nooit dat dit commerciële firma's zijn die gekleurde kennis ook gebruiken om hun producten beter te verkopen. Betrouwbaarder en objectief zijn de belangenverenigingen zoals:

Voor Staal: Bouwen met Staal, www.bouwenmetstaal.nl,

Voor Beton: De Betonvereniging, www.betonvereniging.nl,

Voor Baksteen / Metselwerk: www.knb-baksteen.nl,

En voor Hout: www.centrum-hout.nl.

Opgesteld juli 2011

Prof. Ir. Rob Nijssse

Technische Universiteit Delft.

2 Wat is een constructie?

Alle door de mens vervaardigde objecten zoals gebouwen, bruggen, tunnels, maar ook meubels, auto's, huishoudelijke apparaten etc. moeten een draagstructuur bezitten die de krachten oproepen door vooral de zwaartekracht (verticaal werkend) en de wind (horizontaal werkend) moet kunnen verwerken. Die draagstructuur kan het hele object zijn maar ook alleen een specifiek deel van het object, het skelet. Door dit woord: skelet te gebruiken wordt ook duidelijk dat de levende natuur zoals planten, dieren en ook mensen aan dezelfde wetmatigheden als een gebouw onderworpen zijn. Door de draagstructuren in de Natuur te bestuderen kunnen we nog heel wat leren, ook over de schoonheid van een draagstructuur. Maar dat valt, misschien helaas, buiten het kader van dit dictaat.

De draagstructuur van een gebouw kan er in zitten; als ware het echt een skelet, maar ook aan de buitenkant; dan noemen we het een exoskelet. Het is altijd opgebouwd uit specifieke onderdelen die weer op of aan elkaar aangesloten moeten worden om een samenwerkend geheel te vormen. Een skelet moet de er op uitgeoefende krachten uit de zwaartekracht of de wind (eigenlijk de lucht die tegen het gebouw aanbotst) afdragen naar de ondergrond, de fundering. Een belangrijk aspect dat nooit vergeten mag worden: de fundering. Hoe zit het gebouw, de constructie vast aan moeder Aarde? Geen goede fundering betekent een waardeloos, niet goed functionerend gebouw.



150 meter hoge toren voor het coördinatiecentrum rampen bestrijding haven Antwerpen. Ontwerp UNStudio. De toren is zo aerodynamisch mogelijk gemaakt en leunt ietwat in tegen de overheersend Zuidwesterstormen.

3 Ordening in het ontwerp

Het is handig, zowel voor de ontwerpende als de uitvoerende partij om in een ontwerp zo snel mogelijk een ordening aan te brengen. Alhoewel met de computer tegenwoordig alle vormen te tekenen en te maatvoeren zijn, zijn regelmaat en herhaling goede hulpmiddelen om de ontworpen vormen niet alleen te kunnen bouwen maar ook om de functionaliteit en de schoonheid te beïnvloeden. Hiermee wordt ook structuur en overzicht in het ontwerp gebracht en is de communicatie met andere partijen eenvoudiger.

3.1 Coördinaten

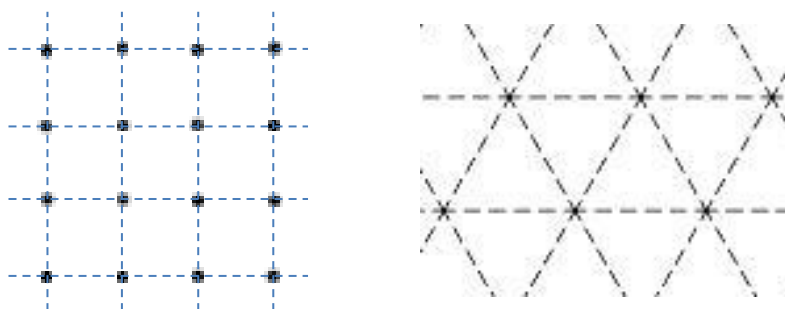
Elk punt van een gebouw is ruimtelijk vast te leggen door ten opzichte van een nulpunt (waar alle drie assen elkaar door snijden) de x-, de y- en de z-coördinaat vast te leggen. Door alle punten van een gebouw op tekening of in de computer vast te leggen kan het gebouw in werkelijkheid door de maatvoerders en hun apparatuur uitgezet worden en kan het gebouw gemaakt worden. Door de coördinaten liggen alle lengtes, breedtes en andere afmetingen van ieder gebouwonderdeel vast.

3.2 Grid, stramien, assenstelsel

Grid, stramien en assenstelsel zijn alle benamingen voor de ordening die we met maatvoering in een gebouw kunnen aanbrengen.

Grid of rooster is een stelsel van lijnen dat van een gebouw bijvoorbeeld de positie van de muren beschrijft.

Stramien geeft een regelmaat van herhalende lijnen op een vaste bepaalde afstand van elkaar aan. Een stramienmaat is een rekenmaat bij een gebouw waarop allerlei constructieonderdelen zijn afgestemd.



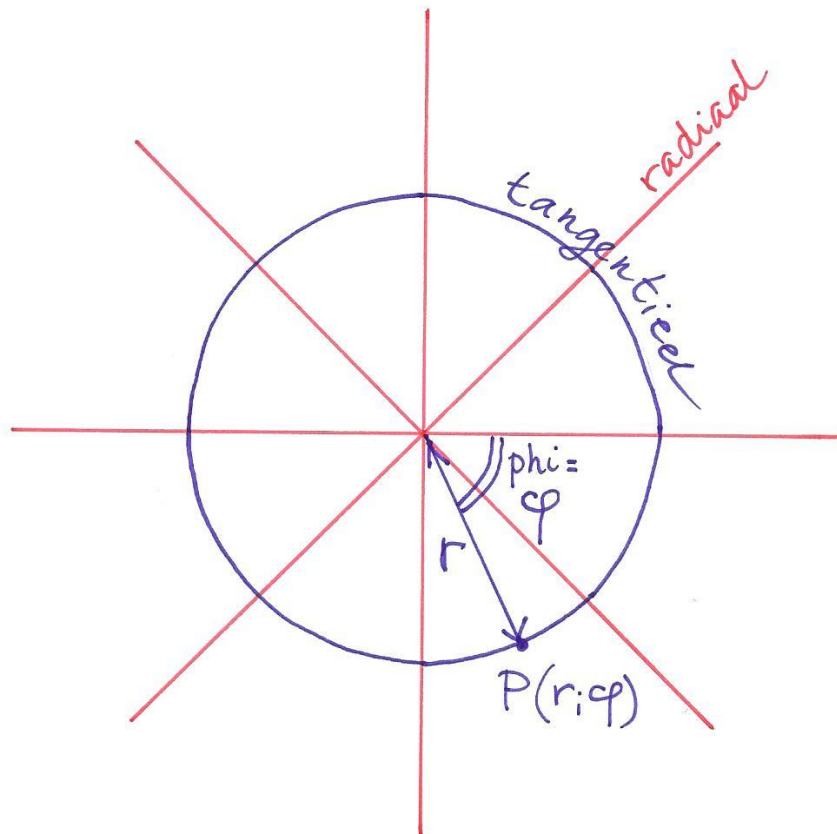
Vierkant en driehoekig rooster met constante stramienmaat.

Assenstelsel is een stelsel van drie assen die elkaar in een punt snijden, waarmee ieder punt ruimtelijk vastgelegd kan worden met afstanden tot de x, y en z-as. Het stelsel wordt gedefinieerd door een oorsprong en oriëntering. Het meest gebruikelijk is een assenstelsel met orthogonale (d.w.z. loodrecht op elkaar staande) assen.

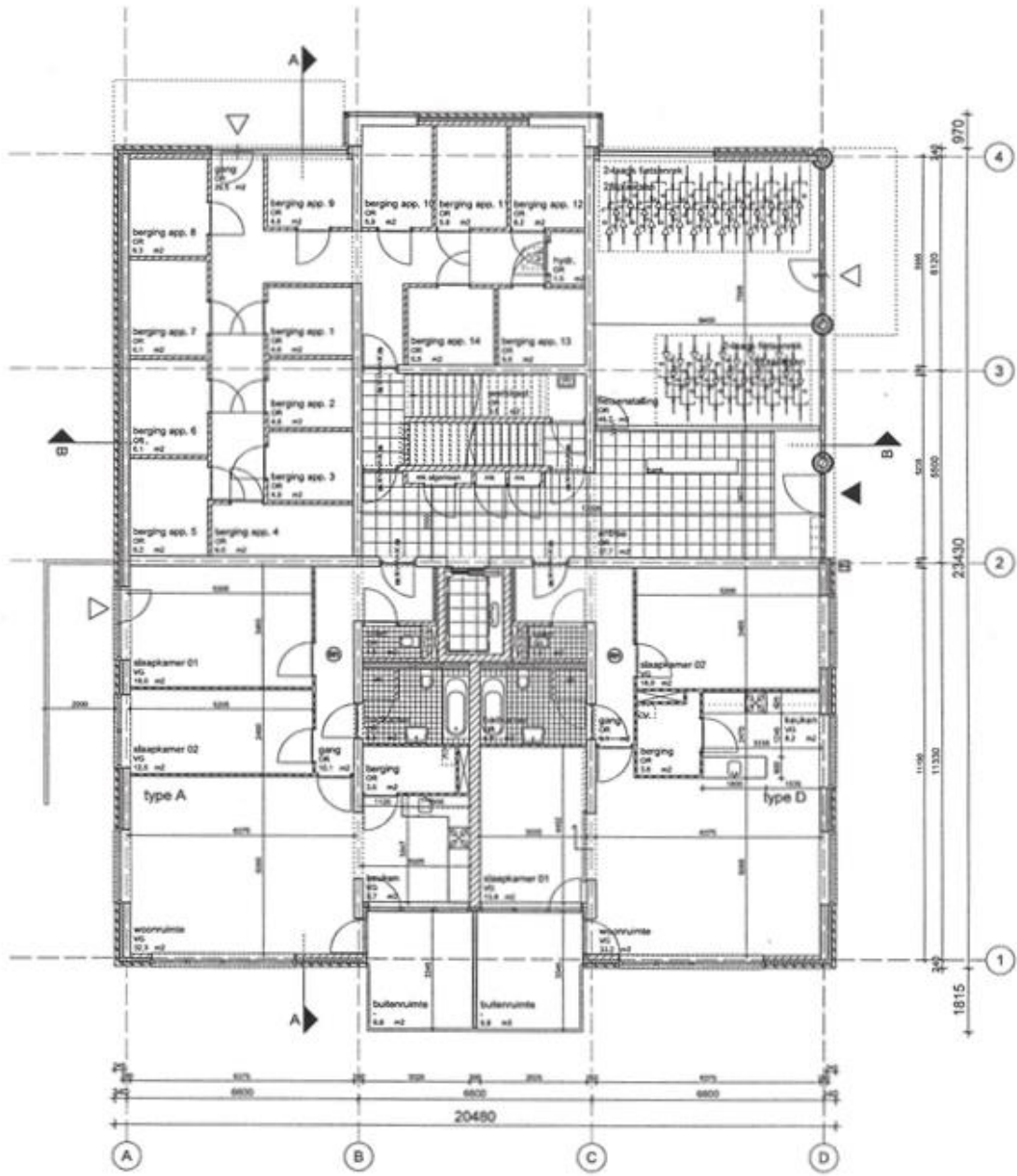
In een twee dimensionaal vlak spreken we bijvoorbeeld over het x-y vlak, het x-z vlak etc. De (op tekening) horizontale assen op een bepaalde afstand van elkaar noemen we de letterassen: A,B,C etc. De verticale assen op een bepaalde afstand van elkaar noemen we de cijferassen: 1,2,3 etc. Het snijpunt van de twee typen assen is weer een coördinaat, bijvoorbeeld B-12.

De afstand tussen de assen, het stramien, is meestal een vaste maat maar hij kan ook variëren (komt de regelmaat natuurlijk niet ten goede). In de huidige praktijk is het gangbaar deze afstanden in een veelvoud van 300 mm te kiezen. Dit komt voort uit de functionaliteit van tegels, balkbreedtes etc. waar de industrie zijn prefabricage op heeft afgestemd. Voor de afmetingen van ruimtes komt dit terug. Een goede maat voor een gang is 900 mm (3 keer 300 mm), een kantoor 4,50 meter (15 keer 300 mm), een woning 7,20 meter (24 keer 300 mm).

Een gebouw hoeft niet orthogonaal te zijn maar kan, in plattegrond bijvoorbeeld verlopen. De assen volgen dit verloop gewoon. Een gebouw kan ook uit cirkels zijn opgebouwd, (bijvoorbeeld een koepel) dan past een radiaal (straal cirkel) en tangentieel (afstand tot x-y-as gemeten over de cirkel)-assenstelsel. Een andere mogelijkheid voor een cirkelvormige plattegrond zijn de poolcoördinaten vanaf een middelpunt gedefinieerd met een afstand r en een hoek φ (phi).



Radiaal, tangentieel en poolcoördinaten.



plattegrond nivo 0

Plattegrond van een verdieping van een woongebouw met assen en maatvoering, ook is aangegeven waar doorsneden van het gebouw zijn gemaakt door middel van de aangepijlde (=kijkrichting op doorsnede) lijnen met vermelding A-A of B-B.

4 Basiseisen constructie, de drie S-en

Als een gebouw een goede constructie heeft dan voldoet die constructie aan drie basiseisen, te weten Sterkte, Stijfheid en Stabiliteit. Dit noemen we de S-en eis. Laten we eens aan de hand van het voorbeeld van een eenvoudige constructie; een plank over de sloot kijken wat dit betekent.



Plank over de sloot, die voldoet aan de drie S-en.

Een gezonde constructie, zoals de plank over de sloot hierboven waar de boerenjongen vrolijk fluitend over heen loopt, voldoet aan de drie criteria van de drie S-en.



Plank die niet voldoende sterk is.

De constructie is Sterk genoeg om de belasting die er in zijn verwachte levensduur op komt te dragen. De plank mag niet breken.
Algemener gesteld; de constructie mag zijn samenhang niet verliezen.



Plank die niet voldoende stijf is.

De constructie is Stijf genoeg om met een goed (comfortabel, geen natte voeten in dit geval) en veilig gevoel van de constructie gebruik te maken. De plank mag dus niet te veel doorbuigen. Algemeener gesteld: de constructie moet zijn vorm behouden. De constructie mag natuurlijk wel wat vervormen. Anders zouden de krachten niet via buiging afgevoerd kunnen worden. Besef dat wel goed: zonder vervorming geen draagvermogen!



Plank die onvoldoende stabiel is.

De constructie is Stabiel, dat wil zeggen dat een "toevallig" optredende horizontale kracht kan worden opgenomen. De plank mag dus niet omvallen; hier het omkiepen bij het plaatsen van de voet op de zijkant van de plank. Algemeener gesteld; de constructie mag niet omvallen of zijn positie verliezen.

Laten we dieper ingaan op ieder van de drie S-en.

4.1 Sterkte

Bezwijken, kapot gaan op sterkte, betekent het verlies van samenhang van het beschouwde onderdeel. Andere woorden hiervoor zijn breken (ten gevolge van buiging), scheuren (ten gevolge van trekspanning) of verbrijzelen (ten gevolge van

drukspanning). Een belangrijk toetscriterium voor de sterkte is de spanning in het materiaal. De spanning is de totale kracht in het onderdeel gedeeld door de doorsnede van het onderdeel. Een spanning heeft dus als dimensie $[N/mm^2]$: kracht F (= Force) $[N]$ (= Newton) gedeeld door oppervlak: A (= area) $[mm^2]$. Als uiterste grens voor een toelaatbare waarde in een materiaal geldt de 5% onderschrijdingskans van een groot aantal metingen aan de bezwijkspanning.

Statische achtergronden

De betrouwbaarheidsanalyse van normale bouwwerken geschiedt in de praktijk altijd volgens de semi-probabilistische methode. In deze methode spelen stochastische grootheden (= volgens de kansberekening) een belangrijke rol. Daarom behandelt deze paragraaf de belangrijkste basiskennis van een aantal statistische begrippen. Dat gebeurt aan de hand van een drukproef op de betonkubussen.

Drukproef

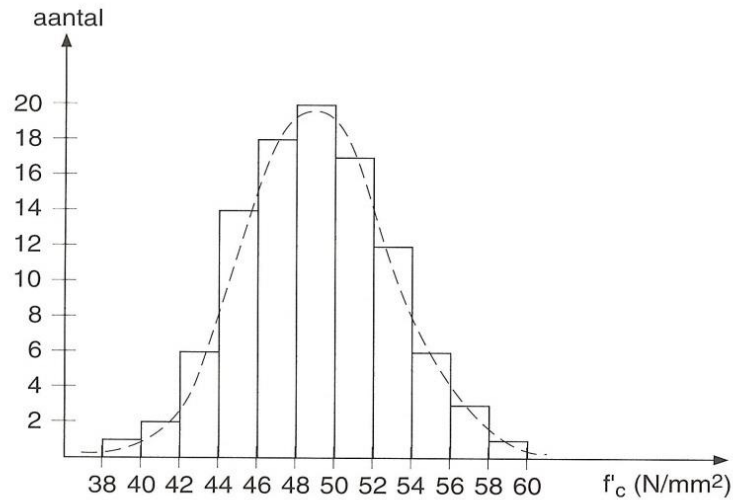
Het beton voor de proefkubussen komt uit een grote hoeveelheid betonmortel voor een bouwwerk (statistische term: *populatie*). Omdat we een goede indruk willen krijgen van de spreiding in sterkte, kiezen we voor het grote aantal van honderd kubussen (statistische term: *steekproef*). Alle kubussen worden in een drukpers beproefd. In onderstaande tabel zijn de gemeten waarden van de druksterkte gerangschikt in groepen, waarbij is gekozen voor intervallen van $2 N/mm^2$.

| druksterkte (N/mm^2) | n (aantal) | n/100 (relatief aantal) |
|-----------------------------|----------------|----------------------------|
| 38-40 | 1 | 0,01 |
| 40-42 | 2 | 0,02 |
| 42-44 | 6 | 0,06 |
| 44-46 | 14 | 0,14 |
| 46-48 | 18 | 0,18 |
| 48-50 | 20 | 0,20 |
| 50-52 | 17 | 0,17 |
| 52-54 | 12 | 0,12 |
| 54-56 | 6 | 0,06 |
| 56-58 | 3 | 0,03 |
| 58-60 | 1 | 0,01 |
| | $\Sigma = 100$ | $\Sigma = 1,00$ |

Tabel met druksterkte van 100 kubussen.

De waarden van deze tabel (aantallen en bijbehorende druksterkte) worden uitgezet in een diagram (statistische term: *histogram*). Het histogram geeft een duidelijk overzicht van de druksterkten die vaak en die weinig voorkomen. Wanneer het aantal kubussen nog veel groter zou zijn genomen en de intervallen van de druksterkte zouden zijn verkleind, ontstaat een vloeiende kromme. Deze kromme is aangegeven met een stippellijn en heet een kansdichtheidsfunctie.

Elke stochastische grootheid kan worden gedefinieerd in de vorm van een kansdichtheidsfunctie die de verdeling van de beschouwde grootheid weergeeft. Uit de statistiek is berekend dat er verschillende vormen voor deze verdeling bestaan.



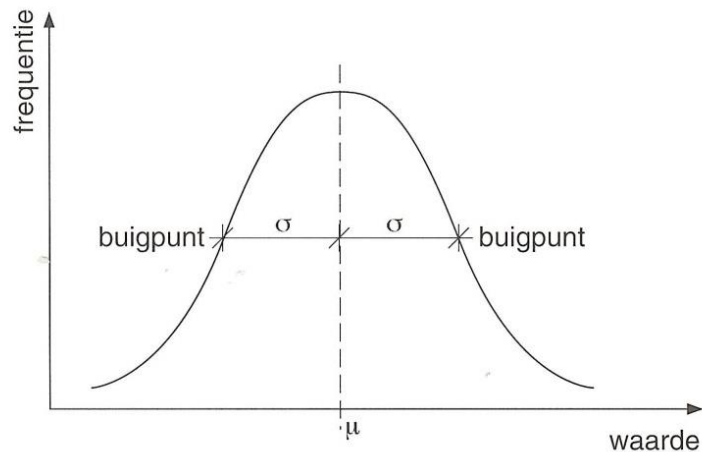
Histogram druksterkte.

Gausskromme

De meest voorkomende is de zogeheten *normale verdeling*, die bekend staat onder de naam *Gausskromme*. Gauss is een bekende wiskundige uit de 19^{de} eeuw, hij heeft onder andere ook de knik van drukstaven onderzocht.

Bij het beoordelen van de betrouwbaarheid van constructies spelen veel stochastische grootheden een rol. Uit ervaring weet men dat de meeste hiervan op verantwoorde wijze kunnen worden beschreven met een Gausskromme.

De kromme heeft een verticale as van symmetrie die samenvalt met de *gemiddelde waarde* (μ). Verder bezit de kromme twee buigpunten. De afstand van de symmetrieas tot een buigpunt heet de *standaardafwijking* (σ).



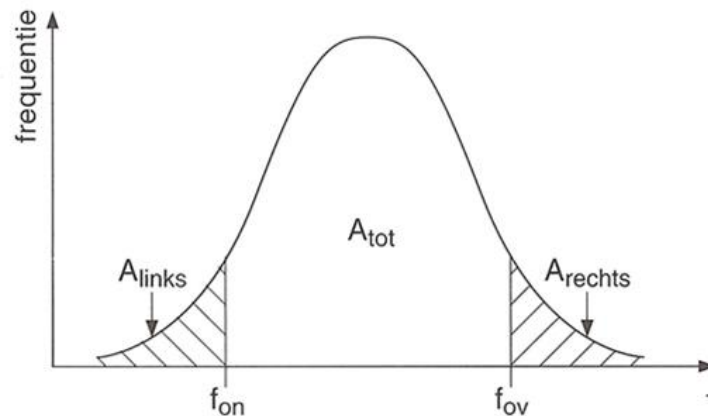
Gausskromme.

De grootheden μ en σ bepalen de vorm van de *Gausskromme* en dus ook de statistische verdeling.

De wiskundige formulering luidt:
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Let op: e is het grondtal van de natuurlijke logaritme. Het getal π (pi; $\pi \times$ de diameter van een cirkel is de omtrek) een zogenaamd irrationaal getal, een getal met achter de komma een oneindig aantal getallen. π is bijvoorbeeld 3,14159535... en e is 2,7182826535... Het getal e komen we later nog een keer tegen bij de formule voor de kettinglijn. Hier is het de bel-vorm die we weer kennen van de kerkklok, die op zijn beurt aangeslagen een perfecte toon produceert. Een bijzonder getal dus dat getal e .

Een maat voor de spreiding is de zogeheten *variatiecoëfficiënt* (V) dat is het quotiënt van het gemiddelde en de standaardafwijking.
Van belang is de *kans* (P) dat een bepaalde waarde wordt onderschreden respectievelijk wordt overschreden. Die kans wordt grafisch bepaald door op de horizontale as een verticale lijn op te richten in het punt dat overeenkomt met de beschouwde waarde. Uit de verhouding van het afgesneden oppervlak ten opzichte van het totale oppervlak onder de kromme volgt de *onderschrijdingskans* respectievelijk de *overschrijdingskans*.



Bepalen van de karakteristieke waarden.

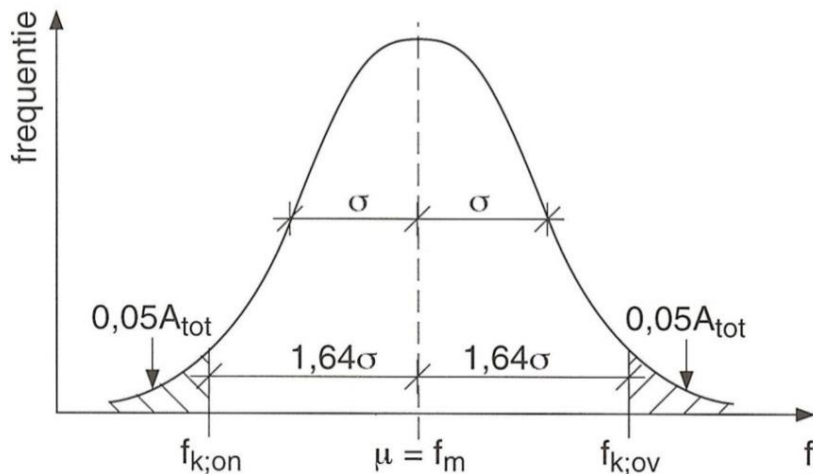
In formulevorm:

$$P_{on} = \frac{A_{links}}{A_{tot}} \times 100 \quad \text{en} \quad P_{ov} = \frac{A_{rechts}}{A_{tot}} \times 100$$

Hierin is:

- P_{on} onderschrijdingskans in procenten
- P_{ov} overschrijdingskans in procenten
- A_{tot} totale oppervlakte onder de Gausskromme ($A_{tot} = 1$)
- A_{links} oppervlakte onder de Gausskromme links van de grenslijn
- A_{rechts} oppervlakte onder de Gausskromme rechts van de grenslijn

Op deze manier kunnen wij ook de *5% onderschrijdingskans*, respectievelijk de *5% overschrijdingskans* definiëren, namelijk door de grenslijnen zo te kiezen dat geldt $A_{links} = 0,05A_{tot}$, respectievelijk $A_{rechts} = 0,05A_{tot}$. Met de formule voor de Gauss-kromme kan worden berekend dat de afstand van de grenslijn tot het gemiddelde μ dan gelijk is aan $1,64 \sigma$.



De karakteristieke waarde f_k van een grootheid komt overeen met de 5%-kans.

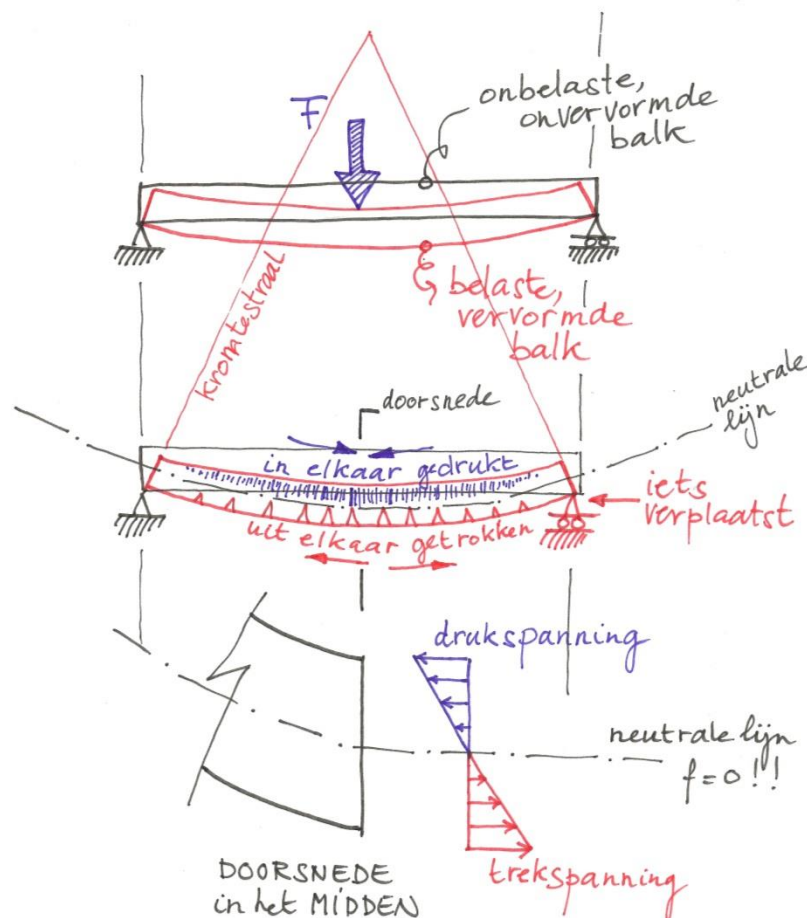
De toelaatbare spanning in een materiaal moet dus opgegeven worden als de 5% onderschrijdingswaarde gemeten door een groot aantal proeven conform de bestaande statistische methode. Voor de veiligheid moet deze waarden voor verschillende materialen nog gedeeld worden door de veiligheidsfactor. Dat hangt onder andere af van de gevoeligheid van het fabricage proces. Bij staal, een zeer gecontroleerd te produceren materiaal in de hoogovens, is deze veiligheidsfactor 1,00. Bij beton wat veel meer afhankelijk is van de bekisting, het mengselvervoer, het storten etc. moet deze factor op 1,40 gesteld worden. Zie het lijstje hieronder:

| Materiaalfactoren | | |
|--------------------------|-----------------------------|------------|
| Materiaal | Eigenschap | γ_m |
| Constructiestaal | Vloegrens | 1,00 |
| | Elasticiteitsmodulus | 1,00 |
| Beton | Druksterkte | 1,20 |
| Betonstaal | Treksterkte | 1,40 |
| | Vloegrens | 1,15 |
| Hout | Alle eigenschappen | 1,20 |
| Steen | Druksterkte | 1,80 |
| | Buigtreksterkte | 1,80 |
| Grond | Puntweerstand (palen) | 1,25 |
| | Hoek van inwendige wrijving | 1,15 |
| | Cohesie | 1,60 |
| Glas | Ongehard | 1,40 |
| | Gehard | 1,80 |

Voor alle duidelijkheid: dit is de *materiaal*-veiligheidsfactor, later krijgen we nog te maken met de *belasting*-veiligheidsfactor!

4.2 Stijfheid

Niet voldoen aan het criterium van de stijfheid betekent een *te* groot verlies van vorm. De constructie vervormt zoveel dat de bruikbaarheid of de veiligheid in het geding komt. Ook trillingen komen hierbij om de hoek kijken, soms wordt een constructie zo slap dat we het gevoel hebben op een schommel of veer te staan/lopen met alle gevaren van vallen erbij. Bedenk dat iedere constructie door zijn vervorming gaat dragen; dat wil zeggen als jij over een vloer loopt dan kan deze vloer alleen je gewicht dragen door te buigen. Dit kan zo weinig zijn dat je er niets van merkt maar er zal altijd een vervorming zijn. Dit stijfheidscriterium limiteert alleen de grootte van deze vervorming. Als we kijken welke invloeden de grootte van de vervorming beïnvloeden dan zijn dat vooral *de vorm van de doorsnede* van het beschouwde onderdeel en *het materiaal* waaruit de constructie is opgebouwd. Laten we eerst kijken naar de vorm van de doorsnede.



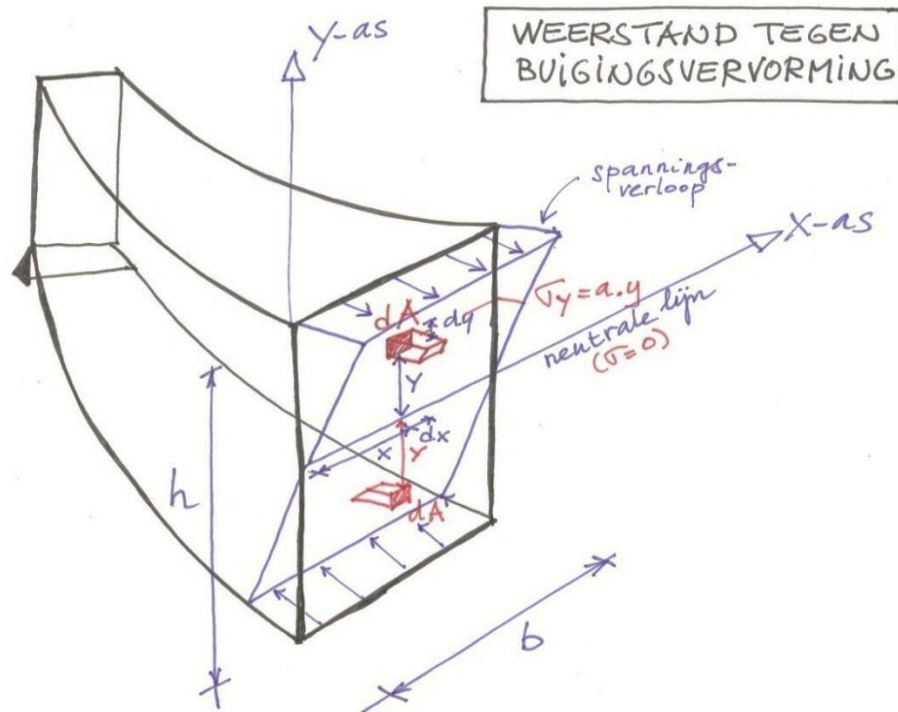
Invloed vorm van de doorsnede

Uit de beschouwing over buiging halen we dat in iedere doorsnede moet gelden:

- in het midden is de spanning nul; de neutrale lijn,
- aan de bovenkant is de spanning maximaal druk en
- aan de onderkant is de spanning maximaal trek.

De zones aan de randen van de doorsneden worden dus veel meer belast en leveren dus een grotere bijdrage aan het draagvermogen dan de zone middenin. Algemeen geldt dat hoe hoger de balk is hoe meer weerstand tegen buiging dus hoe stijver de balk is. Wij zullen afleiden dat dit zelfs met de derde macht van de hoogte gaat! De

breedte telt minder zwaar mee; dat gaat met de eerste macht: recht evenredig. De weerstand tegen buiging van een doorsnede drukken we uit als (oppervlakte) traagheidsmoment, tegenwoordig vaak kwadratisch oppervlaktemoment genoemd, aangeven met de letter I.



kracht op vlakje $dA = \sigma_y \cdot dA = a \cdot y \cdot (dx \cdot dy)$

$I =$ Totale weerstand tegen buiging is kracht \times arm verzameld over de hoogte h en de breedte b

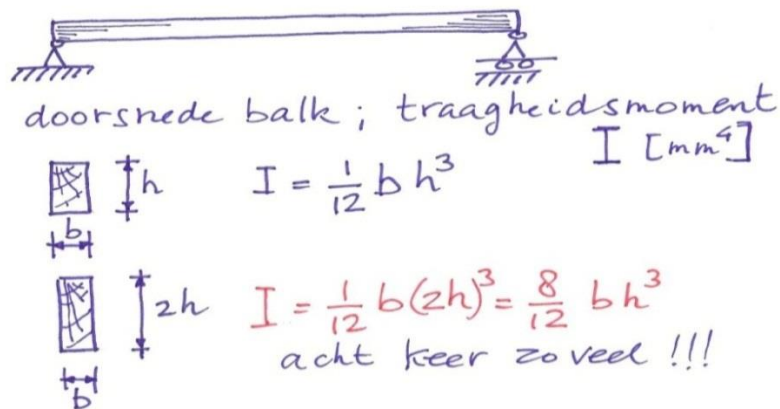
$$I = \int_{x=0}^{x=b} \int_{y=0}^{y=+\frac{1}{2}h} (\text{kracht}) \cdot (\text{arm}) = \int_{x=0}^{x=b} \int_{y=0}^{y=+\frac{1}{2}h} [a \cdot y \cdot (dx \cdot dy)] \cdot (zy)$$

$$I = \int_{x=0}^{x=b} dx \int_{y=0}^{y=+\frac{1}{2}h} 2 \cdot a \cdot y^2 \cdot dy = [x]_{x=0}^{x=b} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot a \cdot y^3 \right]_{y=0}^{y=+\frac{1}{2}h}$$

$$\boxed{I} = b \cdot \frac{2}{3} \cdot a \cdot \frac{1}{8} h^3 = \boxed{\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3}$$

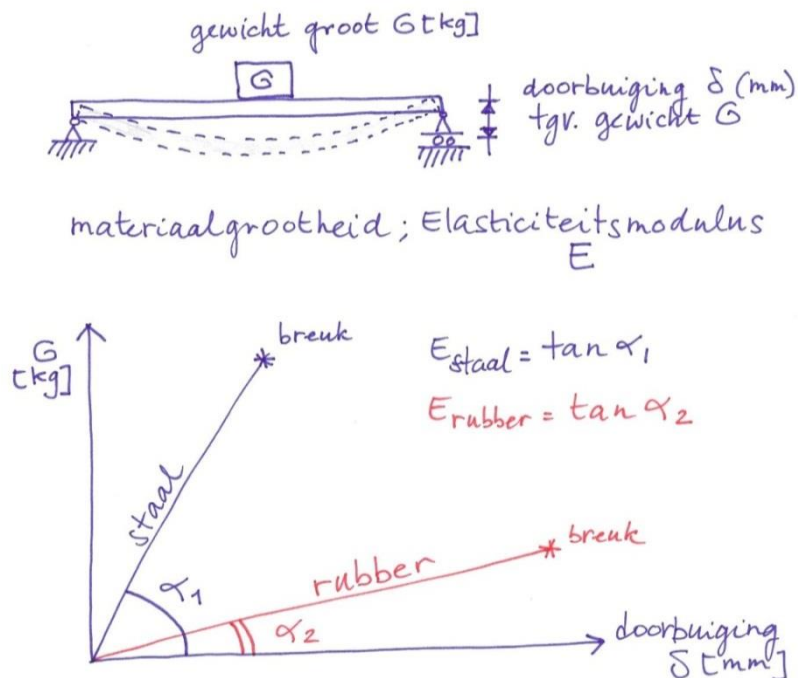
In de afbeelding hierboven is een theoretische afleiding te volgen, wel wat wiskundig maar op zich geeft dit aan hoe over de hele doorsnede de weerstand tegen buiging mobiliseert. Die weerstand tegen vervorming kun je zien als het indrukken van het materiaal in de drukzone en uitrekken van het materiaal in de trekzone. Elk klein oppervlakte dA levert een bijdrage en gesommeerd over de hele doorsnede geeft de weerstand van al die oppervlaktes bij elkaar het traagheidsmoment I . Die weerstand per oppervlakte dA is de kracht (=spanning ter plekke maal oppervlak) vermenigvuldigd met afstand tot de neutrale lijn, eigenlijk de arm van de kracht; we bepalen dus weer een moment. In de figuur wordt het kwadratisch oppervlaktemoment van een rechthoekige balk ($b \times h$) afgeleid. Dat blijkt $1/12 \cdot b \cdot h^3$ in formule vorm te moeten zijn, dimensie dus meter tot de vierde! Van een balk met een breedte van 1 meter en een hoogte van 2 meter is het oppervlakte traagheidsmoment dus $8/12$ is $0,667$ meter⁴.

De invloed van de doorsnede wordt duidelijk als we de vervorming van een lichte balk beschouwen versus de vervorming van een zware balk. De weerstand tegen vervorming wordt uitgedrukt in het oppervlakte traagheidsmoment I , die bepaald wordt door de hoogte en de breedte van de doorsnede (zie figuur). Interessant is dat de hoogte veel zwaarder telt dan de breedte van een balk immers de breedte zit er voor de 1^{ste} macht in maar de hoogte voor de 3^{de} macht. Een 2 keer zo hoge balk is dus $2^3 = 8$ keer zo stijf! En om een balk twee keer zo stijf te maken, hoeft de hoogte maar 26% (3^{de} machtswortel uit 2) hoger te zijn.



Invloed van het materiaal.

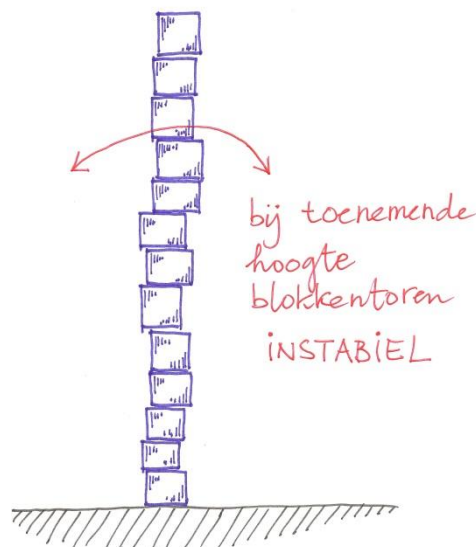
De invloed van het materiaal wordt duidelijk als we een stalen balk en een rubberen balk op buiging gaan belasten. De stalen balk zal ook bij grote belasting nog maar weinig vervormen, de rubberen balk begint meteen met grote vervormingen te laten zien. Wij drukken deze materiaaleigenschap uit in de zogenaamde Elasticiteits- of E-modulus, de tangens van de hoek uit de vervormingsgrafiek.



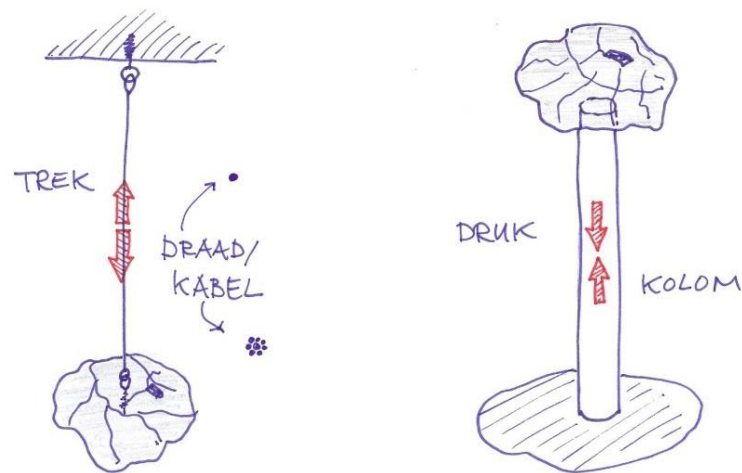
Grafiek waarin de doorbuiging van een balk (op de horizontale as) tegen het toenemende gewicht op de balk (op de verticale as) is uitgezet.

4.3 Stabiliteit

We noemen verlies van standzekerheid, zoals omvallen of kantelen, een stabiliteitsprobleem. We willen natuurlijk niet dat onze gebouwen omvallen. Daarom stellen we dat onze gebouwen stabiel moeten zijn. Dat wil zeggen dat een klein zetje niet tot een onherroepelijk omvallen of kantelen mag leiden. *Eigenlijk is stabiliteit de eigenschap dat een constructie weerstand kan bieden aan horizontale krachten.* Stabiliteit is een verraderlijke eigenschap die we als kleuter al hebben leren kennen toen we een aantal blokken tot een torentje probeerden te stapelen. Dat bleek moeilijk. Als we de blokken precies boven op elkaar leggen en iedere blok perfect vlak is dan kunnen we een heel hoge toren opstapelen. De werkelijkheid leert dat dit nooit het geval is, al snel zal de toren "wiebelig" worden. Dat geldt niet alleen voor een blokkentoren maar ook voor een moderne hoogbouw; hoe goed de aannemer zijn best ook doet. Kolommen staan nooit precies loodrecht boven op elkaar maar verspringen steeds een stukje waarbij ze ook altijd nog een beetje scheef staan. Heel dat scheef en niet boven op elkaar staan roept horizontale krachten op en als die niet door een mechanisme (= deel van de constructie) kunnen worden opgenomen dan valt de constructie om. Daarnaast kunnen er krachten op een gebouw worden uitgeoefend die van nature al horizontaal werken. In onze streken is dat vooral de wind of beter gezegd een storm die het gebouw wil doen omvallen. In het buitenland komt daar de aardbeving bij. Het meest kritische aan een aardbeving is eigenlijk het horizontaal bewegen van de grond. Eigenlijk blijft het gebouw door zijn traagheid staan en wordt de ondergrond, de fundering er onder vandaan getrokken. Verder kunnen horizontale krachten nog worden opgeroepen door aanrijdingen of explosies.



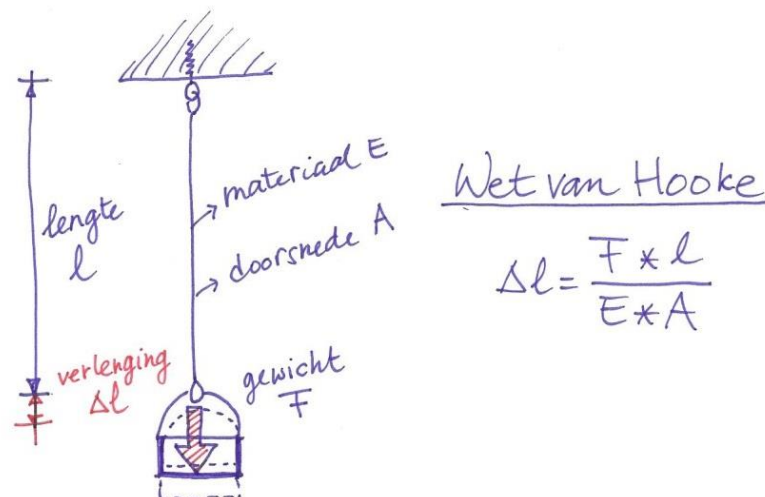
5 Hoofdtypes spanningen



5.1 Axiaal

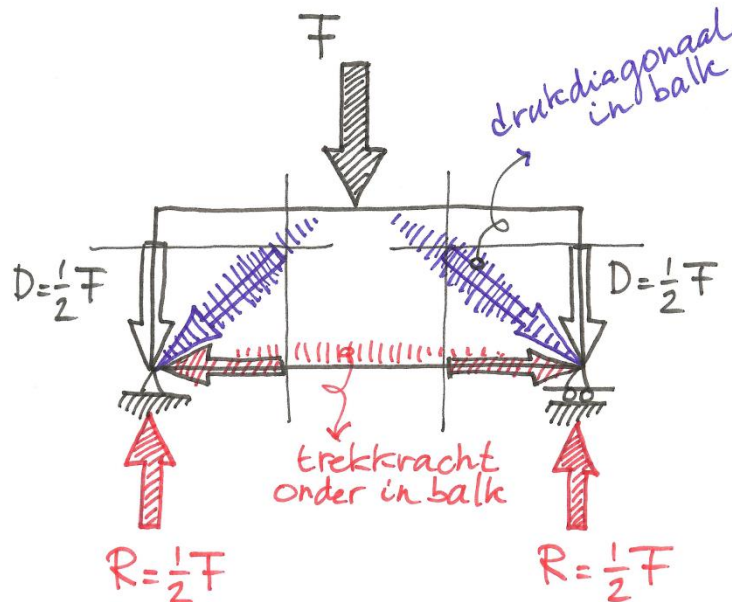
We kennen twee hoofdtypes kracht in deze lineaire elementen (die dus maar één as hebben) trek en druk. De kolom typeert de drukkracht in een axiaal element, de kabel typeert de trekkracht in een axiaal element. Attentie voor het feit dat een kolom wel een trekkracht kan opnemen maar een kabel zeker geen druk. Drukkrachten in kolommen kunnen aanleiding geven tot het bezwijken op knik; de enige manier van bezwijken van een constructie die wij kennen die opeens optreedt. Omdat het opeens optreedt, is het een gevaarlijk mechanisme, zonder waarschuwing knikt een kolom uit als de belasting op de kolom bijvoorbeeld van 900 kN tot 901 kN toeneemt. Op het knikken van kolommen komen we later nog uitgebreid terug.

Voor de vervorming in een axiaal element, zoals een kabel, geldt de wet van Hooke. Een kabel is het samenstel van een aantal draden tot één element, meestal gewonden draden. Een draad voldoet krachten technisch gesproken aan de wet die de Engelse geleerde Thomas Hooke in de 17de eeuw afleidde. Uit experimenten leidde hij af dat de stijfheid van een draad afhangt van de lengte van de draad (l [m]), de dikte (oppervlakte doorsnede draad, A [m^2]), het materiaal van de draad (Elasticiteitsmodulus, E [N/mm^2]) en natuurlijk de kracht, het gewicht dat aan de draad is opgehangen.



5.2 Buiging

De balk kan enkel en alleen functioneren op het krachtoverdracht-systeem van 'buiging'. Door het gewicht van de belasting buigt de balk door en juist door die buiging kan de balk, als ware het een veer, de belasting terugduwen, dus weerstand bieden tegen de belasting en de krachten die op de balk werken.

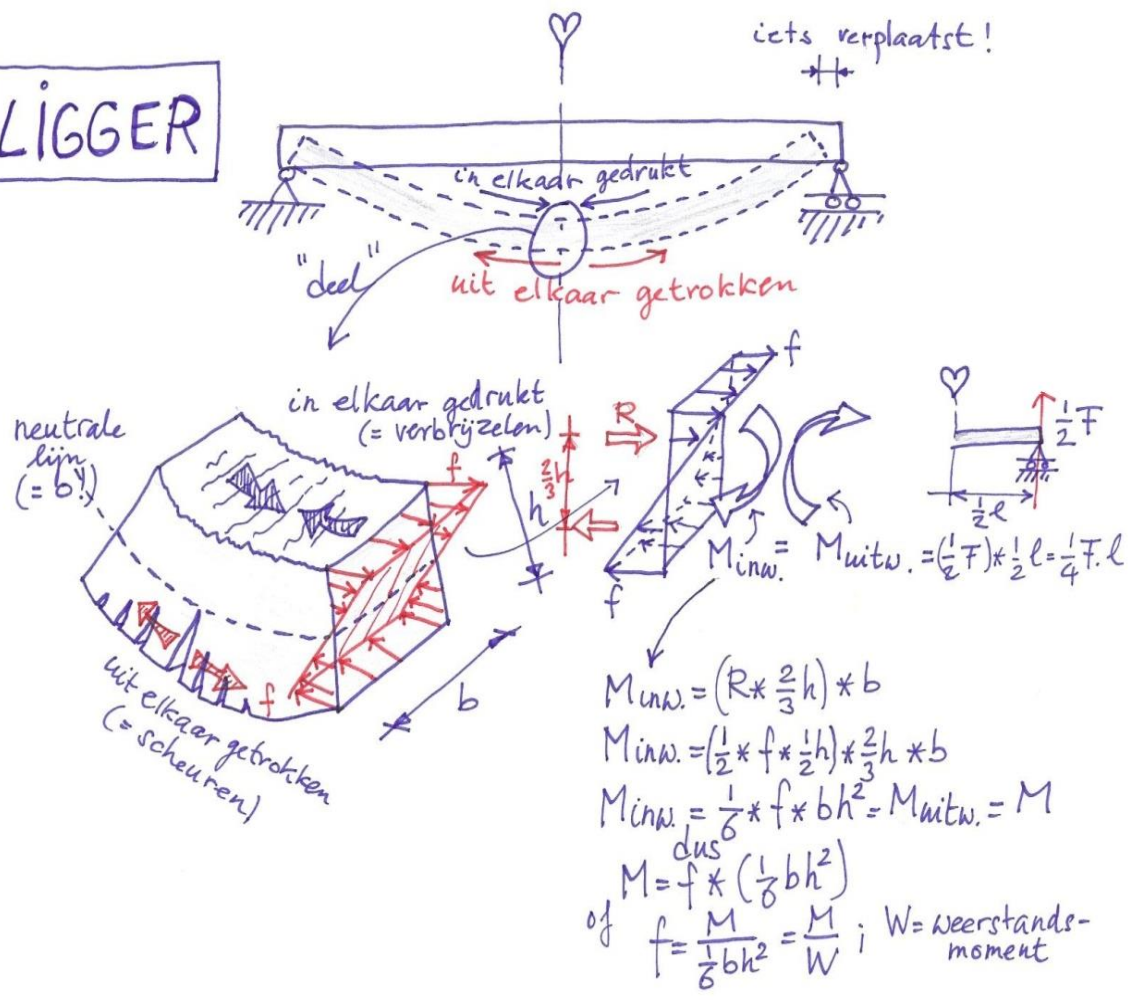


Eigenlijk loopt het gewicht van het zware object dat op de balk staat door de hoogte van de balk heen naar de oplegpunten om daar aangekomen via de rest van de constructie naar de fundering, Moeder Aarde, afgevoerd te worden. Een ingewikkelde, geforceerde manier om krachten af te voeren waarbij de constructie heel anders gebruikt wordt dan een boog, waarin vooral drukkrachten optreden. Het werkt echter in de bouw heel gemakkelijk met balken. Sinds onze voorouders ontdekten dat in iedere boomstam een balk zit verborgen, zijn de kolommen, vloeren en daken van ieder huis en ieder gebouw uit balken samengesteld.

Buiging roept drukspanningen aan de bovenkant van de balk op en trekspanningen aan de onderkant. In het midden van de balk zijn de spanningen in het materiaal van de balk nul! Dat noemen we de neutrale lijn van een balk. Omdat de spanningen hier nul of klein zijn, kan je in het midden van een balk altijd een gat boren om er een leiding of kabel doorheen te laten lopen.

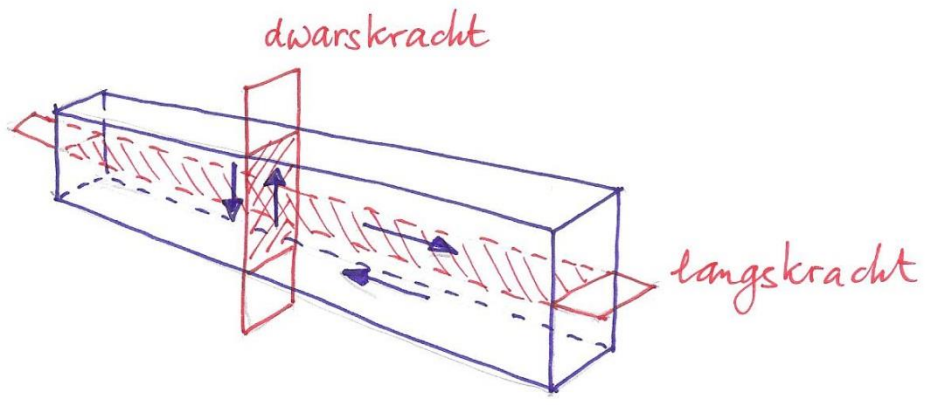
De drukspanningen aan de bovenkant en de trekspanningen aan de onderkant geven in de balk een buigend moment; we noemen dit het inwendige moment. Vanwege de noodzaak van evenwicht moet dit inwendige moment gelijk zijn aan het uitwendige moment dat op de balk staat. Dit is het best voor te stellen door de oplegreactie als uitwendige kracht te zien en die met de hefboomsarm tot het punt waar je je doorsnede hebt genomen te vermenigvuldigen; dit is het uitwendige moment. In de figuur hierna is dit afgebeeld en kunnen we een formule afleiden om het spanningsniveau in de balk te kunnen berekenen.

LIGGER



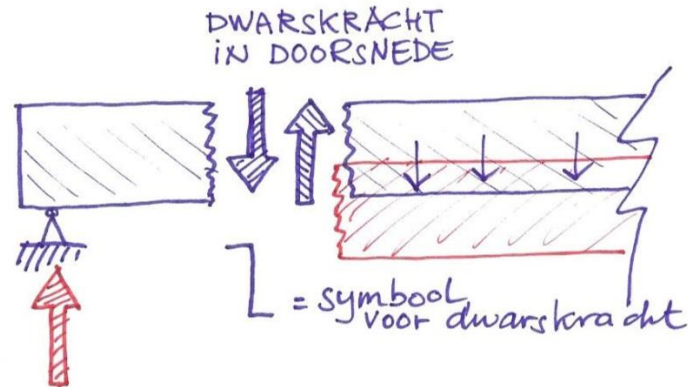
5.3 Afschuiving

Van de kracht afschuiving zijn er twee hoofdtypes die eigenlijk familie zijn maar zich in twee onderlinge loodrechte vlakken in de balk manifesteren. Het eerste is afschuiving in een vlak loodrecht op de balkas en de bijbehorende afschuifkracht noemen we de dwarskracht. Het tweede is afschuiving in een vlak evenwijdig aan de balkas en de hierbij horende afschuifkracht noemen we langskracht.

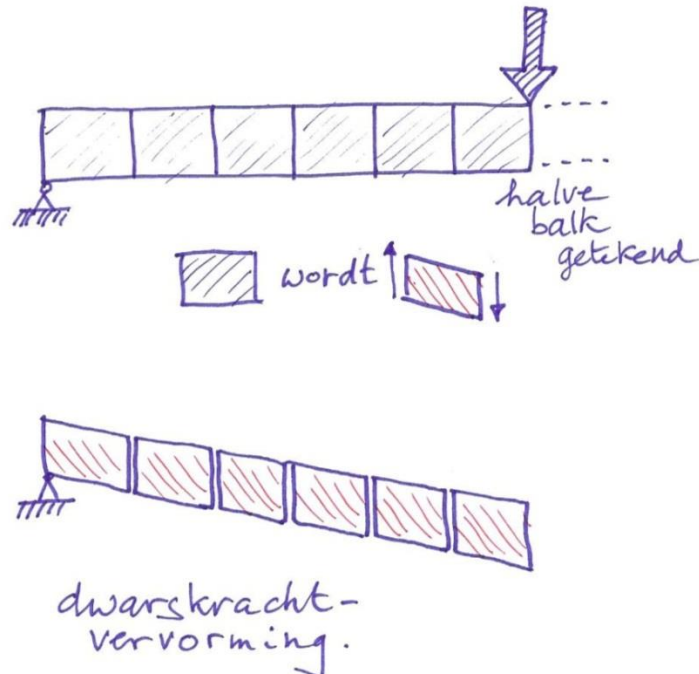


Dwarskracht

Het eerste type afschuiving is dus die ten gevolge van de dwarskracht. Naast een buigend moment zal namelijk nog een andere component door de balk van het aangrijpingspunt van de belasting tot het oplegpunt moeten reizen door de hoogte van de balk en dat is de dwarskracht. Deze kracht doet, dichtbij het oplegpunt de balk als het ware afschuiven. Als de balk zou bezwijken op dwarskracht dan zou het middendeel er gewoon tussen uit vallen!



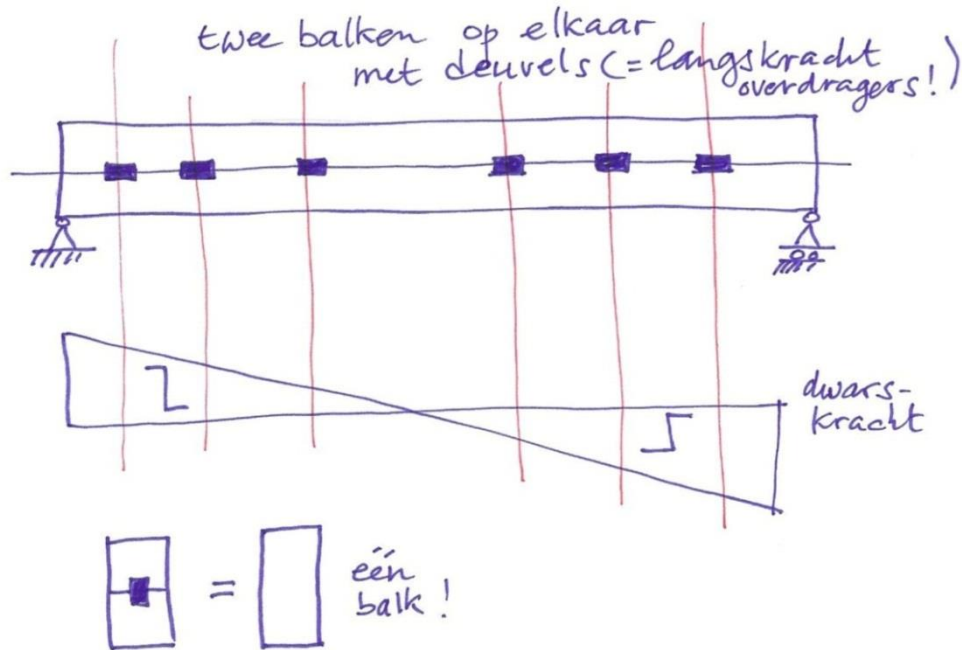
Ook veroorzaakt de dwarskracht een kenmerkende vervorming. Denken we de balk als het ware samengesteld uit allemaal rechthoekige blokjes naast elkaar dan zal ieder blokje ten gevolge van de dwarskracht tot een scheef blokje vervormen. Voor buiging zien we dus een vervormingslijn als een gebogen lijn; bij vervorming ten gevolge van dwarskracht is dit een rechte lijn!



Langskracht

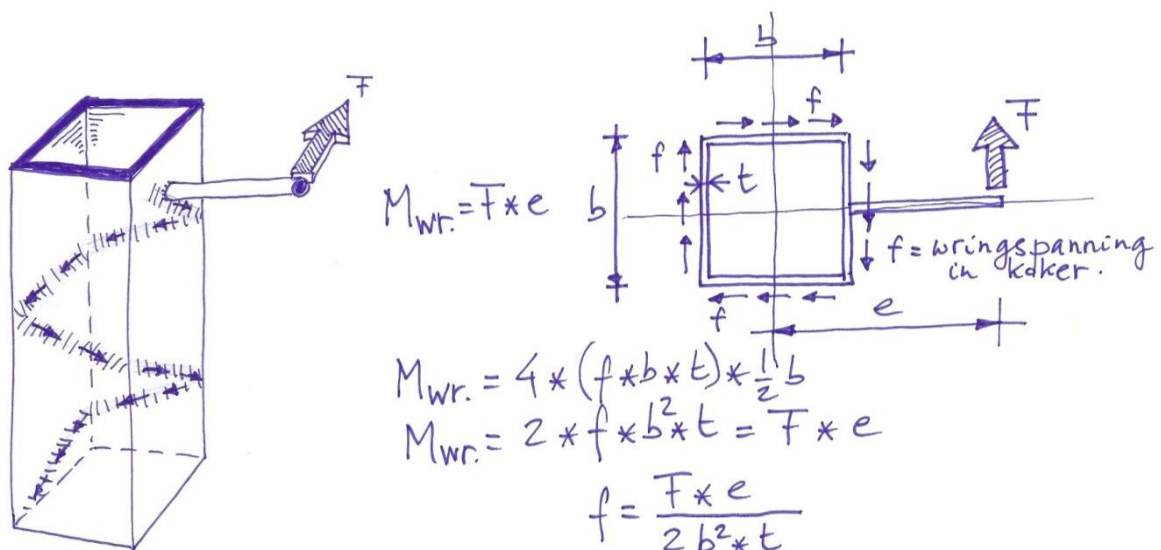
Het tweede type van afschuiving is de langskracht. Deze kracht werkt in een vlak evenwijdig aan de balk boven- of onderkant. Klinkt een beetje mysterieus maar het beste kun je hier een beeld van maken door twee balken los op elkaar te leggen. Ga je deze twee balken in het midden belasten met een groot gewicht dan zal je zien dat de twee balken over elkaar heen gaan schuiven. Hier manifesteert de langskracht zich als

een zichtbare verplaatsing. Als de twee balken goed aan elkaar vast zouden kleven, bijvoorbeeld met een sterke lijm, dan is er geen verschuiving te zien maar wordt de langskracht met schuifspanningen in het materiaal opgenomen. De grootte van de langskracht is afhankelijk van de dwarskracht, dat betekent dat in het midden van een overspanning de langskracht nul is en bij de opleggingen de maximaal mogelijke waarden bereikt. Een andere manier om die samenwerking te bereiken is met deuvels; houten blokjes die de langskracht over de voeg tussen de twee balken heen transporteren.

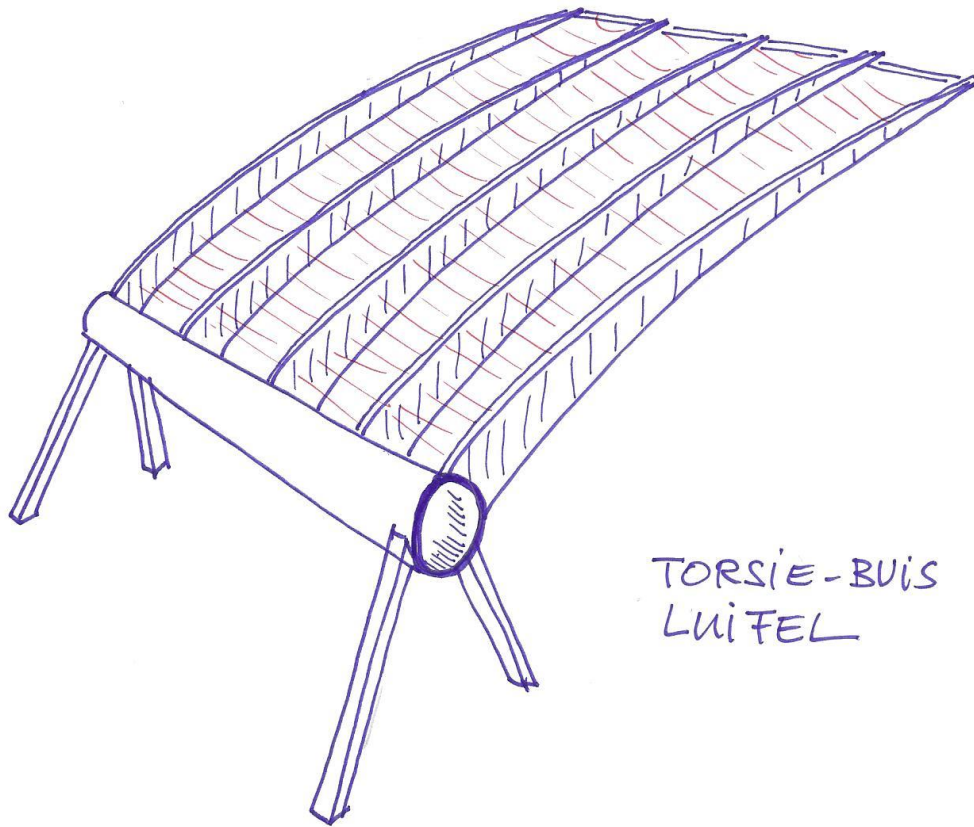


5.4 Torsie of Wringing

Wringing, met een duur woord torsie, is een moeilijk begrip. Het is een vorm van afschuiving. Het komt niet vaak voor in de bouw maar als het optreedt is het altijd vervelend en leidt tot dikke constructies. Eigenlijk kan alleen een gesloten constructie-element als een massieve balk, een buis of een koker wringing opnemen; een open profiel als een plaat, een H-balk of een I-balk niet. Onderstaand figuur laat zien hoe de wringspanningen als het ware door de koker naar beneden "spiralen".



Een leuke toepassing van het torsie principe is te zien bij de torsie-buis luifel. Een eenzijdig uitkragende luifel doet een grote buis torderen. Daar kan de buis, zie hiervoor, goed tegen! En zal weinig vervormen. Door twee keer een stabiele tweepoot eronder te zetten maken we een echte luifel.



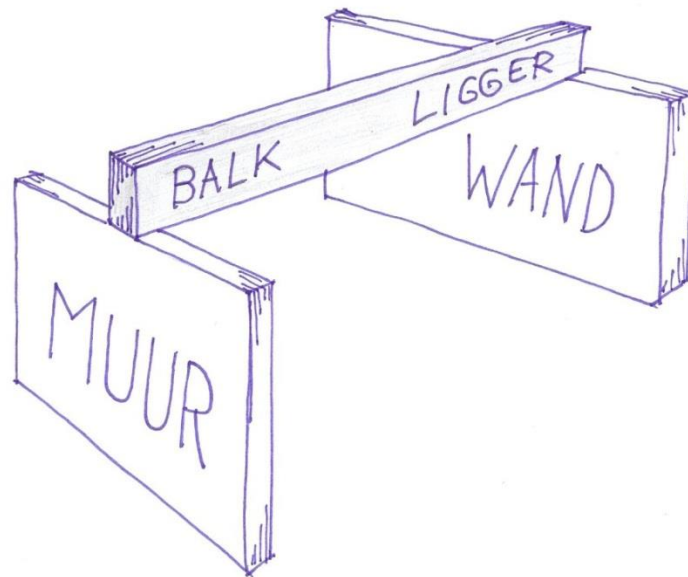
TORSIE-BUIS
LUIFEL

6 Elementen van een constructie

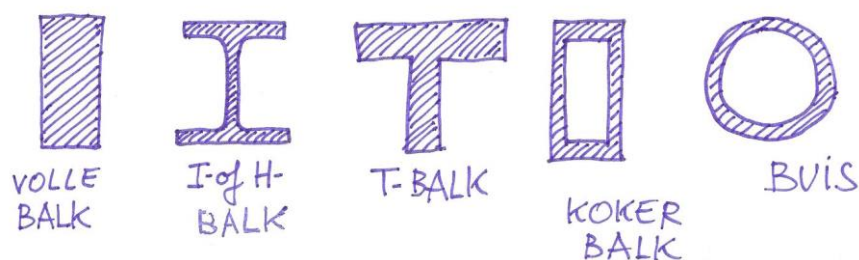
Laten we een overzicht geven van alle constructieve elementen die een architect ter beschikking staan om een gebouw van te maken.

6.1 Lineaire constructie-elementen

(1 dimensie; lengte)



De twee basis constructie-elementen waaruit een gebouw opgebouwd kan worden: balken en muren of, om de spraakverwarring compleet te maken, liggers en wanden (maar betekent vrijwel hetzelfde!)



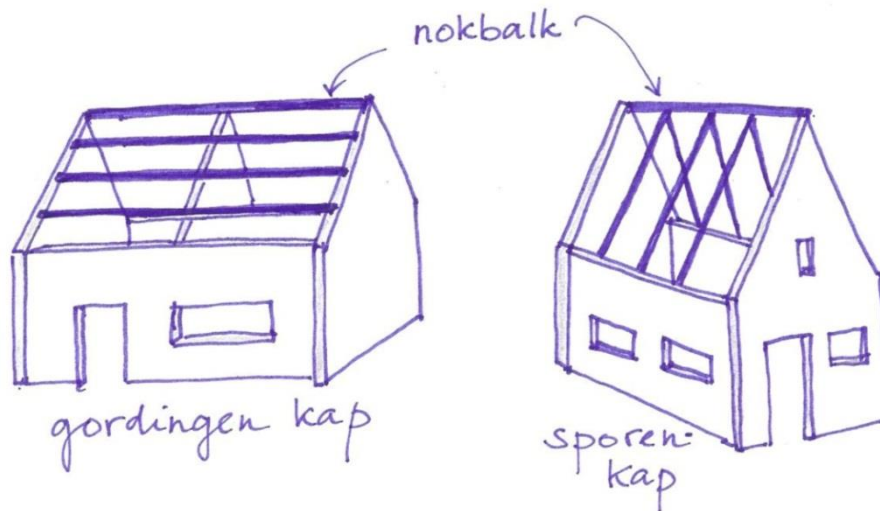
Typen balk die wij in de bouw kennen, meestal genoemd naar hun vorm.

a. Balk of ligger

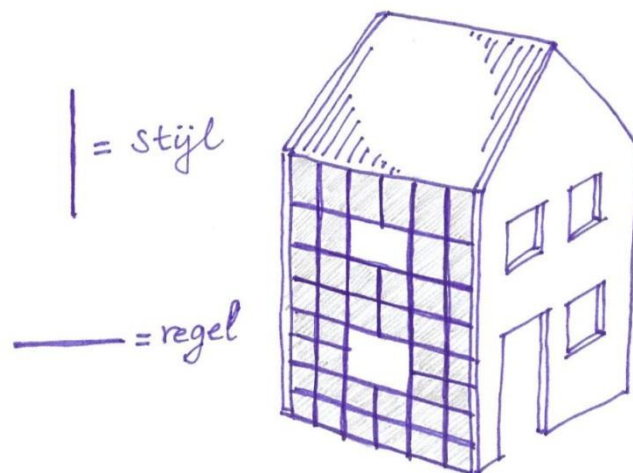
Een *balk* is een lineair element in een horizontaal of onder een helling gelegen vlak. Wordt ook wel *ligger* genoemd, bijvoorbeeld in een vloer. Een horizontale balk evenwijdig aan de goot of de nok van een schuin dak wordt *gording* genoemd. Ook de secundaire balken in een plat dak noemt men gordingen. Een schuin omhoog lopende balk (loodrecht op de nokbalk) heet *spoor*. Een horizontale balk in een gevelvlak noemt men een *regel*, het lineaire element er loodrecht op heet een *stijl*. Boven een opening in een muur of gevel heet een balk een *latei*.



"Clapper"-bridge een meer dan 3000 jaar oude natuurstenen brug in Devon, Engeland.



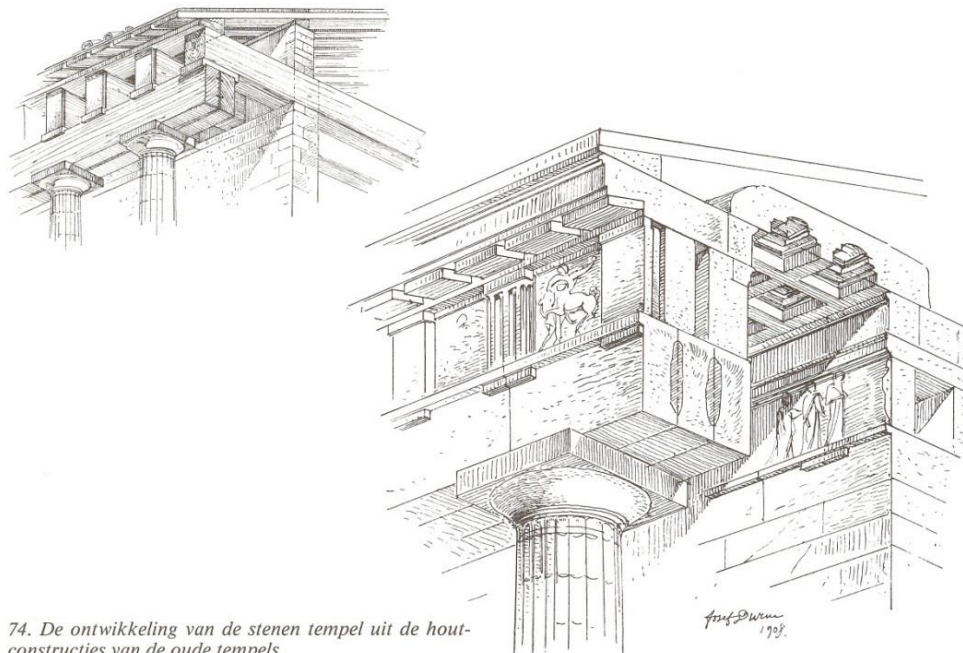
Namen van balken in een dakvlak.



Namen van de balken en kolommen in een gevelvlak.



De Akropolis in Athene, het Parthenon, de tempel van de godin Pallas Athena, natuurstenen balken op stenen kolommen, geen grote overspanning maar toch één van de eerste stenen en daarmee duurzame bouwwerken van de mens.

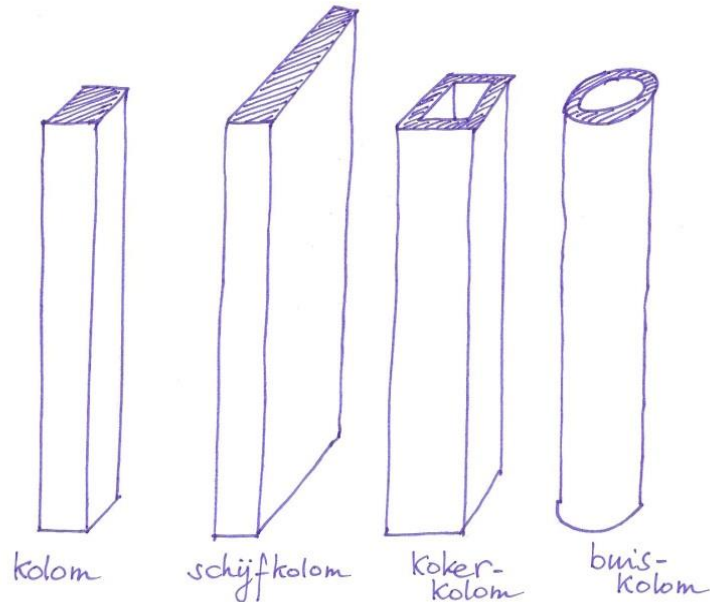


74. De ontwikkeling van de stenen tempel uit de houtconstructies van de oude tempels.

In deze figuur is te zien hoe de stenen vormen zijn ontstaan. Het zijn eigenlijk in steen uitgevoerde houtconstructies. Het verhaal gaat dat de groeven in de kolommen (cannelures) een weerspiegeling zijn van het uiterlijk van de bast van de heilige eiken waaruit de eerste (toen nog houten) tempels werden opgebouwd.

b. Kolom

Een *kolom* is een lineair element in een verticaal vlak. Kolommen kunnen echter ook wel eens schuin staan, dan noemen we het meestal een schoor. Een echte kolom heeft een vrijwel vierkante vorm, tot $b \leq 2 h$. Is deze vrijwel rechthoekige kolom in doorsnede hol dan spreken we van een *koker*. Een kolom kan in doorsnede rond zijn, dan spreken we van een *buis* (hol) of een *staaf* (massief). Bij een rechthoekige kolom waarbij $b > 2 h$ spreken we van een *kolomschijf*. Een hoge alleenstaande kolom noemen we een *pyloon*.



Overzicht van de soorten kolommen die wij kennen.



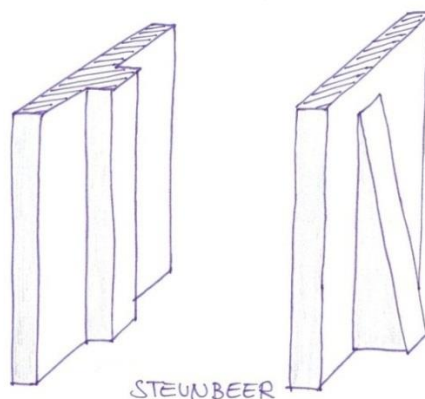
Het skelet van een gebouw in China, duidelijk is te zien dat de kolommen de vloeren dragen.

Een kolom kan vele vormen aannemen, dezelfde doorsnede over de hele hoogte van de kolom of juist verlopend; van heel smal naar dik in het midden etc. etc. Het mooiste wordt dit geïllustreerd door de mensengestalten die het dak van een oude Grieks tempel, het Erechthion op de Akropolis in Athene, dragen. Dit zijn de Kariatiden, jonge vrouwen die het dak van de tempel dragen.



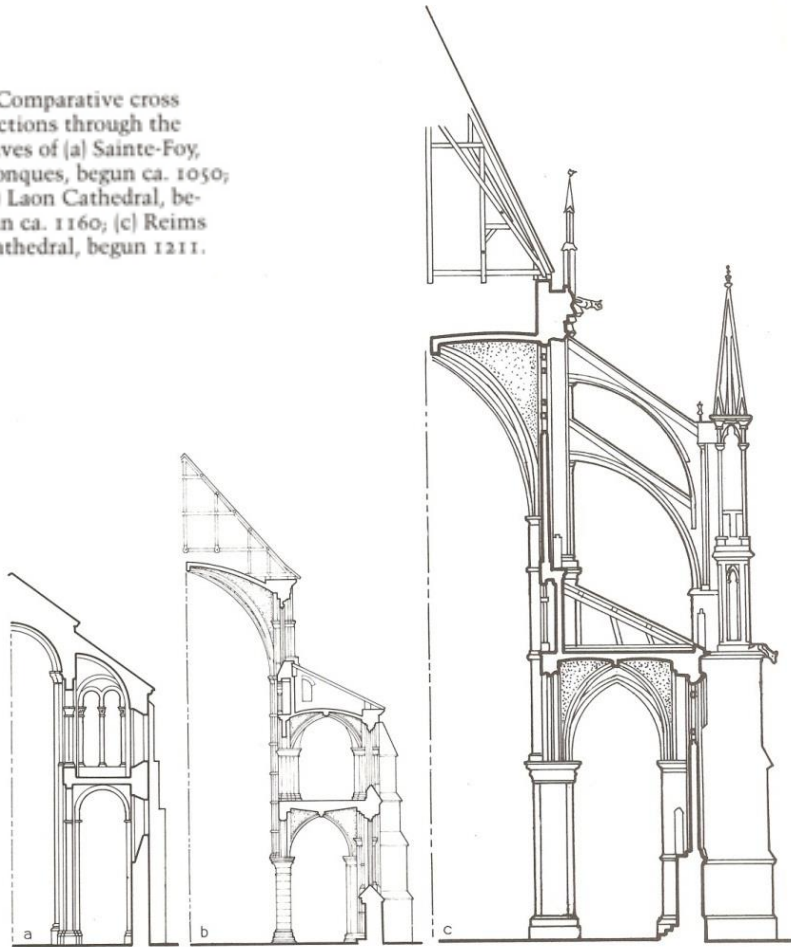
Akropolis in Athene, de kariatiden die het dak van de Erechthion tempel dragen.

Een verdikking in een stenen muur heet een *steunbeer*, soms ook wel *penant* genoemd. Deze laatste benaming wordt echter vooral gegeven aan een smalle strook muur tussen bijvoorbeeld twee raampartijen. Een steunbeer kan ook schuin lopen.



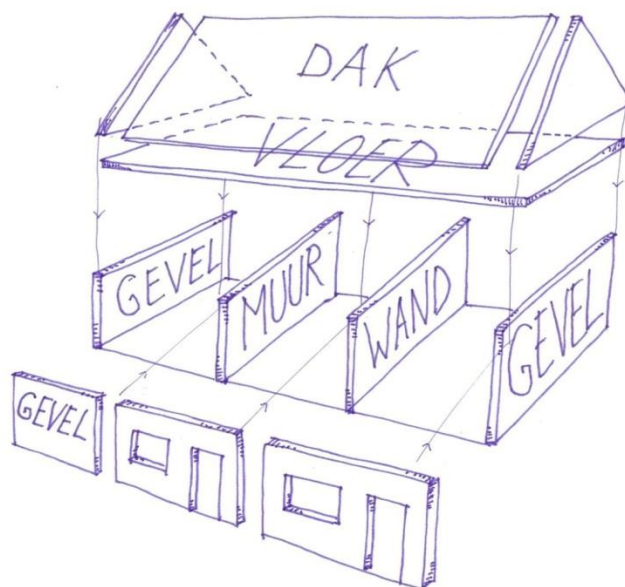
Van cruciaal belang bij de toenemende hoogte van de muren is de opnamecapaciteit van de horizontale krachten uit de spatkrachten van het dak en, natuurlijk, de windbelasting. Daarom zien we bij gotische kathedralen steunberen die steeds breder werden, luchtbogen die een tweede muur inschakelen en zelfs torentjes (genaamd pinakels) om extra drukkracht in de muren te krijgen.

1 Comparative cross sections through the naves of (a) Sainte-Foy, Conques, begun ca. 1050; (b) Laon Cathedral, begun ca. 1160; (c) Reims Cathedral, begun 1211.



De ontwikkeling van de draagconstructie van de Gotische Kathedralen.

6.2 Vlakke constructie-elementen (2 dimensies; lengte en breedte)



a. Vloer

Een vloer is een uit een bepaald materiaal opgebouwde plaat die horizontaal of onder een helling ligt, deze helling liever niet meer dan 5% (1 op 20) anders is er bijna niet op te lopen. De vloer dient meestal ook als scheiding van gestapelde ruimtes, dit kan de opbouw beïnvloeden. Onze vloeren zijn meestal uit beton, staal of hout of combinaties opgebouwd. Vloeren worden vooral op buiging belast.

b. Wand

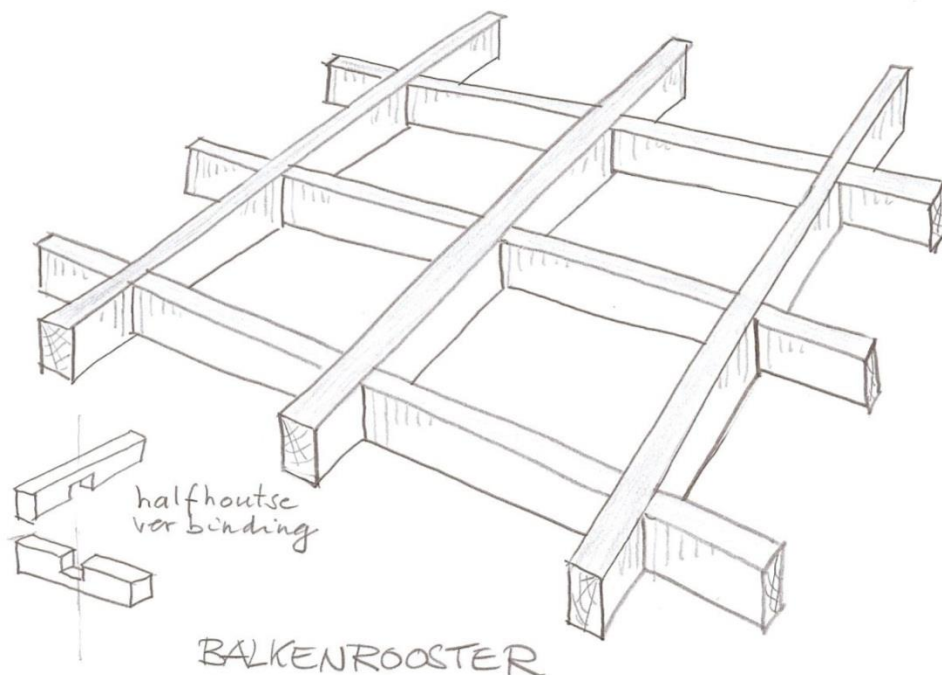
Een wand is een uit een uit een bepaald materiaal opgebouwde plaat die verticaal of onder een kleine helling staat, een niet te grote helling anders kan een wand snel kapot gaan omdat hij wil omvallen. Een wand dient ook meestal als scheiding tussen ruimtes, dit kan doordat het gebruik van de ruimtes bepaalde eisen stelt, zoals vrieshuis, parkeergarage etc, de opbouw beïnvloeden.. Een wand kan uit beton, staal, houten balken bekleed met platen of metselwerk vervaardigd worden. Een stenen wand wordt gewoonlijk muur genoemd. Wanden worden meestal op normaalkracht, op druk belast.

c. Dak

Een plat dak is eigenlijk de bovenste vloer. Het enige verschil is dat het dak de overgang van binnen naar buiten in zich draagt. Dit geeft extra eisen die aan dit bijzondere type vloer gesteld worden. Denk hierbij aan sneeuwbelasting, regenwater bij stortbuien en belasting door mensen bij reparatie en onderhoud. Waterdichtheid is een andersoortig maar wel belangrijke eis aan een dak.

d. Gevel

De gevel is niets anders dan een wand of muur. Net als bij een dak geldt dat door de overgang van binnen naar buiten er bijzondere eisen aan dit speciale type muur/ wand gesteld worden. De belangrijkste belasting voor een gevel is de wind belasting, deze belasting moet door de gevel opgenomen worden en aan de hoofddragconstructie door gegeven worden. Ook de gewenste waterdichtheid en winddichtheid stellen eisen aan een gevel.



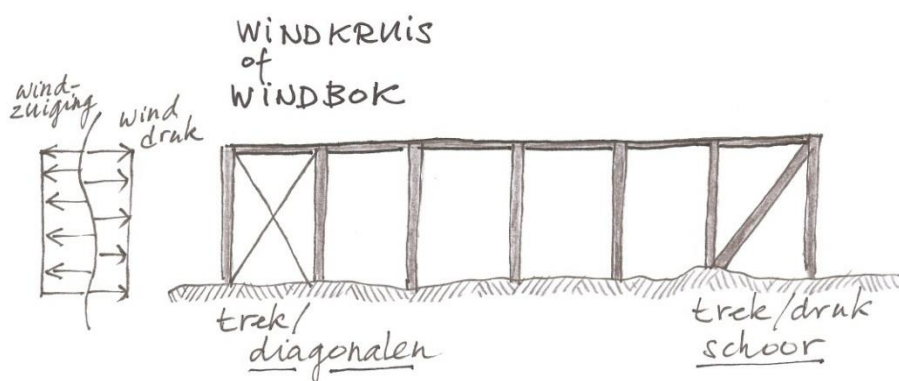
e. Balkenrooster

Normaliter leggen we balken, de lineaire elementen, allemaal naast elkaar, bijvoorbeeld op een muur. Maar ze hoeven niet allemaal evenwijdig te liggen. Ook mogen ze verlopen qua onderlinge afstand en zelfs loodrecht op elkaar staan, ze vormen dan een 2 dimensionaal rooster. De vloer die op de balken komt te liggen zorgt voor de eigenlijke vloerfunctie.

6.3 Bijzondere constructie-elementen

Hieronder vallen alle constructie-elementen die hiervoor niet aan de orde zijn gekomen. Het is een bonte verzameling maar geeft goed aan uit welke catalogus de architect kan putten om zijn gebouw vorm te geven.

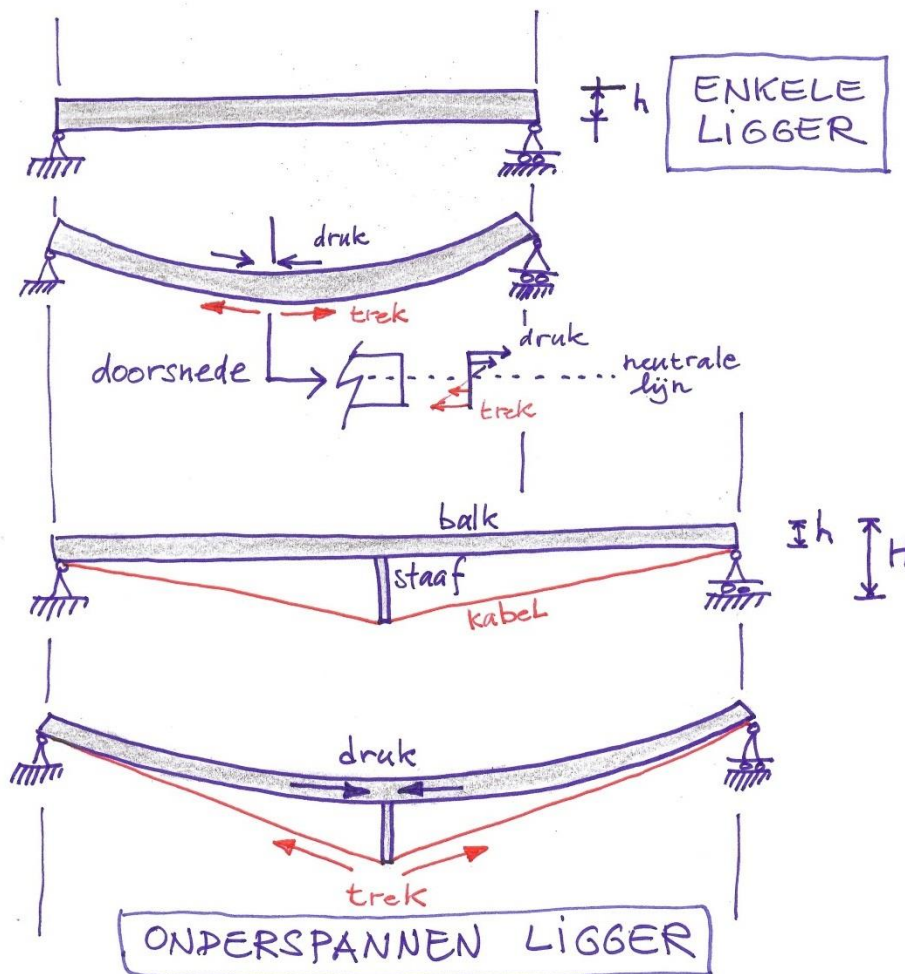
a. Schoor en diagonaal (1D)



Elk gebouw moet horizontale krachten kunnen opnemen anders valt het bij de eerste de beste horizontale belasting als een kaartenhuis in elkaar. Schoren betekent, taalkundig, iets verstevigen door er een paal of balk scheef tegen aan te zetten zodat het niet meer kan omvallen. Dit laatste geeft al aan dat een *schoor* stabiliteit geeft, lees: weerstand kan bieden tegen horizontale krachten. Een schoor kan zowel druk- als trekkrachten opnemen vandaar dat één schoor voor beide windrichtingen, zowel van links als van rechts voldoende is. Omdat er drukkrachten moeten worden opgenomen moet een schoor dik genoeg zijn om voldoende weerstand tegen knikken te bezitten. Een *diagonaal* is een schoor die alleen trek kan opnemen. Daarom zijn er altijd twee nodig: één voor de wind van links en één voor de wind van rechts. In een laagbouw staan de boven afgebeelde diagonalen bekend als een *windkruis* of een *windbok*.

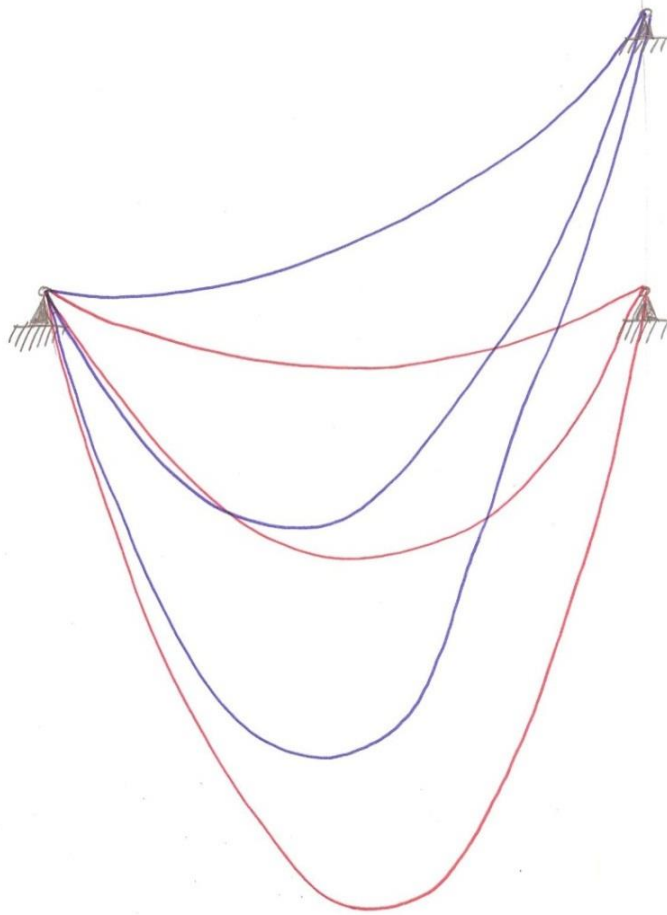
b. Onderspannen ligger

Als een balk te slap is of te veel doorbuigt voor een bepaalde overspanning kunnen we een hogere (en daardoor sterkere) balk uitkiezen maar we kunnen ook de te slappe balk met relatief weinig materiaal versterken (zie afbeelding volgende pagina). Met alleen een klein drukstaafje en een kabel kunnen we de balk eenvoudig tot wel drie keer zo sterk maken. Dat gaat als volgt; zet het drukstaafje in het midden onder de balk vast. Span vervolgens de kabel vanaf het oplegpunt links onder het drukstaafje langs naar het rechter oplegpunt. Op deze wijze heb je de hefboomhoogte van de balk (= afstand tussen uiterste druk- en trekzone) enorm verhoogd en daardoor ook de capaciteit, het draagvermogen van de balk. Een simpele en goedkope manier om een balk te versterken of te verstijven.



c. Draad, Kabel en Ketting (1D)

Een *draad* is een dun, lang element van een materiaal gemaakt. Een draad kan alleen trekkrachten in het verlengde van zijn aslijn opnemen. Op druk of op buiging stelt een draad constructief niets voor. Een *kabel* is een constructie element dat ontstaat als een aantal draden om elkaar gewikkeld worden. Meestal zijn dit stalen draden maar de draden kunnen ook van touw of kunststof zijn. Door het aantal draden op te voeren wordt de zo ontstane kabel steeds sterker (en dikker). Kabels kunnen alleen trekkrachten opnemen, zelfs hele grote, maar altijd alleen werkend in de richting van de as van de kabel. Op druk belast werkt een kabel niet; hij knikt dan al heel snel uit. Ook in dwarsrichting heeft een kabel geen draagvermogen, of hij moet zich zo vervormen dat de uitwendige kracht weer door trekkrachten in de kabel kan worden opgenomen. Een ander woord dat ook wel eens voor kabel wordt gebruikt is een *tui*. Vooral in een constructie met kolommen, balken en kabels noemen we een kabel een tui. Zo kennen we tui-constructies die vooral bij grote hallen en grote bruggen worden toegepast.



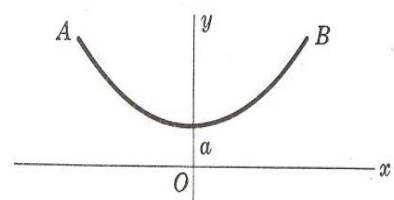
KABELVORMEN
door variatie lengte + hoogte steunpunt

Zoals bij de tekeningen te zien is, gaat een kabel in de bepaalde vorm hangen. Deze vorm lijkt op een parabool maar is het niet! De wiskundige formule heet de kettinglijn, zo genoemd naar een *ketting*, een lange rij losse schakels die in elkaar grijpen. Ook een ketting kan alleen trekkrachten opnemen en, door de schakels, totaal geen buiging. Wiskundigen hebben met behulp van begrip hoe een ketting werkt, kunnen afleiden wat de wiskundige formule is. Het is wel een complex verhaal dat gebruik maakt van een bijzondere wiskundige vorm, het getal e . Het getal e tot de macht x geeft in grafiekvorm een lijn te zien die constant en gelijkmatig groeit. Tellen we twee e -machten bij elkaar op dan krijgen we de kettinglijn (catenary in het Engels). Als figuur zie je dat ook wel zich aftekenen.

CATENARY

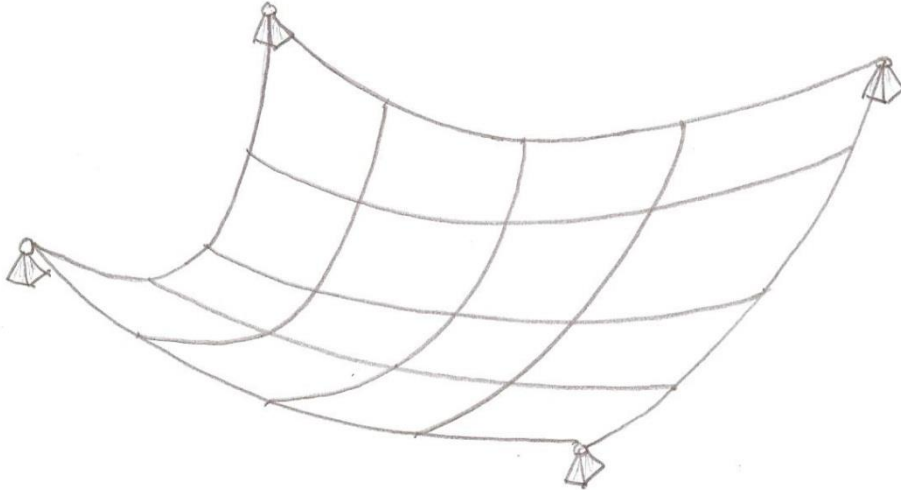
Equation: $y = \frac{a}{2} (e^{x/a} + e^{-x/a}) = a \cosh \frac{x}{a}$

This is the curve in which a heavy uniform chain would hang if suspended vertically from fixed points A and B .



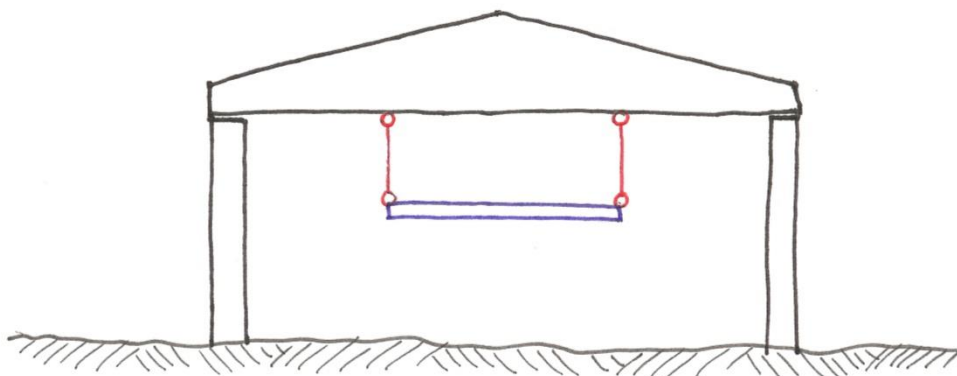
d. Net (3D)

Een net is een combinatie van kabels in twee richtingen door elkaar gevlochten. Strak gespannen kan het grote trekkrachten in meerdere richtingen opnemen. Eigenlijk is een net de 2 dimensionale variant van de kabel. Een net kan echter ook hangen, een drie dimensionale variant waarbij een ander mechanisme voor draagvermogen gaat zorgen; de membraan werking. Voor de werking, zie hierna.



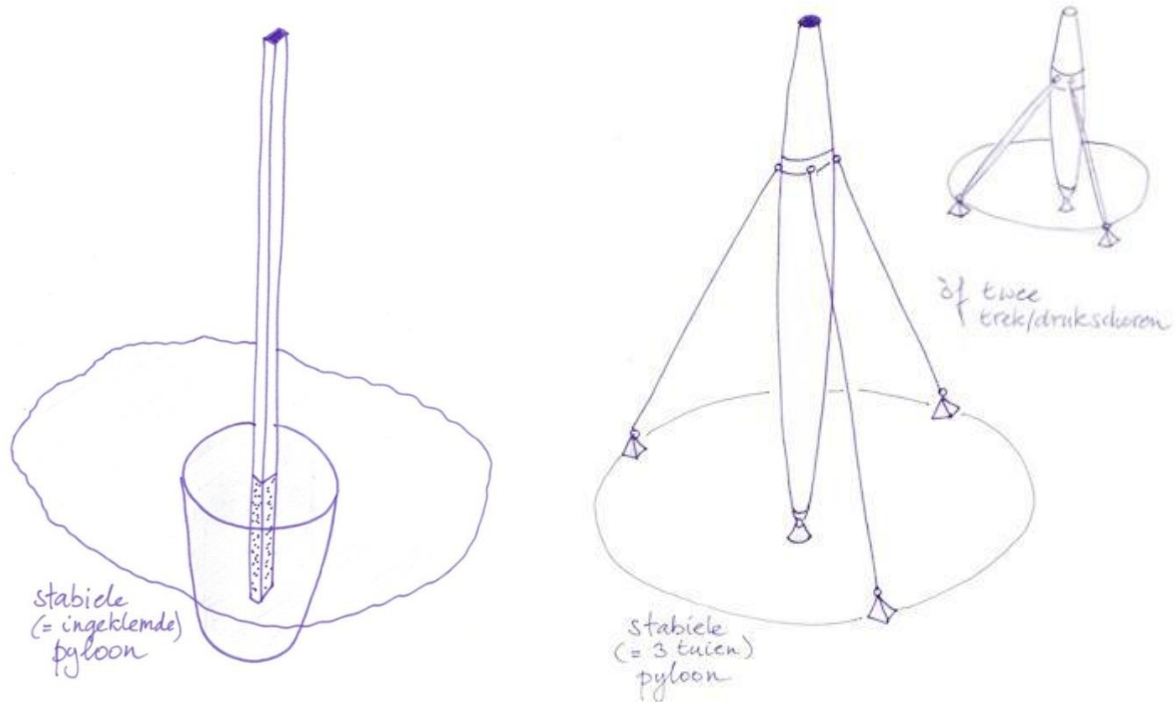
e. Hanger of hangstaaf (1D)

Een hanger of een hangstaaf is de tegenhanger van een kolom. Beiden dragen een verdiepingvloer (een kolom uiteraard ook het dak). De kolom wordt op druk belast en brengt de vloerbelasting naar beneden. Een hanger daarentegen wordt op trek belast. De vloerbelasting gaat via de hanger naar een daarboven liggend element (een ligger), en via dat element weer via de kolommen neerwaarts naar de fundering. Toepassing van hangers maakt het mogelijk een kolomvrije verdieping te creëren. Hanger worden toegepast voor het ophangen van galerijen en tussenvloeren. Ook wordt soms de verdieping onder het dak via hangers aan de dakconstructie opgehangen, zodat daar onder een grote kolomvrije ruimte ontstaat.



f. Pyloon (1D)

Een pyloon is een mooi woord voor een alleenstaande kolom. Vooral bij bruggen noemen we de grote kolom die op de oevers staat een pyloon. Maar ook een alleenstaande mast is een pyloon. Om te zorgen dat een pyloon niet omvalt, moet de pyloon of goed in de ondergrond ingeklemd worden of door kabels, die we hier tuien noemen, gestabiliseerd worden. Drie kabels, die dus alleen trekkrachten kunnen opnemen!, zijn genoeg om omvallen te voorkomen. Je zou als alternatief voor de kabels twee schoren (die dus zowel druk- als trekkrachten kunnen opnemen!) kunnen gebruiken. Bedenk maar eens waarom deze oplossing ook niet omvalt.



Een stevige kolom ingeklemd in een funderingsblok van gestort beton kan niet omvallen en is dus stabiel.

Als we de stevige kolom niet kunnen inklemmen, bijvoorbeeld als de grond veel te slap is, kunnen we deze stabiel maken door (minimaal) 3 kabels als tuien of (minimaal) 2 schoren te gebruiken.

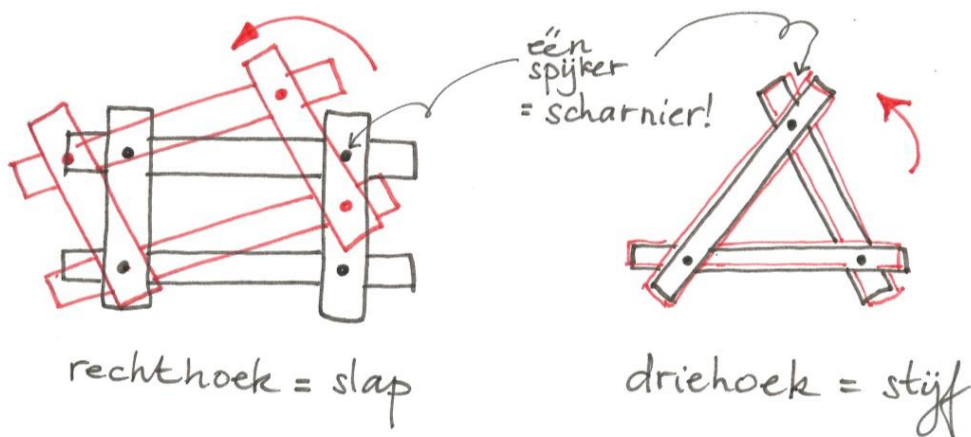
g. Vakwerk

Een vakwerk is de een beetje merkwaardige naam voor een constructie opgebouwd uit driehoeken. De naam komt uit de Middeleeuwen toen men doorkreeg dat als er een schuine staaf (de diagonaal) wordt geplaatst in het raamwerk van balken en kolommen de constructie enorm verstijfde. De ruimtes in dit staven- of balkenstelsel werden dicht gepleisterd maar de balken werden vaak zichtbaar gehouden en zelfs afwijkend gekleurd. Dit is de bekende vakwerkbouw die in Duitsland nog steeds op grote schaal in de steden en dorpen te zien is.

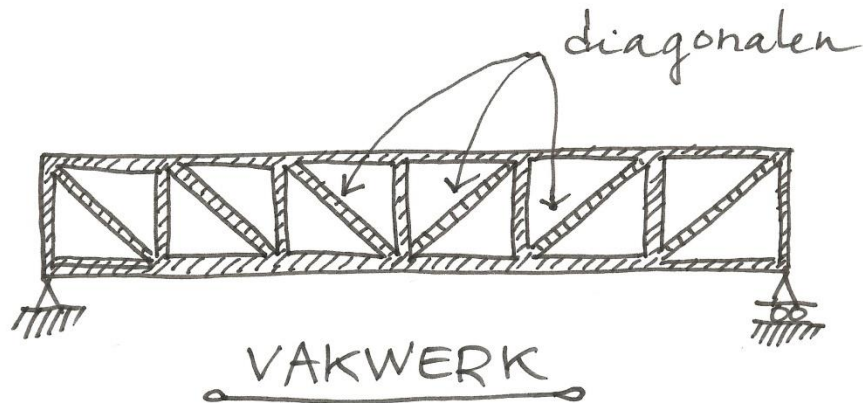


Vakwerkgebouw langs de Moezel.

Het feit dat een driehoek onvervormbaar is, in tegenstelling tot een rechthoek of vierkant, staat aan de basis van het structurele succes van het vakwerk. Daar door is met weinig materiaal, dus economisch en duurzaam een stevige constructie te maken, die grote overspanningen moeiteloos aan kan.



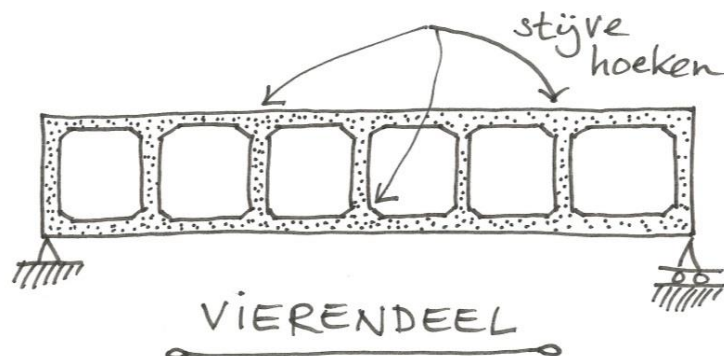
Overspanning in de utiliteitsbouw groter dan 10- 15 meter worden vrijwel altijd in een vakwerkvorm uitgevoerd. De benodigde hoogte van een vakwerk kun je snel inschatten met de formule $\frac{1}{20}$ -ste van de overspanning voor lichte belaste constructies (bijvoorbeeld een dak) tot $\frac{1}{10}$ -de van de overspanning voor een zwaar belaste vloer zoals een samenkomstgebouw (theater, tribune, collegezaal). Kantoren en woonbestemming zitten er tussen met een benodigde hoogte van $\frac{1}{15}$ -de van de overspanning.



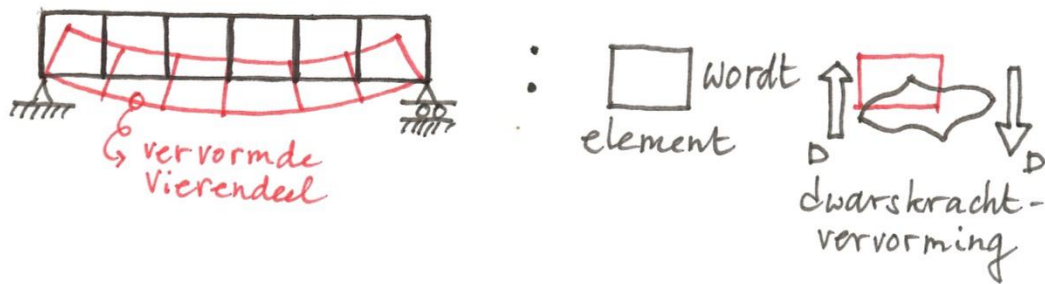
Een vakwerk draagt door axiale krachten in de staven. Zo zit er, analoog aan de buigligger, een drukkracht in de bovenste horizontale staaf (de bovenrand van het vakwerk) en een trekkracht in de onderste horizontale staaf (de onderrand). De dwarskracht wordt opgenomen door de diagonalen. De verbindingen tussen de staven van een vakwerk kunnen allemaal scharnieren zijn, dus minimale verbindingen. Essentieel is dat een vakwerk helemaal uit driehoeken is opgebouwd: dit is de sleutel tot de grote stijfheid van een vakwerk. Als er ook maar op één plaats een rechthoek zit gaat het al hopeloos mis en krijgen we de volgende liggervorm; de Vierendeel-constructie.

h. Vierendeel

Een Vierendeel-constructie is eigenlijk een vakwerk zonder diagonalen. De prijs voor het weglaten van de diagonalen is enorm; een slappe constructie met een hoog materiaalgebruik en veel werk (=arbeidsloon) aan de verbindingen. Toch wordt deze constructie soms gebruikt omdat de diagonalen behoorlijk in de weg kunnen zitten, bijvoorbeeld door een gang heen. Vierendeel is een beetje vreemde naam maar is genoemd naar de Belgische professor Vierendeel (trouwens de naam betekent een Middeleeuwse straf waarbij een veroordeelde door 4 paarden, vastgebonden aan armen en benen in stukken werd getrokken, brrrr.) die deze constructievorm voor het eerst toepaste bij de bouw van bruggen over het Albertskanaal aan het einde van de 19de eeuw.



Draagt een vakwerk door de stijve driehoekvormen, de Vierendeel ligger draagt bij gratie van de stijve (lees niet te verbuigen, niet scharnierende) verbinding tussen de horizontale en de verticale staven. Hierdoor kan een elementair onderdeel, de rechthoek, alleen vervormen door buiging in de horizontale en verticale staven.



Zoals al eerder gesteld: een Vierendeel-constructie is een zeer on-economische manier om te overspannen. Vergeleken met een gelijkwaardig vakwerk zal de Vierendeel-constructie 3 à 4 keer zo duur zijn.

i. Boog (1D)

Een boog is een gekromd constructie-element dat op druk belasting kan afvoeren. Hierbij is het van belang dat de boog niet te "plat" is. Een platte boog zal zich meer als een op buiging belaste ligger gaan gedragen. Pas vanaf hoogte boog (dit noemen we de pijl van een boog) gelijk aan $1/5$ van de overspanning gaat een boog zich als echte boog (is alleen belast op druk) gedragen. Onder de verhouding 1 op 5 gaat de boog zich steeds meer ligger-achtig (=buiging) gedragen.

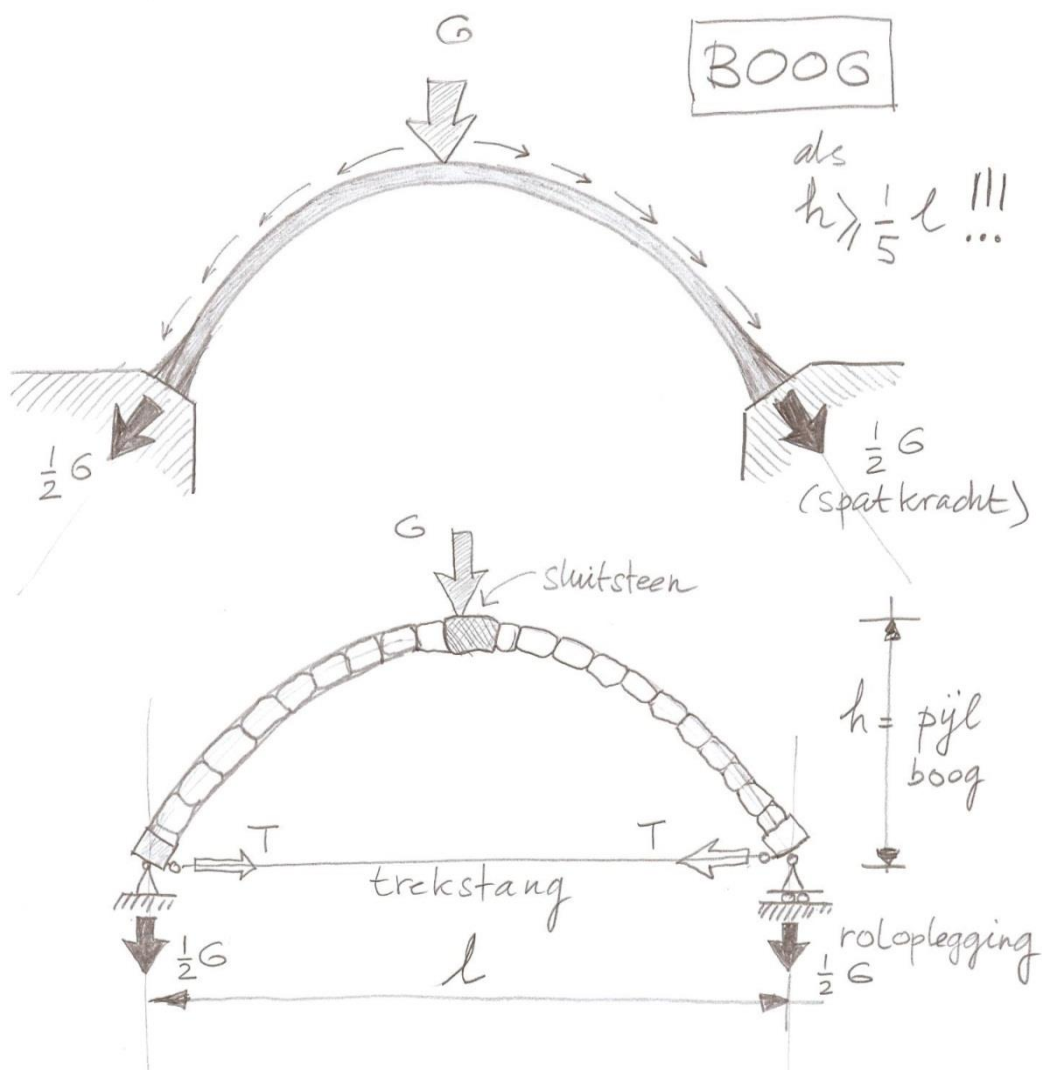
Bogen behoren tot de effectiefste constructies om krachten af te voeren als we kijken naar de verhouding materiaalhoeveelheid versus draagkracht. We zouden bogen daarom veel meer moeten gebruiken maar het gekromd zijn staat de inpassing in onze rechthoekige gebouwen (dat wil zeggen alleen vlakken onderling loodrecht op elkaar) in de weg.



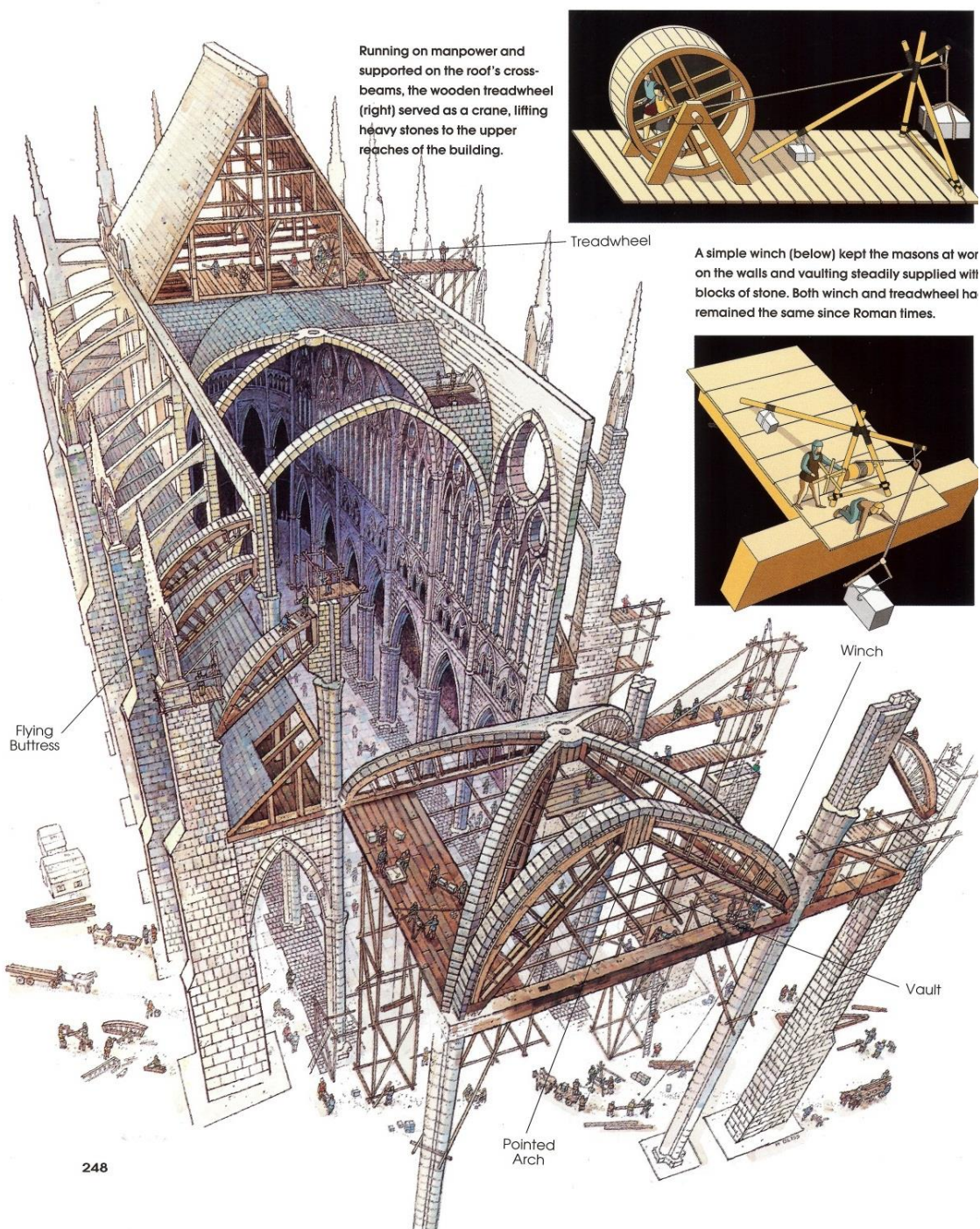
Een prachtig vormgegeven betonnen boogbrug in Zwitserland, de Saginatobel brug van arch./ing. Robert Maillart, gebouwd rond 1930.

Bij bogen zijn de zijdelingse 'duw'-krachten, de zogenaamde spatkrachten, vervelend. Vaak kunnen deze niet opgenomen of afgevoerd worden als de boog bijvoorbeeld op een muur staat. In de middeleeuwse kathedralen is dit door steunberen en luchtbogen opgelost. In het buitenland kun je geluk hebben dat je op de rotsen kunt funderen. Dan zijn de spatkrachten eenvoudig op te nemen. De Saginatobel-brug in Zwitserland is daar een goed voorbeeld van.

Een andere methode om de spatkrachten op te vangen is het aanbrengen van een trekstang tussen de twee steunpunten van de boog; een mooie oplossing want de twee spatkrachten maken nu evenwicht met elkaar en er zal geen verplaatsing en daaraan gekoppeld geen scheurvorming in de ondersteuning van de boog optreden. Wel treedt er een trekkracht in de (inderdaad) trekstang op. Maar met een stalen of ijzeren staaf of kabel is dat goed op te nemen.



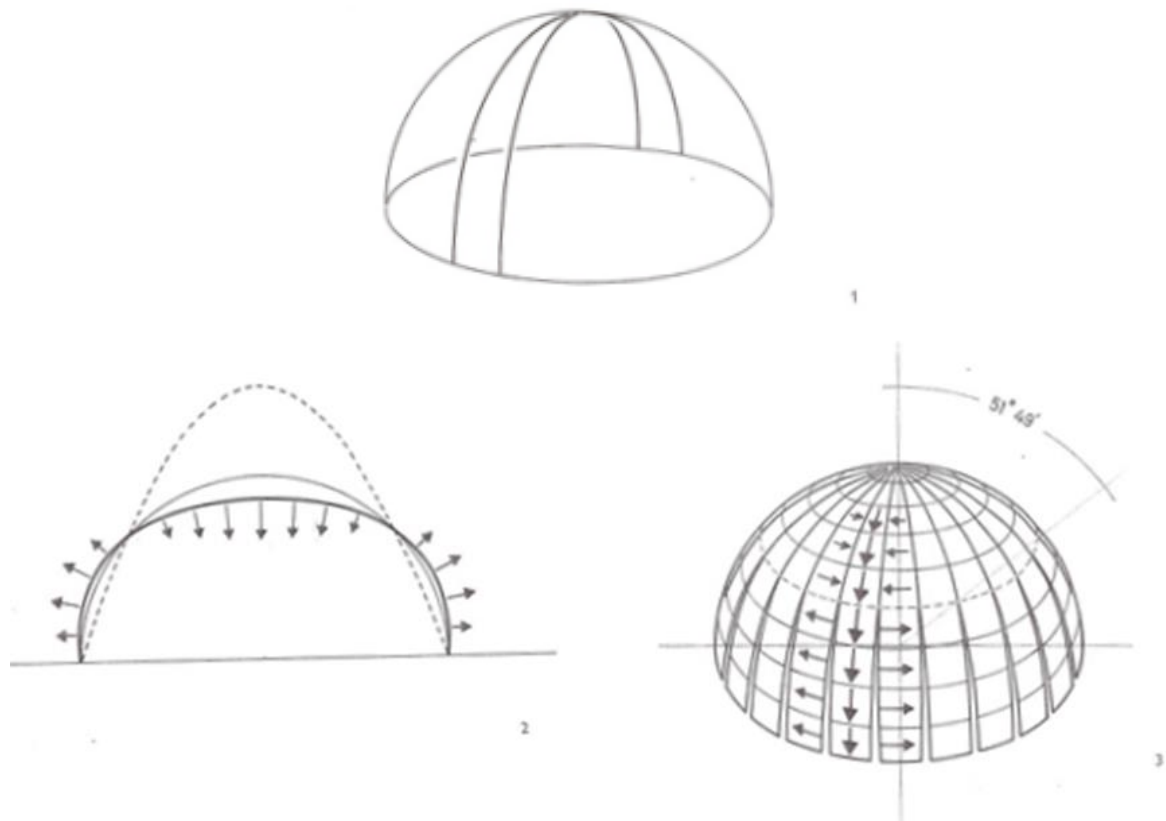
Twee situaties voor een boogconstructie: één met opnamecapaciteit voor horizontale krachten in de oplegging (geen trekstang nodig) en één zonder deze opnamecapaciteit waardoor een trekstang noodzakelijk is voor het (interne) evenwicht.



Een getekende bouwfase van een Gotische Kathedraal (circa 1200 na Chr.). Kathedralen in die tijd waren eigenlijk geprefabriceerde constructies die uit losse onderdelen op de bouwplaats in elkaar gezet werden. Op de voorgrond twee ruimtelijk samenwerkende bogen die samen het kenmerkende kruisgewelf van de kathedraalvorm vormen. Aardig om te zien zijn ook de tijdelijke houtconstructies, de formelen, waarop de natuurstenen onderdelen van de boog neergelegd werden. Pas als de laatste steen gelegd was zodat de boog volledig was en krachten kon opnemen, werden de formelen weggehaald.

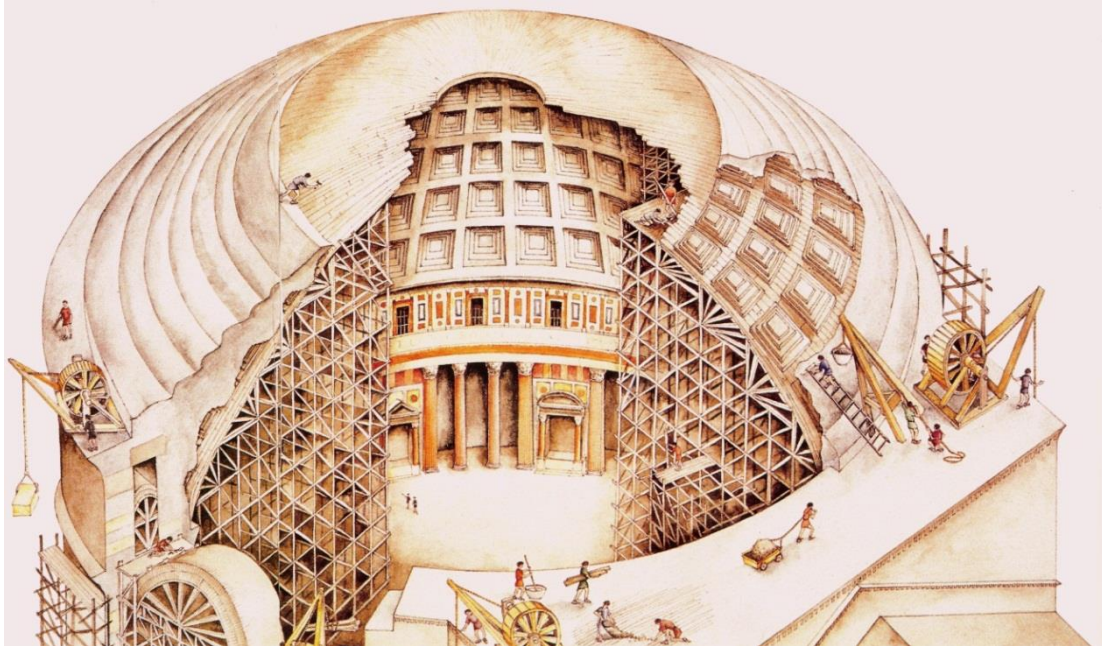
j. Koepel (3D)

De koepel is eigenlijk een boog die om een verticale as rond gedraaid is. Wat voor een boog geldt, geldt dus ook voor zijn drie dimensionale broer; de koepel. De koepel werd vaak toegepast bij de kerkbouw in de middeleeuwen, als gewelf of als deel van het dak.



Het effect van een halve bol als een dubbel-gekromde schaal.

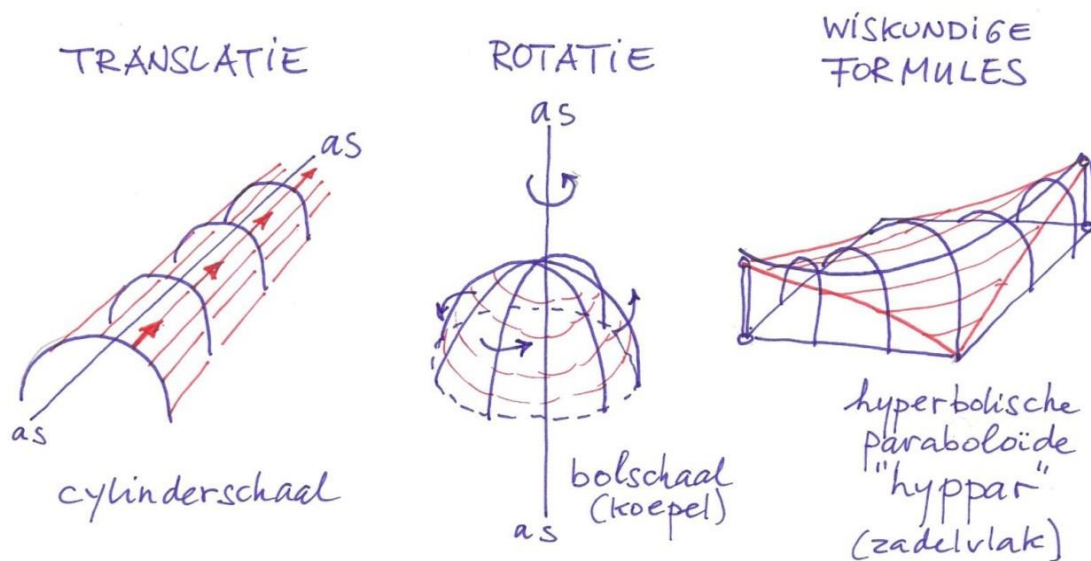
- 1. Twee slanke segmenten tegen over elkaar vormen een boog/gewelf.*
- 2. Een slanke cirkelvormige boog heeft de neiging 'in te deuken' aan de bovenzijde en 'opzij te beugen' aan de zijkanten omdat een halve cirkel geen ideale 'druk'-lijn is.*
- 3. In de gehele halve bol worden de bovenste segmenten in elkaar gedrukt; de onderste segmenten worden echter uit elkaar getrokken.*



Een getekende situatie tijdens de bouw (circa 120 na Chr.) van de beroemde koepel van het Pantheon (tempel voor alle goden) in Rome. Een 'beton'-constructie met slimme gewicht besparende cassettes maar wel een schaaldikte onderin van circa 3 meter! Met een diameter van 42 meter was het Pantheon lange tijd, tot 1912, de grootste koepel van de wereld.

k. Schaal (3D)

Een schaal is een gekromd oppervlak waarbij, analoog aan de boog in het vlak van de schaal uitwendige belasting via zowel trek als drukkrachten in het vlak van de schaal wordt afgevoerd. Een net en een koepel zijn ook als schalen te typeren. Op schaalvormen wordt later nog terug gekomen. Hieronder een paar hoofdvormen van schalen.

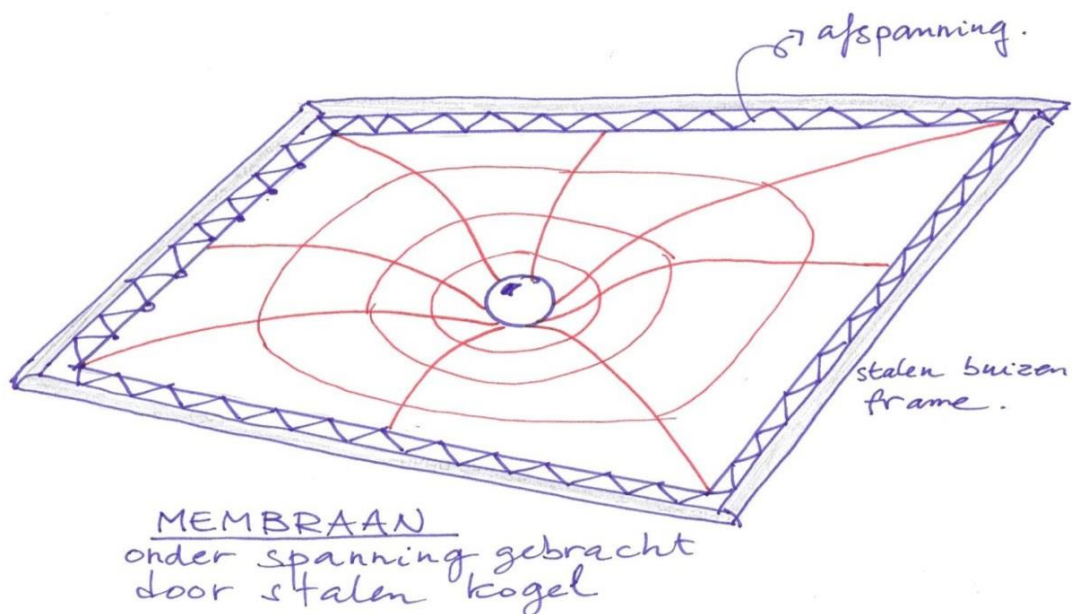




Slechts 50 mm dikke betonschalen (type rotatieschaal) ontwikkeld door de Zwitserse ingenieur Heinz Ischler in de jaren 60 door (omgekeerd opgehangen) bevroren theedoeken zorgvuldig op te meten om de ideale vorm van de schalen te kunnen bepalen.

I. Membraan (3D)

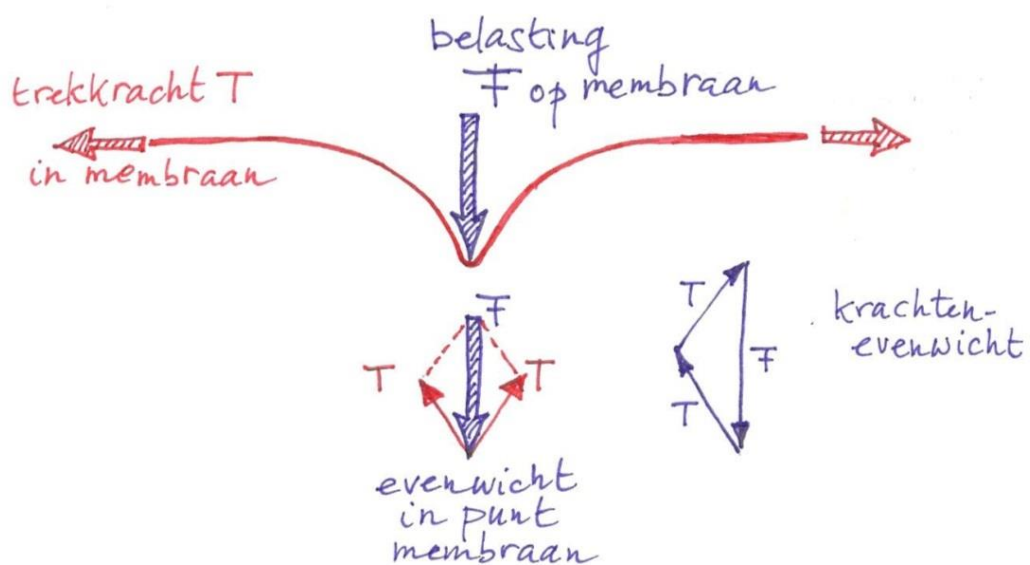
Het membraan is een doek, een heel dun vlak, waarbij door het gespannen zijn van het vlak er toch een mogelijkheid is om uitwendige krachten loodrecht werkend op het vlak van het membraan op te nemen.





Nog niet opgespannen membraan van de koepel van het bevrijdingsmuseum in Groesbeek. Door van buiten aan het membraan te gaan trekken (bovenste rij stalen kegels) en er tegen aan te duwen vanaf de binnenkant (onderste rij stalen kegels) wordt het membraan opgespannen. Doordat het opgespannen membraan overal een dubbel gekromd oppervlak vormt, is het ook in de wind stabiel, het zal niet gaan klapperen.

Ook puntlasten kunnen door een (vlak!) gespannen membraan opgenomen worden. Hiervoor is het wel noodzakelijk dat het membraan vervormd; in onderstaand figuur is het in vervormde toestand mogelijke evenwicht weergegeven.

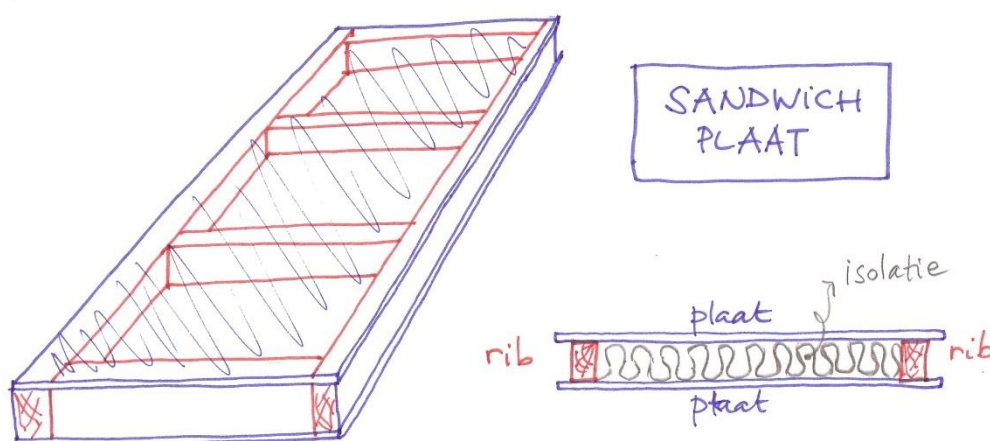


m. Sandwich plaat

Een sandwich plaat is een mooi Engels woord voor een (dikke) plaat opgebouwd uit twee echte platen van een boel materialen gemaakt kan worden, zoals hout, staal en kunststof.

De twee platen worden door ribben of afstand gehouden, zodat een dikkere plaat ontstaat.

Een dikkere plaat is veel sterker en stijver dan de twee losse platen zodat grotere overspanningen daarmee overbruggen kunnen worden. Met dus minder materiaal dan een massieve plaat en dus minder bouwkosten. Dubbel aardig wordt het als we het binnenste van de sandwich plaat vullen met isolatiemateriaal en de sandwich plaat dus onderdeel van de gevel of het dak kan uitmaken.

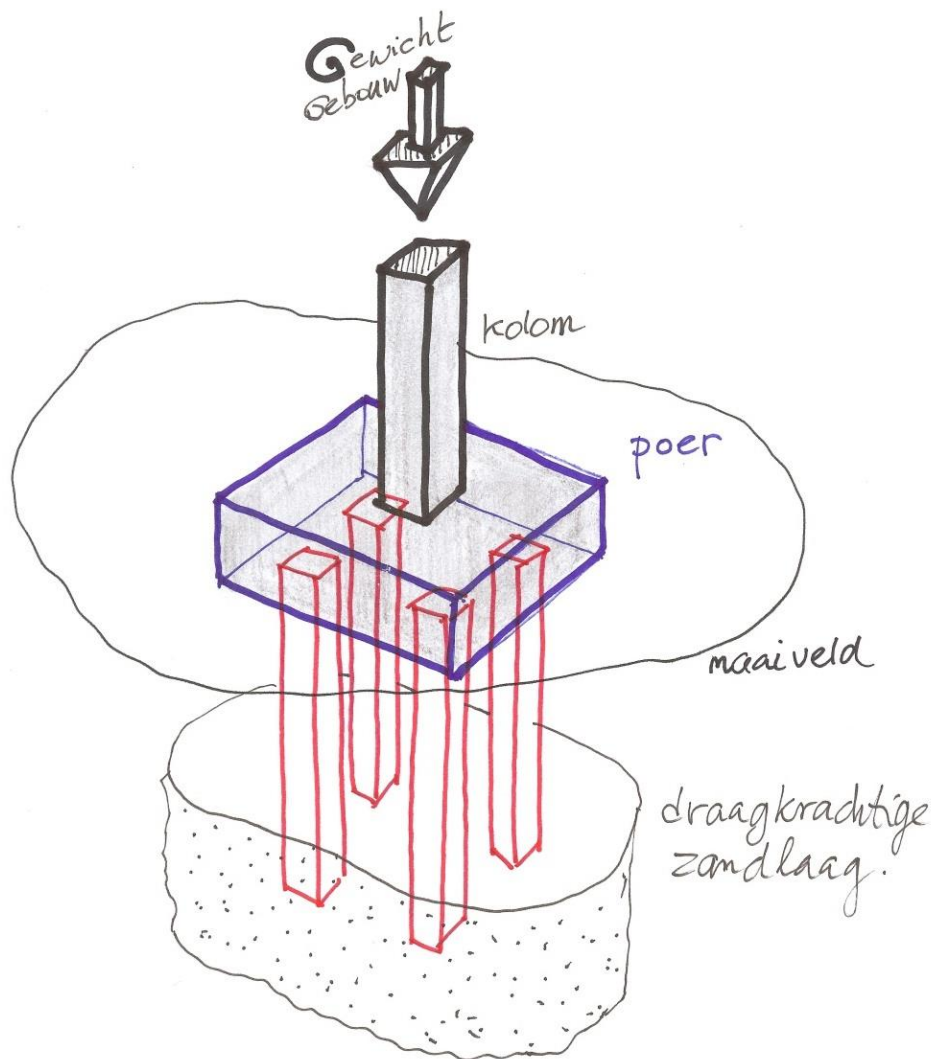


n. Paal

Met een paal wordt hier bedoeld een funderingspaal. Een kolomachtig element van hout, beton of staal dat in de grond geboord of geslagen wordt totdat zijn punt stevig in een draagkrachtige laag van de ondergrond staat. Alle palen met elkaar dragen het gewicht van het gebouw en alles wat erin zit of er op staat. Zij zorgen ervoor dat het gebouw niet verzakt of gaat scheuren doordat delen van de grond draagkrachtiger zijn, en dus minder vervorming geven dan de delen ernaast. Het vervelende aan palen, en de fundering in het algemeen, is dat het relatief veel geld kost maar dat je er niets van ziet. Toch zijn zij van essentieel belang voor het goed functioneren van een gebouw.

o. Poer

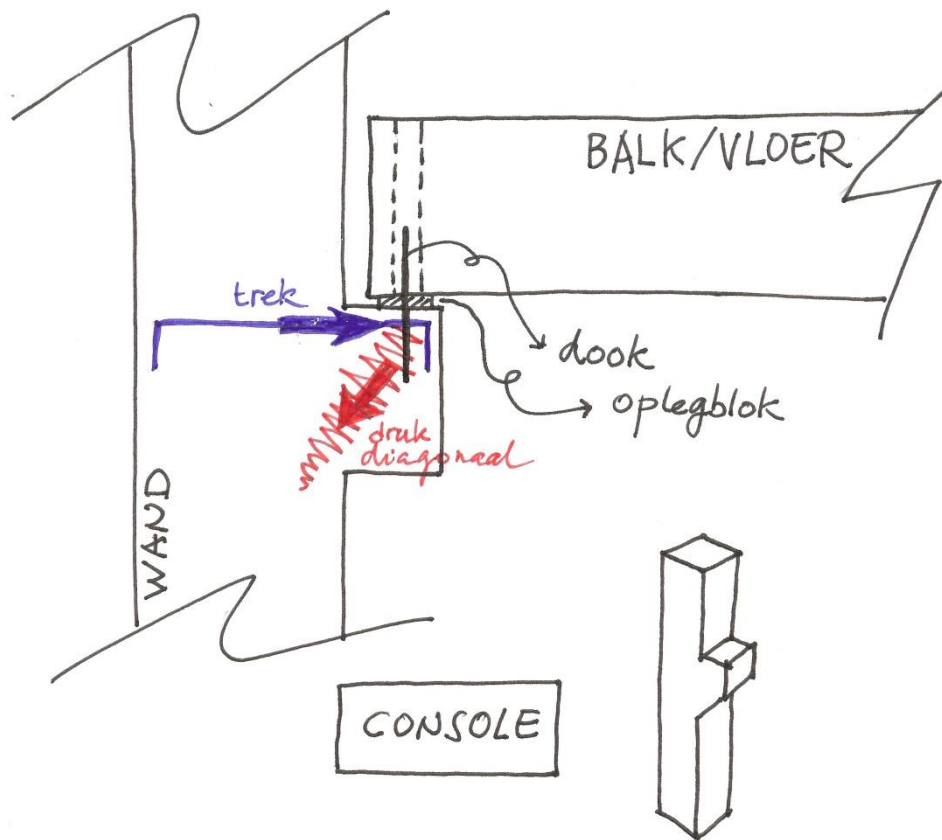
Een poer is een beetje vreemde benaming van een blok beton in de fundering. Soms geeft een paal onder een kolom niet voldoende draagvermogen voor het gewicht dat de kolom moet dragen. Dan moeten er bijvoorbeeld twee of zelfs veel meer, bijvoorbeeld acht palen onder die kolom staan. De last uit de kolom moet dan gelijkmatig verspreid worden over die acht palen. Je kunt de palen ook niet allemaal direct naast elkaar zetten want dan beïnvloeden de grondspanningen onder de paalpunten elkaar te veel. Als richtlijn geldt dat bij onderlinge afstand drie keer de diameter van de paal het goed gaat. Het blok beton, de Poer, zorgt ervoor dat de kolomlast mooi gelijkmatig over alle palen onder de poer verdeeld wordt. Hiervoor moet de poer behoorlijk dik zijn want we willen vervormen door buiging voorkomen. Anders zouden de binnenste palen veel meer moeten dragen dan de buitenste.



Weergave van de fundering van een gebouw, ook wel onderbouw genoemd. De kolom draagt het gewicht van het gebouw, de kolom staat op een betonnen poer (funderingsblok) en de poer staat op zijn beurt weer op palen. De palen staan met hun punt stevig verankerd in een draagkrachtige zandlaag in de ondergrond. Via de paalpunt wordt het gebouwgewicht doorgegeven aan het korrelskelet van de zandlaag waarmee het als het ware is opgenomen door de aarde.

p. Console

Een console is een blokvormig uitsteeksel van een constructie onderdeel waar een ander constructieonderdeel weer op ligt. Het wordt gebruikt als we de onderdelen niet boven op elkaar kunnen leggen (stapelen) maar we tegen een wand of een kolom iets moeten bevestigen. Meestal is dit een balk maar het kan ook een vloer zijn; de console volgt dan zoveel als mogelijk is de hele lengte van de vloer. Bij console moet goed worden gelet op de opname capaciteit van de oplegkrachten uitgeoefend door de balk of de vloer. Een console moet daarom niet te klein zijn maar robuust. Afdracht van krachten geschied vooral door de (dwarskracht-)diagonaal en de trekband die door de console heen lopen.



Vaak voorzien wij een console van een zogenaamde dook, een stalen staaf die uit de console steekt en waar de balk/ vloer met een gat over heen glijdt. Het gat wordt later met beton gevuld. Op deze wijze kunnen horizontale krachten opgenomen worden en kan de balk/ vloer niet van de console afschuiven.

7 Belastingen

7.1 Types belastingen

Belastingen worden onderscheiden in permanente of rustende belasting (eng.: dead load) en variabele belasting (eng.: live load). Rustende belasting is altijd aanwezig. Hieronder valt het eigen gewicht van alles, de afwerking, vast meubilair, installaties enz. Variabele belasting is slechts tijdelijk aanwezige belasting, zoals mensen, goederen, verkeer en wind.

a. Rustende belastingen

Dit zijn de gewichten die altijd aanwezig zijn en altijd als krachten worden uitgeoefend op de constructie van een gebouw. Het gewicht van het draagskelet zelf maar ook alle bekledingen, muren, plafonds en gevels horen hierbij. Alles wat er dus permanent is. Een ander woord hiervoor is ook wel eigen gewicht.

NB. Altijd lastig het verschil tussen massa en gewicht. Beide drukken we in de spreektaal uit in kilo. Toch is er een groot verschil tussen massa en gewicht. Bedenk dat een massa van 1 kilo op de aarde ook op de maan een massa van 1 kilo is. Massa is dus een object gebonden eigenschap die niet verandert. Gewicht is de kracht waarmee een 'object', bijvoorbeeld de aarde; maar ook de maan of de zon, aan die massa trekt. De zwaartekracht wordt uitgedrukt in de zwaartekrachtversnelling g en die is op aarde $9,81 \text{ m/s}^2$ maar op de maan $3,1 \text{ m/s}^2$. Een massa van 1 kilo weegt op aarde dus, volgens de wet van Newton ($F = m \times a$), $9,81 \times 1 = 9,81$ kilogram. Op de maan weegt die massa van 1 kilo echter $3,1 \times 1 = 3,1$ kilogram. Gebruik dus het begrip kilo voor de massa en het woord kilogram voor gewicht dan is het al een stuk duidelijker. Om het nog duidelijker te maken rekenen we in de bouw met de krachtseenheid Newton (symbool is de letter N). Op aarde is dus een kracht van 1 Newton gelijk aan $9,81 \text{ kg} \times \text{m/s}^2$. En 1 kN (kiloNewton) is weer 1000 N (Newton), net als 1 kilometer 1000 meter is.

Belangrijke bouwmaterialen, soortelijk(e) massa / gewicht.

| | <i>[kg/m³]</i> | <i>[kN/m³]</i> |
|------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| <i>Staal en IJzer</i> | <i>7850</i> | <i>78,5</i> |
| <i>Aluminium</i> | <i>2600</i> | <i>26</i> |
| <i>Lood</i> | <i>11.400</i> | <i>114</i> |
| <i>Koper</i> | <i>9.000</i> | <i>90</i> |
| <i>Goud</i> | <i>19.000</i> | <i>190</i> |
| <i>Beton(gewapend)</i> | <i>2400</i> | <i>24</i> |
| <i>Metselwerk</i> | <i>2000</i> | <i>20</i> |
| <i>Aarde</i> | <i>1800</i> | <i>18</i> |
| <i>Naaldhout</i> | <i>800</i> | <i>8 (gemiddelde waarde)</i> |
| <i>Hardhout</i> | <i>1500</i> | <i>15 (gemiddelde waarde)</i> |
| <i>Glas</i> | <i>2500</i> | <i>25</i> |
| <i>Water</i> | <i>1000</i> | <i>10</i> |

b. Veranderlijke belasting

Veranderlijke belasting is zoals de naam het al zegt, belasting die er soms wel en soms niet is. Denk hierbij aan mensen in een gebouw. Het ene moment zit de theaterzaal helemaal vol, 3 uur later is de voorstelling afgelopen en zit er niemand meer in de zaal. Ook sneeuw en de wind horen bij de veranderlijke belastingen. Maar ook bijvoorbeeld het verkeer op een brug: de voetgangers, de fietsen, de auto's, de vrachtauto en, als je pech hebt, militair verkeer; tanks.

c. Bijzondere belastingen

Bijzondere belastingen zijn alle belastingen die niet rustend of veranderlijk zijn en door een bijzondere oorzaak ontstaan. Denk daarbij aan gronddruk op keldermuren, regen (plassen water op het dak), aanrijding, aardbeving of explosie.

7.2 Veiligheidsfilosofie

Het berekenen van bouwconstructies dient om deze te toetsen aan veiligheids- en andere eisen.

a. Normen

De berekening van bouwconstructies dient te worden gebaseerd op normen. Uitgebreide gegevens, richtlijnen en voorschriften voor berekeningen zijn vastgelegd in de normen uit de zogenaamde Eurocode-reeks. Met deze normen kan worden aangetoond, dat een bouwwerk op het gebied van constructieve veiligheid voldoet aan de eisen van de Nederlandse bouwregelgeving (Bouwbesluit 2003). Normen zijn verkrijgbaar bij het Nederlands Normalisatie-instituut NEN te Delft. De navolgende tekst is gebaseerd en deels overgenomen uit de Eurocodes.

Uitgangpunten

In de Eurocode wordt de betrouwbaarheid van bouwconstructies getoetst volgens de zogenaamde *semi-probabilistische beschouwing*. Dit is een betrouwbaarheidsanalyse die uitgaat van een voorgeschreven basisbelasting met een *belastingfactor* γ_f en de sterkte van een constructie met een *materiaalfactor* γ_m . Hierbij moet bij de beoordeling van de veiligheid en bruikbaarheid van een bouwconstructie worden aangetoond dat geen van de grenstoestanden wordt overschreden.

b. Veiligheid en bruikbaarheid bouwconstructies

Een bouwconstructie moet gedurende een vooraf vastgestelde *ontwerplevensduur* en met een vooraf vastgestelde mate van betrouwbaarheid middels indeling in *gevolgklassen* aan de gestelde *eisen ten aanzien van veiligheid en bruikbaarheid* voldoen. De cursieve gedeelten worden hierna nader toegelicht.

Ontwerplevensduur

De ontwerplevensduur is de veronderstelde periode gedurende welke een constructie of een deel ervan te gebruiken is voor het doel als beoogd, met inbegrip van het voorziene onderhoud, maar zonder dat ingrijpend herstel nodig is. Voor een indeling in ontwerplevensduurklassen: zie tabel 7.1.

Tabel 7.1 - Ontwerplevensduurklasse

| Ontwerplevensduurklasse | Ontwerplevensduur (jaren) | Voorbeelden |
|-------------------------|---------------------------|--|
| 1 | 5 | Tijdelijke constructies ^{a,b} |
| 2 | 15 | Landbouw ^c , tuinbouw ^c en soortgelijke constructies Constructies van industriegebouwen van 1 of 2 verdiepingen |
| 3 | 50 | Gebouwen en andere gewone constructies |
| 4 | 100 | Monumentale gebouwen ^d |

a Echter, voor CC2 en CC3 moet voor de bepaling van de opgelegde belastingen een minimum ontwerplevensduur van 15 jaar zijn gebruikt.
b Constructies of delen van constructies die kunnen worden ontmanteld met de bedoeling om te worden hergebruikt mogen niet als tijdelijk zijn aangemerkt.
c Uitsluitend voor productiedoeleinden, waarbij het aantal personen binnen beperkt is.
d De beslissing om een gebouw als monumentaal aan te merken is ter beoordeling aan de klant.

Gevolklassen

Bouwwerken kunnen in verschillende gevolklassen met een bijbehorend betrouwbaarheidsniveau worden ingedeeld, zie tabel 7.2.

Tabel 7.2 - Definitie van gevolklassen

| Gevolklasse ^{a,b} | Omschrijving | Voorbeelden van toepassingen |
|----------------------------|---|---|
| CC3 | Grote gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens (enkele tientallen), en/of zeer grote economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving. | Hoogbouw ($h > 70$ m) Tribunes, Tentoonstellingsruimten, Concertzalen, Grote openbare gebouwen ^c |
| CC2 | Middelmatige gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, en/of aanzienlijke economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving. | Woongebouwen, Kantoorgebouwen, Openbare gebouwen, Industriegebouwen (3 of meer verdiepingen) |
| CC1 | Geringe gevolgen ten aanzien van het verlies van mensenlevens, en/ of kleine of verwaarloosbare economische of sociale gevolgen of gevolgen voor de omgeving. | Landbouwbedrijfsgebouwen, ^d Tuinbouwkassen, ^d Standaard eengezinswoningen, Industriegebouwen (1 of 2 verdiepingen) |

a De gevolklassen in de Eurocodes corresponderen niet precies met de veiligheidsklassen volgens NEN 6700:
- Klasse CC 1 uit NEN-EN 1990 correspondeert met zowel veiligheidsklassen 1 als 2 volgens NEN 6700;
- Klasse CC 2 uit NEN-EN 1990 correspondeert met veiligheidsklasse 3 volgens NEN 6700;
- Klasse CC 3 is een extra gevolgklasse bedoeld voor draagconstructies in zeer hoge of anderszins bijzondere bouwwerken, waarbij de gevolgen van bezwijken zeer groot kunnen zijn;
b Constructie-elementen mogen zijn ingedeeld in een lagere gevolgklasse dan de constructie waarvan ze deel uitmaken, indien mag worden verwacht dat de gevolgen van bezwijken van een geringere orde zijn. Indien mag worden verwacht dat de gevolgen van bezwijken van constructies tijdens de uitvoeringsfase van een geringere orde zijn dan in de gebruiksfase mogen ze zijn ingedeeld in een lagere gevolgklasse en omgekeerd als verwacht wordt dat de gevolgen groter zijn moeten ze zijn ingedeeld in een hogere klasse;
c Bedoeld zijn situaties van openbare gebouwen, waarin zich tegelijkertijd veel mensen kunnen ophouden en waarbij bij bezwijken van een essentieel onderdeel ineens een groot aantal mensen kan worden getroffen;
d Uitsluitend voor productiedoeleinden, waarbij het aantal personen binnen beperkt is.

Eisen ten aanzien van veiligheid en bruikbaarheid

Een constructie kan in een toestand raken dat niet meer wordt voldaan aan één of meer van de betrouwbaarheidseisen. Al deze toestanden zijn grenstoestanden waarbij worden onderscheiden:

- Uiterste grenstoestanden;
- Bruikbaarheidsgrenstoestanden.

Bij deze grenstoestanden zijn de rekenwaarden van een aantal basisvariabelen van belang.

Rekenwaarde voor de *belastingen*:

$$F_d = \gamma_f \times F_{rep} \text{ (F= force; kracht)}$$

Rekenwaarde voor *weerstand van de materialen*:

$$R_d = R_{rep} / \gamma_m \text{ (R= resistance; weerstand)}$$

Rekenwaarde voor de *geometrie*:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \text{ (a=altitude; grootheid/ dimensie/ maat)}$$

waarin:

F_{rep} = representatieve waarde van belastingen

R_{rep} = representatieve waarde van de weerstand van materialen

a_{nom} = nominale waarde geometrische parameters

γ_f = belastingfactor

γ_m = materiaalfactor

Δa = toegevoegde geometrische grootheid

Gezien de gestelde eisen aan een bouwconstructie (zie begin van deze paragraaf) dient voor een grenstoestand te worden voldaan aan:

$$F_d = \gamma_f \times F_{rep} \leq R_d = R_{rep} / \gamma_m$$

c. Belastingen

Indeling belastingen

Bij de indeling van *belastingen* worden de volgende categorieën gehanteerd:

- eigen gewicht – opgelegde belastingen (blijvend en veranderlijk) – buitengewone belastingen;
- plaatsgebonden – vrij;
- statisch – dynamisch.

Opgelegde en buitengewone belastingen kunnen een extreme waarde hebben of een momentane waarde. Onder de *momentane waarde* van een belasting verstaat men de waarde die men zeer waarschijnlijk op een willekeurig tijdstip zal aantreffen, met een

overschrijdingskans van 5% (vergelijk permanent aanwezig deel van de opgelegde belasting). Het momentane deel wordt met een factor ψ aangegeven. Er worden in de Eurocode een drietal momentaanwaarden onderscheiden (voor waarden zie Eurocode NEN-EN 1990 tabel A1.1):

- ψ_0 = momentaanfactor i.v.m. de combinatie waarde van een opgelegde belasting;
- ψ_1 = momentaanfactor i.v.m. de frequentewaarde van een opgelegde belasting;
- ψ_2 = momentaanfactor i.v.m. de quasi-blijvende waarde van een opgelegde belasting.

Rekenwaarde van de belasting

De belasting moet voor de te beschouwen grenstoestand in de berekening zijn ingevoerd als *rekenwaarde*:

$$F_d = \gamma_i \cdot F_{rep}$$

waarin:

F_d = rekenwaarde van de belasting

F_{rep} = representatieve waarde van de belasting

γ_i = belastingfactor (zie tabel 7.3),

te onderscheiden in (index i wordt G, Q resp. A):

γ_G = belastingfactor voor *eigen gewicht*;

γ_Q = belastingfactor voor *opgelegde* belasting;

γ_A = belastingfactor voor *buitengewone* belasting.

Tabel 7.3 - Belastingfactoren in uiterste grenstoestand en bruikbaarheidsgrenstoestand

| combinaties | gevolg- klasse | eigen gewicht | | opgelegde | buitengewone |
|-------------|-------------------|---------------|----------------------------------|------------|--------------|
| | | normaal | γ_G gunstig werkend | belasting | belasting |
| | | | | γ_Q | γ_A |

**Uiterste grenstoestand (UGT)
(Engels ULS; ultimate limit state)**

| | | | | | |
|------------------------|-------|------|-----|------|-----|
| stabieliteit (EQU) | 1 | 1,0 | 0,9 | 1,35 | – |
| | 2 | 1,1 | 0,9 | 1,5 | – |
| | 3 | 1,2 | 0,9 | 1,65 | – |
| fundamenteel (STR/GEO) | 1 | 1,2 | 0,9 | 1,35 | – |
| | 2 | 1,35 | 0,9 | 1,5 | – |
| | 3 | 1,5 | 0,9 | 1,65 | – |
| buitengewoon | 1,2,3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

**Bruikbaarheidsgrenstoestand (BGT)
(Engels SLS; service limit state)**

| | | | | | |
|----------------|-------|-----|-----|-----|---|
| karakteristiek | 1,2,3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | – |
| frequent | 1,2,3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | – |
| quasi-blijvend | 1,2,3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | – |

d. Voorgeschreven belastingcombinaties

Belastingcombinaties

De volgende belastingcombinaties voor de **uiterste grenstoestand** (toetsing op sterkte) moeten indien van toepassing zijn getoetst. Tussen haken is de toetsingregel in de NEN-EN 1990 vermeld.

$$\text{evenwicht (EQU)} \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10)$$

$$\text{fundamenteel (STR/GEO)} \quad \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$\text{(met: } \xi = 0,89) \quad \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

$$\text{buitengewoon} \quad \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,i} \text{ of } \psi_{2,i}) \times Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

De volgende belastingcombinaties voor de **bruikbaarheidsgrenstoestand** (toetsing op stijfheid) moeten indien van toepassing zijn getoetst.

$$\text{karakteristiek (onomkeerbaar, scheurvorming)} \quad \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (6.14b)$$

$$\text{frequent (omkeerbaar, trillingshinder)} \quad \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

$$\text{quasi-blijvend (blijvend, lange termijn)} \quad \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.16b)$$

Symbolen:

G = eigen gewicht;

Q_k = waarde opgelegde belasting;

P_k = karakteristieke waarde van een voorspankracht;

γ_P = partiële factor voor voorspankrachten (zie EN 1992 t/m EN 1996 en EN 1998 t/m EN 1999);

ξ = verminderingsfactor in de Nationale Bijlage voor NL vastgesteld op 0,89;

A_d = rekenwaarde van een buitengewone belasting;

ψ_i = momentaanfactor = gemiddelde deel van de veranderlijke belasting.

Voor gevolgklasse 2 zonder voorspanning betekent dit in de **uiterste grenstoestand** onderstaande belastingcombinaties (met de belastingfactoren uit tabel 7.1):

$$\text{evenwicht (EQU):} \quad 1,1 \times G + 1,5 \times \psi_{0,1} \times Q_{k,1} + \sum 1,5 \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (6.10)$$

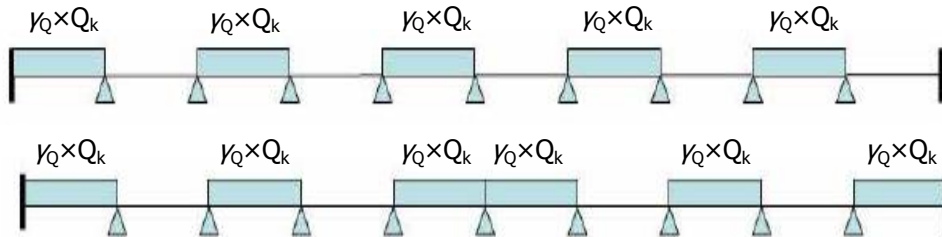
$$\text{fundamenteel (STR/GEO):} \quad 1,35 \times G + 1,5 \times \psi_{0,1} \times Q_{k,1} + \sum 1,5 \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (6.10a)$$

$$1,35 \times 0,89 \times G + 1,5 \times Q_{k,1} + \sum 1,5 \times \psi_{0,i} \times Q_{k,i} \quad (6.10b)$$

$$\text{buitengewoon:} \quad G + A_d + \psi_{1,i} \times Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \times Q_{k,i} \quad (6.11b)$$

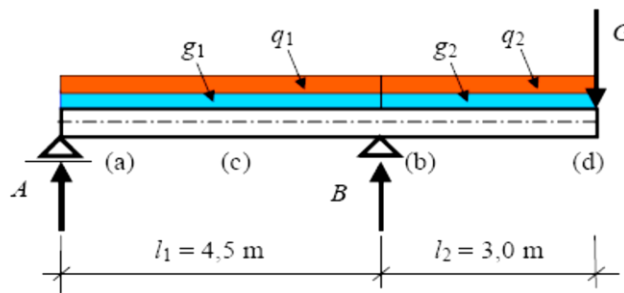
Belastingchikking

Voor vloeren en liggers dient voor de opgelegde belasting een schaakbordbelasting te worden aangehouden. Tevens dienen 2 naast elkaar gelegen velden volledig te worden belast door de opgelegde belasting (zie figuur 7.1). De gelijkmatig verdeelde opgelegde belastingen en de opgelegde puntlasten hoeven niet met elkaar te zijn gecombineerd.



Figuur 7.1. Voorgeschreven belastingcombinaties voor meerveldsligger.

Voor een uitkragende vloer of ligger dienen de belastingcombinaties met bijbehorende belastingfactoren als aangegeven in figuur 7.2 te worden aangehouden.



| bel geval | grenstoestand | Belastingen | | | | |
|-----------|----------------------|-------------|------|---------------------|---------------------|------|
| | | g1 | g2 | q1 | q2 | G |
| 1 | EQU 6,10 (punt a) | 0.9 | 1.1 | 0 | 1.5 | 1.1 |
| 2 | STR (6.10a) (punt a) | 1.35 | 1.35 | 0 | $1,5 \times \Psi_0$ | 1.35 |
| 3 | STR (6.10b) (punt a) | 1.2 | 1.2 | 0 | 1.5 | 1.2 |
| 4 | STR (6.10b) (punt a) | 0.9 | 0.9 | 0 | 1.5 | 0.9 |
| 5 | STR (6.10a) (punt b) | 1.35 | 1.35 | $1,5 \times \Psi_0$ | $1,5 \times \Psi_0$ | 1.35 |
| 6 | STR (6.10b) (punt b) | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 1.2 |
| 7 | STR (6.10b) (punt c) | 1.35 | 1.35 | $1,5 \times \Psi_0$ | 0 | 1.35 |
| 8 | STR (6.10b) (punt c) | 1.2 | 1.2 | 1.5 | 0 | 1.2 |

Figuur 7.2. Belastingcombinaties met bijbehorende belastingfactoren bij overstek voor gevolgklasse 2.

Belastingen op kolommen en wanden

Waar de opgelegde belastingen uit een aantal verdiepingvloeren, kolommen en wanden belasten, mag het totaal van de opgelegde belastingen zijn gereduceerd, mits de opgelegde belasting valt in gebruikersklasse A t/m D, met een factor α_n als aangegeven in onderstaande formule:

$$\alpha_n = (2 + (n - 2)\psi_0) / n \quad (n = \text{aantal bouwlagen}).$$

e. Vervormingen

Onder *vervormingen* worden verstaan: doorbuigingen, opbuigingen, hoekverdraaiingen, krommingen, verlengingen, verkortingen en verplaatsingen van statische of dynamische aard. Vervormingen mogen het aanzien van een bouwwerk en de constructie niet schaden, noch het doelmatig functioneren ervan belemmeren. Voor de vervormingscriteria verwijst de Eurocode naar de NEN 6702. Tabel 7.4 geeft een overzicht van de gedefinieerde vervormingseffecten en toegestane vervormingswaarden.

Tabel 7.4 - Maximaal toegestane vervormingswaarden bij aangegeven belastinggevallen

| | bijkomende doorbuiging | | doorbuiging in eindtoestand | | afschot | trilling |
|---|------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|----------|-------------------------|
| | vloer | dak | vloer | dak | blijvend | |
| maximaal toegestane vervormingswaarde bij aangegeven belastinggevallen | 0,003 ¹⁾²⁾ | 0,004 ¹⁾ | 0,004 ¹⁾ | 0,004 ¹⁾ | – | \hat{f} ³⁾ |
| direct optredende vervorming t.g.v.: | | | | | | |
| – <i>eigen gewicht en rustende (= permanente) belasting</i> | | | × | × | × | × |
| – <i>extreme waarden opgelegde belasting (gelijkmatig verdeeld of puntlast)</i> | × | × | × | × | × | |
| – <i>momentane waarden opgelegde belasting (gelijkmatig verdeeld)</i> | | | | | | × |
| vertraagd optredende vervorming t.g.v.: | | | | | | |
| – <i>eigen gewicht en rustende belasting (permanente belasting)</i> | × | × | × | × | × | × |
| – <i>permanent aanwezig deel momentane belasting (60%)</i> | × | × | × | × | × | × |
| zeeg (of toog) ⁴⁾ | | | × | × | × | |

1) Van de overspanning (l_{rep}).

2) Voor vloeren met gemetselde scheidingswanden 0,002.

3) Eerste eigen frequentie bij vloeren met lopende mensen moet groter zijn dan 3 Hz.

Eerste eigen frequentie bij vloeren met springende mensen moet groter zijn dan 5 Hz.

Eerste eigen frequentie bij weinig of niet belopen vloeren: geen eis.

Bij permanente belasting (gelijkmatig verdeeld) $\geq 5 \text{ kN/m}^2$ of puntlast $\geq 150 \text{ kN}$: geen eis.

4) Een meestal opwaartse ronding die tijdens de uitvoering met opzet wordt aangebracht.

f. Waarden voor eigen gewicht van bouwwerkdelen

Constructiedelen en bouwwerkdelen

Eigen gewichten van constructiedelen en gewichten van bouwwerkdelen zijn te berekenen met het (soortelijk) gewicht van de afzonderlijke materialen. Tabel 7.5 geeft het gewicht per oppervlakte voor een aantal veel voorkomende samengestelde constructiedelen.

Tabel 7.5 - Gewicht per oppervlakte voor een aantal samengestelde constructiedelen [kN/m²]

| constructiedelen en afwerkingen | gewicht per oppervlakte [kN/m ²] |
|--|--|
| - houten vloer met houten balken (zonder plafond) bij ten hoogste 4,5 m overspanning; | 0,30 |
| - plafond van gips of cementmortel op riet, steen of metaalgaas met inbegrip van latten en tegels; | 0,35 |
| - idem met plafondhangers bij ten hoogste 4,5 m overspanning; | 0,40 |
| - pannendak met latten, tengels, bebording en gordingen; | 0,75 |
| - pannendak met latten, sporen en gordingen; | 0,70 |
| - leiendak met bebording, sporen en gordingen; | 0,55 |
| - zinken dak met bebording en gordingen; | 0,30 |
| - 2 laagse bitumineuze dakbedekking of EPDM-folie met bebording en balken; niet inbegrepen de afdekking met grind; | 0,30 |
| - gegalaniseerde golfplaat incl. bevestigingsmiddelen en gordingen; | 0,15 |
| - gewicht ballastlaag grind per 0,01 m dikte | 0,16 |

Voor bepaalde onderdelen is het verstandig wel een belasting op te nemen zoals:

- lichte verplaatsbare scheidingswanden voor een vrij in te delen ruimte, gewicht max. 300 kg/m² wand; reken een q-last van 1,20 kN/m².
- vloerafwerking (smeervloer, parket, tapijt, tegels) reken een q-last van 0,50 kN/m².
- installatie, (leidingen, kabels, kanalen en verlichting) reken een q-last van 0,50 kN/m².

Denk ook aan het gewicht van *vaste tussenmuren* (metselwerk!) en de *gevel*. Dit zijn lijnlasten op de vloer en de belastingwaarde kan behoorlijk oplopen.

g. Waarden voor veranderlijke belastingen

Horizontale opgelegde belastingen

De statische *horizontale* opgelegde belastingen op borstweringen, (trap)balustraden en scheidingswanden moeten zijn ontleend aan §8.2.6 van NEN 6702. Hiervoor geldt een belangrijke voorwaarde de wand of balustrade moet een hoogteverschil van meer dan 0,60 meter afschermen. Rekening moet worden gehouden met de ongunstigste van de onderstaande opgelegde belastingen, die op de bovenregel van de balustrade of leuning aangrijpen:

- een horizontale lijnlast q_k ;
- een enkele horizontale puntlast Q_k op een oppervlakte van 0,2m × 0,2m.

Voor grootte van de belasting zie tabel 7.6, voor overige informatie zie 8.2.6 van NEN 6702.

Tabel 7.6 - Lijnlasten en geconcentreerde opgelegde belastingen op borstweringen, balustraden en scheidingswanden

| Klasse van specifiek gebruik | <i>belastingen</i> | |
|----------------------------------|-------------------------------|---------------|
| | q_k [kN/m ¹] | Q_k [kN] |
| A wonen en huishoudelijk gebruik | 0,5 | 1,0 |
| B kantoren | 0,8 | 1,0 |
| C bijeenkomst van mensen | 3,0 | 1,0 |
| D winkels | 0,8 | 1,0 |

In bepaalde gevallen moet men rekening houden met het optreden van een opgelegde horizontale belasting, bijv. als gevolg van remkrachten. De opgelegde horizontale belasting die op kan treden door bewegende mensenmassa's (bij tribunes e.d.) moet in twee onderling loodrechte richtingen in rekening worden gebracht. Als indicatie kan 10% van de opgelegde belasting worden aangehouden. Eigenlijk is een dynamische berekening gewenst.

belastingen op vloeren en daken

Tabel 7.7 Verdeelde en geconcentreerde opgelegde belastingen op vloeren

| Klasse van gebruik van belaste oppervlakken | <i>vloeren</i> | | <i>ontsluitingsweg</i> | | <i>momentaanfactoren</i> | | |
|---|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|--------------------------|----------|----------|
| | q_k [kN/m ²] | $Q_k^{(1)}$ [kN] | q_k [kN/m ²] | $Q_k^{(1)}$ [kN] | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
| A wonen en huishoudelijk gebruik <i>kamers in woongebouwen en huizen; ziekenkamers en - zalen in ziekenhuizen; slaapkamers in hotels en tehuizen; keukens en toiletten balkons</i> | 1,75 | 3,0 | 2,0 | 3,0 | 0,4 | 0,5 | 0,3 |
| B kantoren | 2,5 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 0,5 | 0,5 | 0,3 |
| C bijeenkomst van mensen | | | | | | | |
| C.1 ruimten met tafels <i>ruimten in scholen, restaurants, cafés, eetzalen, leeszalen, ontvangstruimten.</i> | 4,0 | 7,0 | 5,0 | 7,0 | 0,25 | 0,7 | 0,6 |
| C.2 ruimten met vaste zitplaatsen <i>ruimten in kerken, theaters, bioscopen, conferentiezalen, collegezalen, wachtkamers</i> | 4,0 | 7,0 | 5,0 | 7,0 | 0,25 | 0,7 | 0,6 |
| C.3 ruimten zonder obstakels <i>ruimten in musea, tentoonstellingsruimten, toegangsruimte in openbare en administratieve gebouwen, hotels, ziekenhuizen, stationshallen</i> | 5,0 | 7,0 | 5,0 | 7,0 | 0,25 | 0,7 | 0,6 |
| C.4 ruimten voor fysieke activiteiten <i>ruimten t.b.v. o.a. lichamelijke beweging, danszalen, turnzalen, toneel-/balletpodia</i> | 5,0 | 7,0 | 5,0 | 7,0 | 0,25 | 0,7 | 0,6 |
| C.5 ruimten met grote mensenmassa's <i>ruimten in gebouwen voor openbare evenementen, concertzalen, tribunes, stationsperrons, sporthallen met inbegrip van balkons</i> | 5,0 | 7,0 | 5,0 | 7,0 | 0,25 | 0,7 | 0,6 |
| D winkels | | | | | | | |
| D.1 kleinhandel | 4,0 | 7,0 | 4,0 | 4,0 | 0,4 | 0,7 | 0,6 |
| D.2 warenhuizen | 4,0 | 7,0 | 4,0 | 4,0 | 0,4 | 0,7 | 0,6 |

| | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|----------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| E | opslag en industrieel gebruik | | | | | | | |
| E.1 | winkels | $\geq 5,0$ | $\geq 7,0$ | 4,0 | 4,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| E.1 | bibliotheken | $\geq 2,5^{2)}$ | $\geq 3,0$ | 3,0 | 3,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| E.1 | overige opslag | $\geq 5,0$ | ≥ 10 | 4,0 | 4,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| E.2 | industrieel gebruik | $\geq 3,0^{3)}$ | $\geq 7,0^{3)}$ | 4,0 | 4,0 | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| garages en voertuigverkeersruimten | | | | | | | | |
| F | verkeersruimte, voertuiggewicht $\leq 25 \text{ kN}^{4)}$ | 2,0 | 10,0 | | | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| G | verkeersruimte, $25 \text{ kN} \leq \text{voertuiggewicht} \leq 120 \text{ kN}^{4)}$ | 5,0 | 40,0 | | | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| daken | | | | | | | | |
| H | niet toegankelijk (onderhoud) ^{8) 9)} | 1,0 ^{5) 6)} | 1,5 ⁷⁾ | | | | | |
| I | daken boven ruimten onder maaiveld (geen verkeersbelasting) ⁹⁾ | 4,0 | 7,0 | | | | | |

In het geval van vrije randen, zoals bij overkragende vloeren, trapopeningen en balkons, moet een lijnlast zijn toegepast van ten minste $q_k = 5,0 \text{ kN/m}^1$ over een lengte van 1,0m en binnen een afstand van 0,1m van de rand.

- 1) Q_k moet zijn beschouwd aan te grijpen op elke willekeurige plaats van de vloer, het balkon of trap, verdeeld over een oppervlak met een vorm die past bij het gebruik en de vorm van de vloer. Gewoonlijk mag als vorm een vierkant worden aangenomen met een zijde van 50mm.
- 2) Belastingwaarde toe te passen voor de ruimten tussen de stellingen. De belasting door boeken e.d. in bibliotheken en archiefstukken moet worden bepaald op basis van de hoogte en de overige afmetingen van de stellingen, zoals opgegeven bij de aanvraag van de bouwvergunning. Voor de ruimte waar de stellingen zijn geplaatst, moet de volgende belasting q_k zijn toegepast:

$$q_k = \frac{A_1 \cdot \gamma_{bk} \cdot h + A_2 \cdot p_0}{A_1 + A_2}$$

q_k = vloerbelasting [kN/m^2]

A_1 = vloeroppervlakte ingenomen door de stellingen [m^2]

A_2 = resterende vloeroppervlakte [m^2]

γ_{bk} = volumiek gewicht van in de stellingen opgeslagen boeken ; $\gamma_{bk} = 6 \text{ kN/m}^3$

h = hoogte van de stelling [m]

p_0 = gelijkmatig verdeelde belasting tussen de stellingen; $p_0 = 2,5 \text{ kN/m}^2$

- 3) Afhankelijk van het bedoelde gebruik, maar niet kleiner dan aangegeven waarde.
- 4) Voor banen en hellingbanen van parkeergarages moet een extra horizontale remkracht op het wegooppervlak zijn toegepast. Deze belasting moet zijn beschouwd als een statische belasting. Voor voertuigen met een gewicht tot 25 kN moet een horizontale kracht van 10 kN zijn gebruikt. Voor voertuigen met een gewicht groter dan 25 kN moet de horizontale kracht per baan zijn bepaald met $Q_k = m \times a$, in N, waarbij m is de massa van het volledige beladen voertuig in kg en a is de vertraging ten gevolge van de remvertraging, in m/s^2 .
- 5) De belasting q_k werkt op elk afzonderlijk dakelement tot een maximum oppervlakte van 10 m^2 . Voor dakelementen met een grotere oppervlakte moet het belaste gebied gelijk aan 10 m^2 zijn genomen, waarbij de grootste lengte niet groter mag zijn dan 5m.
- 6) Voor daken onder een helling $> 15^\circ$ geldt een reductie, zie hiervoor tabel 6.10 NEN-EN 1991-1-1.
- 7) Q_k werkt op een oppervlakte van $0,1 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$. In geval van direct onder dakbeschot of dakplaten gelegen elementen zoals gordingen, spanten en liggers moet een geconcentreerde last in rekening zijn gebracht, gelijk aan $Q_k = 2,0 \text{ kN}$.
- 8) Naast Q_k en q_k moet een lijnlast zijn beschouwd van 2 kN/m^1 werkend over een lengte van 1,0m en een breedte van 0,1m. Deze lijnlast werkt op het gehele dakvlak en op ieder afzonderlijk element.
- 9) Belastingen door regenwater op daken moeten zijn ontleend aan 8.7.1. van NEN 6702.

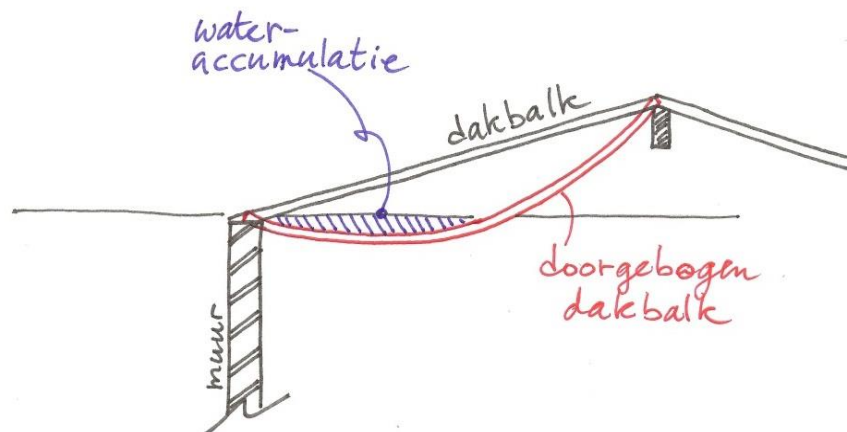
h. Belasting door regenwater; wateraccumulatie vermijden!

De belasting door regenwater speelt hoofdzakelijk bij platte daken een rol, met name wanneer het gevaar van wateraccumulatie bestaat. Wateraccumulatie moet zoveel mogelijk worden voorkomen, omdat er anders zeer hoge belasting kunnen ontstaan: 70 mm water is al meer dan de maximale sneeuwbelasting!

Wateraccumulatie ontstaat wanneer één of meer hemelwaterafvoeren zijn verstopt en er verder geen noodafvoeren zijn. Bij regen blijft er dan extra water op het dak staan, waardoor het dak extra doorbuigt. Op het diepste punt (in het midden van de overspanning) verzamelt zich dan nog meer water, waardoor de doorbuiging weer verder toeneemt enz. Wanneer dit proces zich zelf versterkt, leidt dat uiteindelijk tot het bezwijken van de constructie. Dit gebeurt nog steeds enkele keren per jaar in Nederland. Vaak in de zomer bij verstopte regenpijpen tijdens een heftige onweersbui.

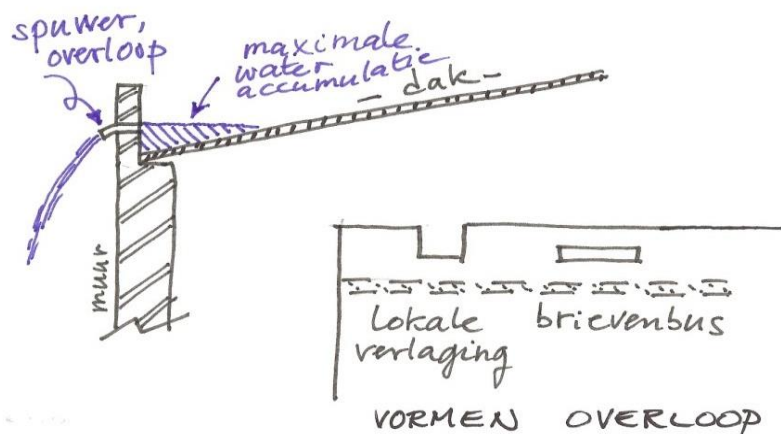
Om dit te voorkomen, staat de constructeur een aantal maatregelen ter beschikking.

- Zorgen voor voldoende dakafschot. Het dakafschot moet zodanig zijn dat de helling van het dak in doorgebogen toestand op het laagste punt nog net positief is.
- Er ook rekening mee houden dat de dakbalken door eigen gewicht en de dakbekleding (dakpannen!) doorbuigen. Deze doorbuiging mag nooit aanleiding geven tot een steeds dieper en dus zwaarder wordende plas water op het dak!



Enigszins overdreven getekende, te veel doorbuigende dakbalk ter illustratie van dit vervelende effect. De dakbalken moeten zo stijf zijn dat dit verschijnsel nooit kan optreden.

- Zorgen voor voldoende noodafvoeren bij daken met opstaande dakranden. Er moet rekening worden gehouden met verstopte regenafvoeren. NEN 6702 geeft in artikel 8.7.1 een methode om de belasting door wateraccumulatie te bepalen; deze methode valt echter buiten het kader van dit dictaat. In het algemeen geldt dat de stijghoogte van het water gelijk is aan de afstand tussen het diepste punt van het dak en de onderkant van de noodafvoer. Bij afwezigheid van een noodafvoer moet rekening worden gehouden met een stijghoogte van het water tot aan de dakrand. Ook moeten de doorlaten een bepaalde afmetingen hebben om snel genoeg het overtollige regenwater af te voeren.



i. Windbelasting

De *windbelasting* is een opgelegde, vrije belasting. Voor het bepalen van de krachtverdeling in bouwconstructies moet de windbelasting worden beschouwd als een quasi-statische belasting. In belastingcombinaties geldt voor de windbelasting: ($\psi_0 = 0,0$; $\psi_1 = 0,2$; $\psi_2 = 0,0$).

Stuwdruk

Tabel 7.8 geeft waarden voor de door de wind veroorzaakte *stuwdruk* q_p werkend in de windrichting voor verschillende hoogten van gebouwen. Hierbij worden de gebieden volgens figuur 7.3 onderscheiden. Bij de grens tussen de gebieden moet lineair worden geïnterpoleerd: van een punt in gebied I (resp. II), 5 km vanaf de grenslijn met gebied II (resp. III), naar de grenslijn zelf. Tevens zijn een drietal ruwheidsklassen voor het terrein gespecificeerd: onbebouwd, bebouwd en kuststrook. De laatste terreincategorie is voor gebouwen nabij grote wateroppervlakken. Naast de Noordzeekust geldt dit tevens voor gebouwen langs het IJsselmeer, de Zeeuwse wateren of de Waddenzee. De kuststrook wordt bepaald door de volgende randvoorwaarden:

- De afstand van het bouwwerk tot open water, met een strijklengte van 2 km, is minder dan 10 x de bouwwerkhoogte;
- Het bouwwerk heeft een hoogte die ten minste tweemaal de gemiddelde hoogte is van de gebouwen en andere obstakels die zich in de desbetreffende sector tussen het bouwwerk en het open water bevinden. Voor de indeling van een gebied in sectoren rondom een bouwwerk zie figuur 7.4;
- Het bouwwerk is niet gelegen in windgebied III.

De ongunstigste combinatie van gelijktijdig optredende (verdeelde) windbelastingen moet in rekening worden gebracht volgens (zie ook figuur 7.5):

$$q_{rep} = C_s C_d \times C_f \times q_p$$

$$F_{rep} = A \cdot q_{rep}$$

waarin:

q_{rep} = windbelasting door winddruk, -zuiging, -wrijving en over- of onderdruk [kN/m^2]

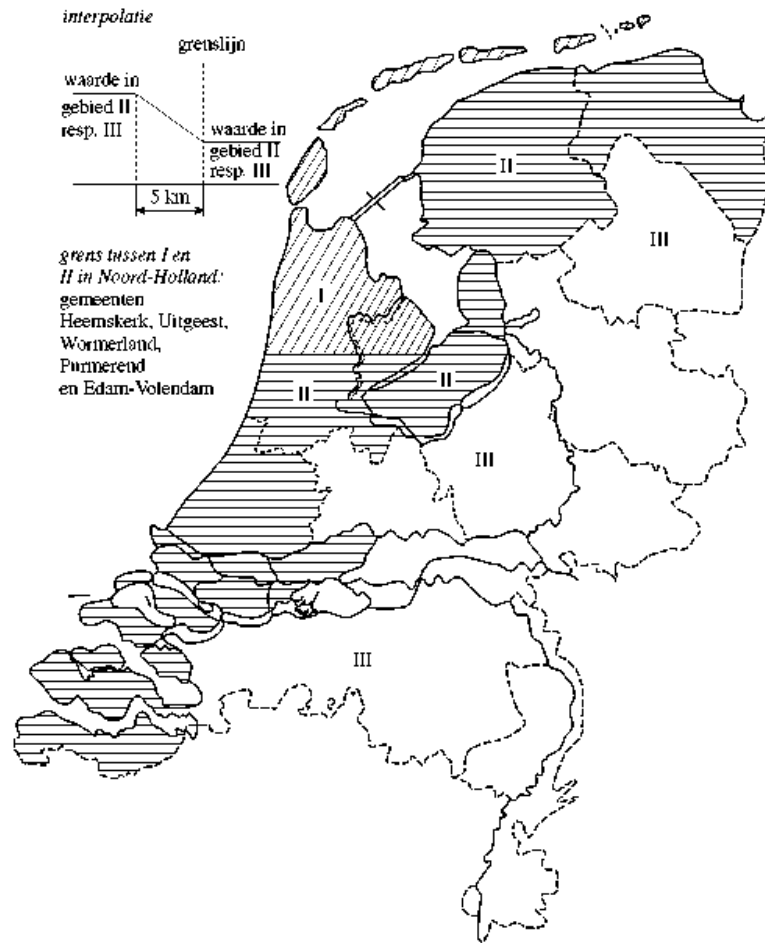
q_p = stuwdruk [kN/m^2]

$C_s C_d$ = bouwwerkfactor die effecten van fluctuerende wind op het bouwwerk in rekening brengt.

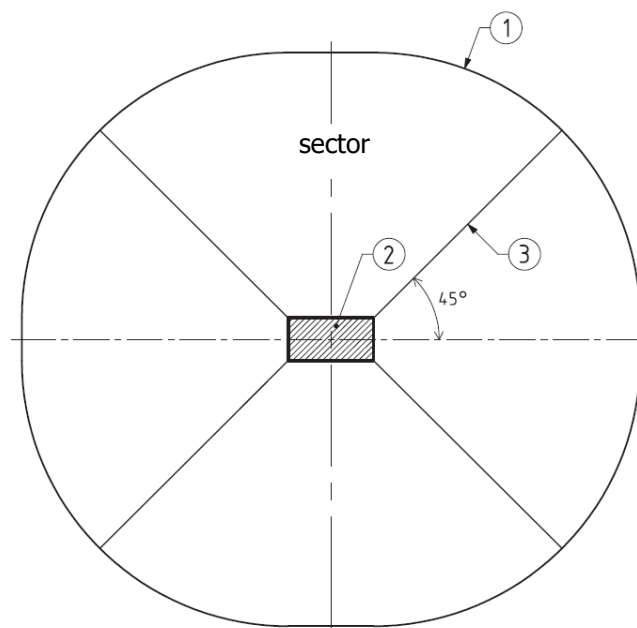
C_f = vormfactoren

Indeling Nederland in gebieden voor de windbelasting

NB. In de Europese norm (deel van het Bouwbesluit) geldt, langs de kust van de Noordzee, het IJsselmeer en meren waar de wind over 2 km water kan komen aanrazen, een hogere windbelasting.



Figuur 7.3 Te onderscheiden stuwdrukgebieden in Nederland.



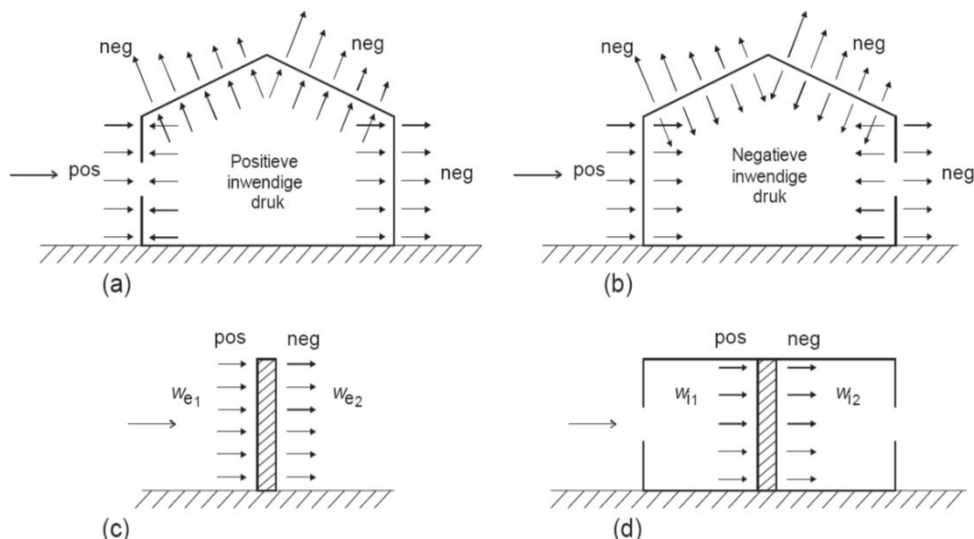
Figuur 7.4 Indeling van een gebied in 4 sectoren rondom een bouwwerk (1 = gebiedsgrens; 2 = bouwwerk; 3 = sectorgrens).

Tabel 7.8 - Extreme stuwdruk in kN/m² als functie van de hoogte.¹⁾

| Hoogte m | Gebied I | | | Gebied II | | | Gebied III | |
|-------------|----------|-----------|---------|-----------|-----------|---------|------------|---------|
| | kust | onbebouwd | bebouwd | kust | onbebouwd | bebouwd | onbebouwd | bebouwd |
| 1 | 0,93 | 0,71 | 0,69 | 0,78 | 0,60 | 0,58 | 0,49 | 0,48 |
| 2 | 1,11 | 0,71 | 0,69 | 0,93 | 0,60 | 0,58 | 0,49 | 0,48 |
| 3 | 1,22 | 0,71 | 0,69 | 1,02 | 0,60 | 0,58 | 0,49 | 0,48 |
| 4 | 1,30 | 0,71 | 0,69 | 1,09 | 0,60 | 0,58 | 0,49 | 0,48 |
| 5 | 1,37 | 0,78 | 0,69 | 1,14 | 0,66 | 0,58 | 0,54 | 0,48 |
| 6 | 1,42 | 0,84 | 0,69 | 1,19 | 0,71 | 0,58 | 0,58 | 0,48 |
| 7 | 1,47 | 0,89 | 0,69 | 1,23 | 0,75 | 0,58 | 0,62 | 0,48 |
| 8 | 1,51 | 0,94 | 0,73 | 1,26 | 0,79 | 0,62 | 0,65 | 0,51 |
| 9 | 1,55 | 0,98 | 0,77 | 1,29 | 0,82 | 0,65 | 0,68 | 0,53 |
| 10 | 1,58 | 1,02 | 0,81 | 1,32 | 0,85 | 0,68 | 0,70 | 0,56 |
| 15 | 1,71 | 1,16 | 0,96 | 1,43 | 0,98 | 0,80 | 0,80 | 0,66 |
| 20 | 1,80 | 1,27 | 1,07 | 1,51 | 1,07 | 0,90 | 0,88 | 0,74 |
| 25 | 1,88 | 1,36 | 1,16 | 1,57 | 1,14 | 0,97 | 0,94 | 0,80 |
| 30 | 1,94 | 1,43 | 1,23 | 1,63 | 1,20 | 1,03 | 0,99 | 0,85 |
| 35 | 2,00 | 1,50 | 1,30 | 1,67 | 1,25 | 1,09 | 1,03 | 0,89 |
| 40 | 2,04 | 1,55 | 1,35 | 1,71 | 1,30 | 1,13 | 1,07 | 0,93 |
| 45 | 2,09 | 1,60 | 1,40 | 1,75 | 1,34 | 1,17 | 1,11 | 0,97 |
| 50 | 2,12 | 1,65 | 1,45 | 1,78 | 1,38 | 1,21 | 1,14 | 1,00 |
| 55 | 2,16 | 1,69 | 1,49 | 1,81 | 1,42 | 1,25 | 1,17 | 1,03 |
| 60 | 2,19 | 1,73 | 1,53 | 1,83 | 1,45 | 1,28 | 1,19 | 1,05 |
| 65 | 2,22 | 1,76 | 1,57 | 1,86 | 1,48 | 1,31 | 1,22 | 1,08 |
| 70 | 2,25 | 1,80 | 1,60 | 1,88 | 1,50 | 1,34 | 1,24 | 1,10 |
| 75 | 2,27 | 1,83 | 1,63 | 1,90 | 1,53 | 1,37 | 1,26 | 1,13 |
| 80 | 2,30 | 1,86 | 1,66 | 1,92 | 1,55 | 1,39 | 1,28 | 1,15 |
| 85 | 2,32 | 1,88 | 1,69 | 1,94 | 1,58 | 1,42 | 1,30 | 1,17 |
| 90 | 2,34 | 1,91 | 1,72 | 1,96 | 1,60 | 1,44 | 1,32 | 1,18 |
| 95 | 2,36 | 1,93 | 1,74 | 1,98 | 1,62 | 1,46 | 1,33 | 1,20 |
| 100 | 2,38 | 1,96 | 1,77 | 1,99 | 1,64 | 1,48 | 1,35 | 1,22 |
| 110 | 2,42 | 2,00 | 1,81 | 2,03 | 1,68 | 1,52 | 1,38 | 1,25 |
| 120 | 2,45 | 2,04 | 1,85 | 2,05 | 1,71 | 1,55 | 1,41 | 1,28 |
| 130 | 2,48 | 2,08 | 1,89 | 2,08 | 1,74 | 1,59 | 1,44 | 1,31 |
| 140 | 2,51 | 2,12 | 1,93 | 2,10 | 1,77 | 1,62 | 1,46 | 1,33 |
| 150 | 2,54 | 2,15 | 1,96 | 2,13 | 1,80 | 1,65 | 1,48 | 1,35 |
| 160 | 2,56 | 2,18 | 2,00 | 2,15 | 1,83 | 1,67 | 1,50 | 1,38 |
| 170 | 2,59 | 2,21 | 2,03 | 2,17 | 1,85 | 1,70 | 1,52 | 1,40 |
| 180 | 2,61 | 2,24 | 2,06 | 2,19 | 1,88 | 1,72 | 1,54 | 1,42 |
| 190 | 2,63 | 2,27 | 2,08 | 2,20 | 1,90 | 1,75 | 1,56 | 1,44 |
| 200 | 2,65 | 2,29 | 2,11 | 2,22 | 1,92 | 1,77 | 1,58 | 1,46 |

¹⁾ Voor de gebiedsindeling, zie figuur 7.3.

²⁾ Voor vaststelling terreinruwheid bebouwd, onbebouwd, en kuststrook, zie NEN-EN 1991-1-4, art 4.3.2

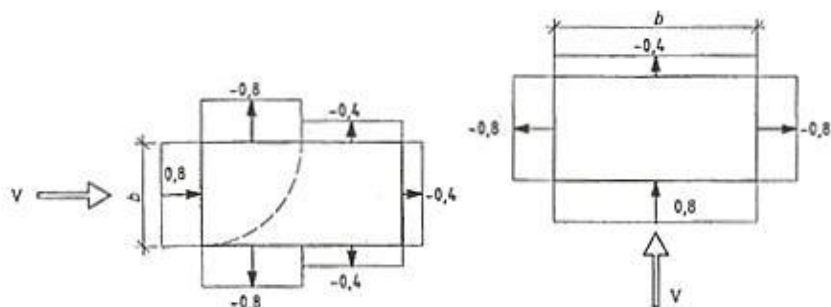


Figuur 7.5 Door de wind veroorzaakte krachten op (onderdelen van) bouwwerken

Vormfactor (C_f)

De vormfactor wordt bepaald door de uitwendige (C_{pe}) en inwendige (C_{pi}) drukcoëfficiënten voor gebouwen.

Bij de uitwendige drukcoëfficiënten voor verticale gevels met rechthoekige plattegronden wordt onderscheid gemaakt tussen belaste oppervlakken A van 1 m^2 ($C_{pe,1}$) en 10 m^2 ($C_{pe,10}$). Ze zijn afhankelijk van de gebouwslankheid h/d . In de norm is een tabel met waarden opgenomen. Voor tussenliggende waarden van h/d moet lineair zijn geïnterpoleerd. In figuur 7.6 zijn de windvormfactoren gegeven voor verschillende zones in de gevel voor delen met een oppervlakte groter dan 10 m^2 .

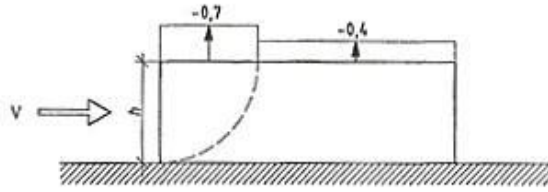


Windvormfactoren C_{pe} voor gevels van gebouwen met een rechthoekige plattegrond (voor delen met een oppervlakte groter dan 10 m^2)

OPMERKING Een positieve waarde van C_{pe} levert een belasting naar het vlak toe gericht (druk); een negatieve waarde van C_{pe} levert een belasting van het vlak af gericht (zuiging).

Figuur 7.6 Coëfficiëntgrootte voor de windkrachten op gevels.

In gevallen waar de windkracht op gebouwen is bepaald door de gelijktijdige toepassing van drukcoëfficiënten C_{pe} op loefzijde en lijzijde (zones D en E) van het gebouw, mag het gebrek aan correlatie tussen de winddruk aan de windzijde en lijzijde in rekening zijn gebracht door de resulterende kracht met een factor 0,85 te vermenigvuldigen.

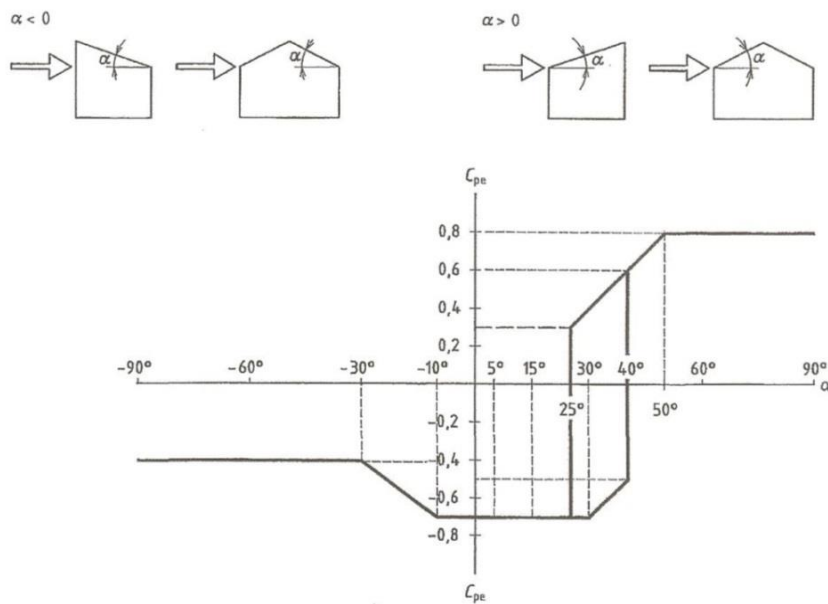


— Windvormfactoren C_{pe} voor daken van gebouwen met een rechthoekige plattegrond met een hellingshoek kleiner dan 10° (voor delen met een oppervlakte groter dan 10 m^2)

OPMERKING Een positieve waarde van C_{pe} levert een belasting naar het vlak toe gericht (druk); een negatieve waarde van C_{pe} levert een belasting van het vlak af gericht (zuiging).

Figuur 7.7 Coëfficiënten voor de windkrachten op platte daken.

Voor platte daken zijn in de norm eveneens uitwendige drukcoëfficiënten gegeven voor verschillende zones van het dak. Ook hier wordt onderscheid gemaakt tussen belaste oppervlakken A van 1 m^2 en van 10 m^2 . De coëfficiënten zijn afhankelijk van de vorm van de dakrand. Voor tussenliggende waarden van h/d moet lineair zijn geïnterpoleerd. In figuur 7.7 worden de drukcoëfficiënten of windvormfactoren voor platte daken gegeven voor een oppervlakte groter dan 10 m^2 . Voor de uitwendige drukcoëfficiënten op overige dakvormen wordt verwezen naar de norm. In figuur 7.8 zijn waarden gegeven voor hellende daken voor delen groter dan 10 m^2 . Figuur 7.9 toont de windvormfactoren voor luifels.

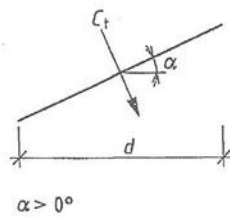


— Windvormfactoren C_{pe} voor daken van gebouwen met een rechthoekige plattegrond (voor delen met een oppervlakte groter dan 10 m^2)

Voor $25^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ moet zowel druk als zuiging zijn beschouwd.

OPMERKING Een positieve waarde van C_{pe} levert een belasting naar het vlak toe gericht (druk); een negatieve waarde van C_{pe} levert een belasting van het vlak af gericht (zuiging).

Figuur 7.8 Coëfficiënten voor de windkrachten op daken onder een helling.



| α | C_t | |
|----------|-------|-------|
| 0° | + 0,2 | - 1,3 |
| 5° | + 0,4 | - 1,4 |
| 10° | + 0,5 | - 1,4 |
| 15° | + 0,7 | - 1,3 |
| 20° | + 0,8 | - 1,4 |
| 25° | + 1,0 | - 1,6 |
| 30° | + 1,2 | - 1,8 |

Voor tussengelegen waarden mag lineair worden geïnterpoleerd.

– Windvormfactoren C_t voor eenzijdig hellende overkappingen

C_t is de sommatie van de vormfactoren onder en boven de overkapping. De stuwdruk moet zijn bepaald op het hoogste punt van het dakvlak.

Voor eenzijdig hellende overkappingen moet zijn aangenomen dat het aangrijpingspunt van de resulterende windkracht ligt op 1/4 van de overspanning vanaf de loefzijde. De positieve windvormfactoren treden op bij wind van links, ten opzichte van de in figuur A.8a geschetste situatie; de negatieve windvormfactoren bij wind van rechts.

Figuur 7.9 Coëfficiënten voor een luifel, uitkragend uit een gebouw.

Inwendige en uitwendige druk moet zijn beschouwd als tegelijkertijd optredend. De ongunstigste combinatie van uitwendige en inwendige druk moet zijn beschouwd voor elke combinatie van mogelijke openingen en andere tochtwegen. De inwendige drukcoëfficiënt C_{pi} hangt af van de grootte en verdeling van de openingen in de schil van het gebouw.

j. Sneeuwbelasting op daken

De sneeuwbelasting op een dakoppervlak (verticale projectie op het grondvlak) wordt berekend met:

$$s_{rep} = \mu_i \times s_k$$

waarin:

s_k = sneeuwbelasting op het dak [kN/m²];

μ_i = sneeuwbelastingvormcoëfficiënt [-];

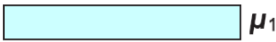
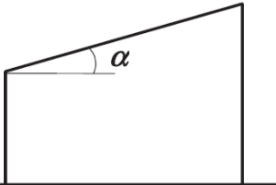



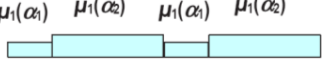
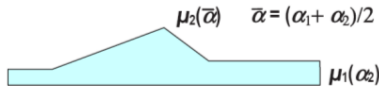


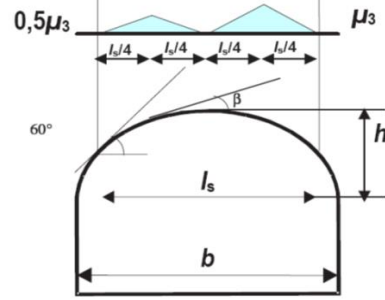
s_k = sneeuwbelasting op de grond [kN/m²].

Sneeuwbelasting op de grond:

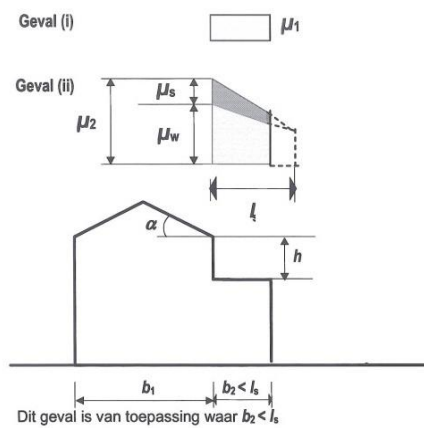
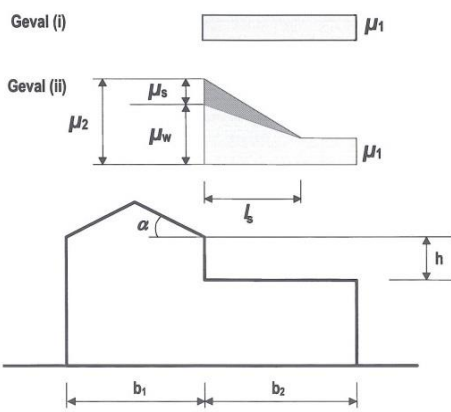
$$s_k = 0,7 \text{ [kN/m}^2\text{]}; (\psi_0 = 0,0; \psi_1 = 0,2; \psi_2 = 0,0)$$

Een overzicht van de sneeuwbelastingvormcoëfficiënten μ_1 en μ_2 is gegeven in tabel 7.10 (voor een compleet overzicht zie NEN-EN 1991-1-3). *Let vooral op de mogelijkheid dat sneeuw zich ergens ophoopt!*

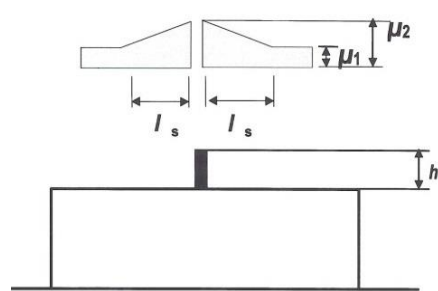
Tabel 7.10 Bepaling van sneeuwbelasting op daken

| Dakvorm + belastingverloop | dakhoek | vormfactor |
|--|-------------------------------------|--|
| 1. Platte daken en eenzijdig hellende daken | | |
|  | $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ | $\mu_1 = 0,8$ |
|  | $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ | $\mu_1 = 0,8 \times (60 - \alpha) / 30$ |
| | $\alpha \geq 60^\circ$ | $\mu_1 = 0,0$ |
| 2. Zadeldak | | |
| Geval (i)  | $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ | $\mu_1 = 0,8$ |
| Geval (ii)  | $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ | $\mu_1 = 0,8 \times (60 - \alpha) / 30$ |
| Geval (iii)  | $\alpha \geq 60^\circ$ | $\mu_1 = 0,0$ |
| 3. Zaagtandvormige daken | | |
| Geval (i)  | $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ | $\mu_1 = 0,8$ |
| | | $\mu_2 = 0,8 + (0,8 \times \alpha / 30)$ |
| Geval (ii)  | $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ | $\mu_1 = 0,8 \times (60 - \alpha) / 30$ |
| | | $\mu_2 = 1,6$ |
|  | $\alpha \geq 60^\circ$ | $\mu_1 = 0,0$ |
| | | $\mu_2 = -$ |
| 4. Cilinderdaken | | |
| Geval (i)  | $\beta > 60^\circ$ | $\mu_3 = 0,0$ |
| Geval (ii)  | $\beta \leq 60^\circ$ | $\mu_3 = 0,2 + 10 \times h / b \leq 2,0$ |

5. Sneeuwlast door afglijden en opwaaien



6. Sneeuwophoping ter plaatse van uitstekende delen en obstakels

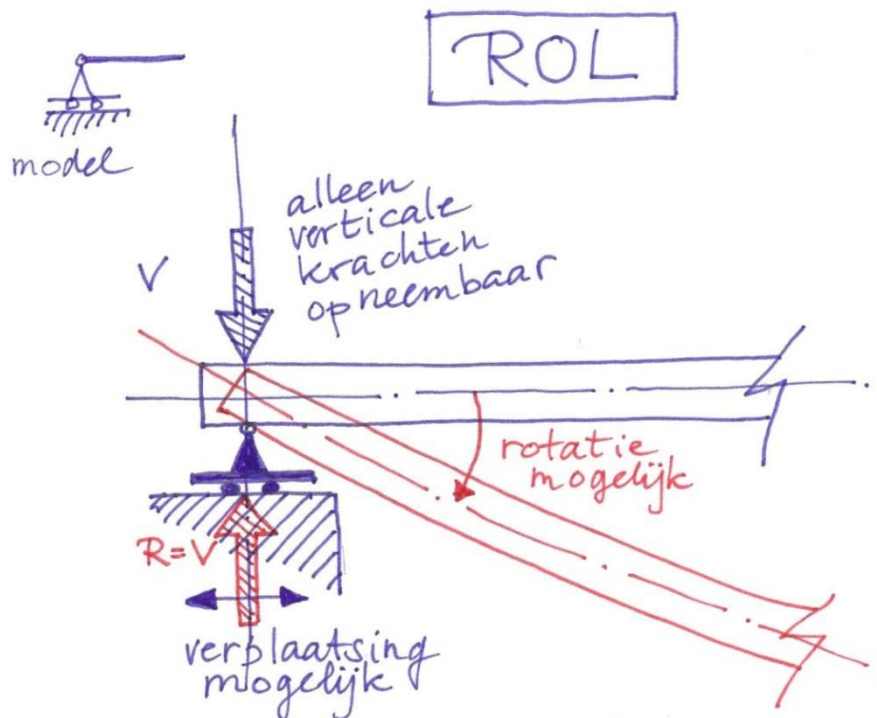


8 Opleggingen

Van groot belang is hoe een constructie-element aan zijn buurman of aan de ondergrond wordt vastgemaakt. Dit bepaalt in belangrijke mate de vervormingsmogelijkheden van het constructieonderdeel en daardoor de spanningen die in het constructie-element worden opgeroepen. We onderscheiden bij deze opleg-mogelijkheden vier hoofdtypen: 1. *de rol*, 2. *het scharnier*, 3. *de inklemming* en 4. een mengvorm met een speciale eigenschap: *de veer*.

8.1 Rol

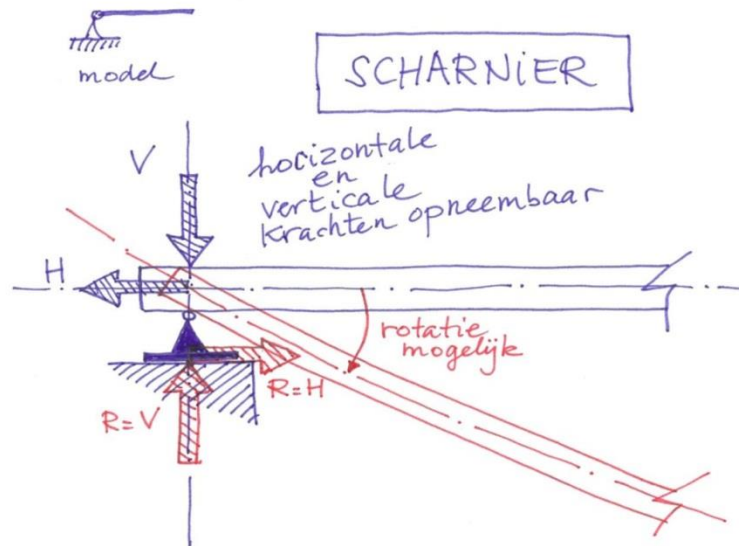
Een rol is de simpelste methode om bijvoorbeeld een balk op te leggen. Je legt tussen de balk en de muur waarop hij rust een stalen kogel of een ronde staaf. Door deze kogel/ staaf wordt de druk van het gewicht van de balk en de belasting op de balk prima door gegeven maar bij een horizontale kracht verrolt de kogel/ staaf zonder weerstand te bieden.



Een rol of roloplegging kan dus alleen verticale krachten doorgeven en geen horizontale krachten. Ook kan de balk bij deze oplegging vervormen; als de balk doorbuigt kan hij bij de oplegging verdraaien. Met het verhaal van stabiliteit in gedachte (stabiliteit = opname mogelijkheid horizontale krachten) is een rol natuurlijk een gevaarlijke oplegging. Voor temperatuurvervorming (uitzetten en krimpen) biedt een roloplegging echter juist weer een belangrijke mogelijkheid.

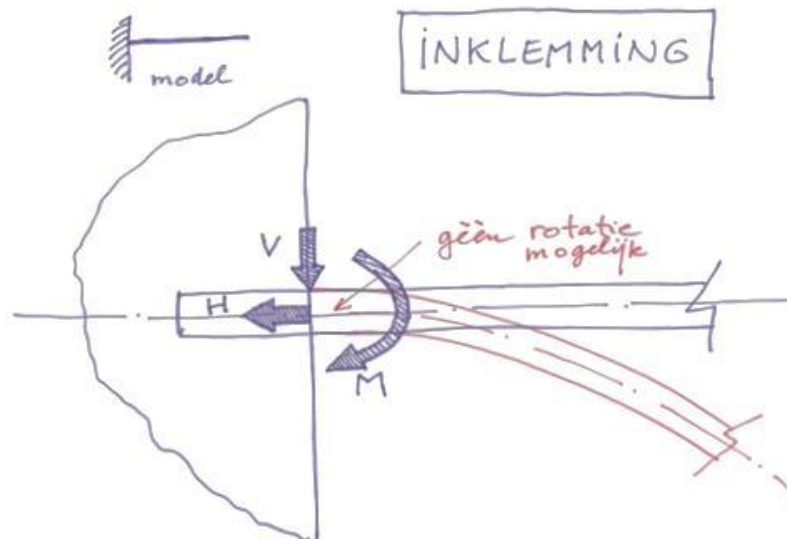
8.2 Scharnier

De volgende aansluitingsmogelijkheid is een scharnier. Dit kun je letterlijk opvatten als het scharnier van een deur. Een scharnier kan niet verplaatsen, zowel horizontaal als verticaal niet, maar wel verdraaien: een rotatie ondergaan.

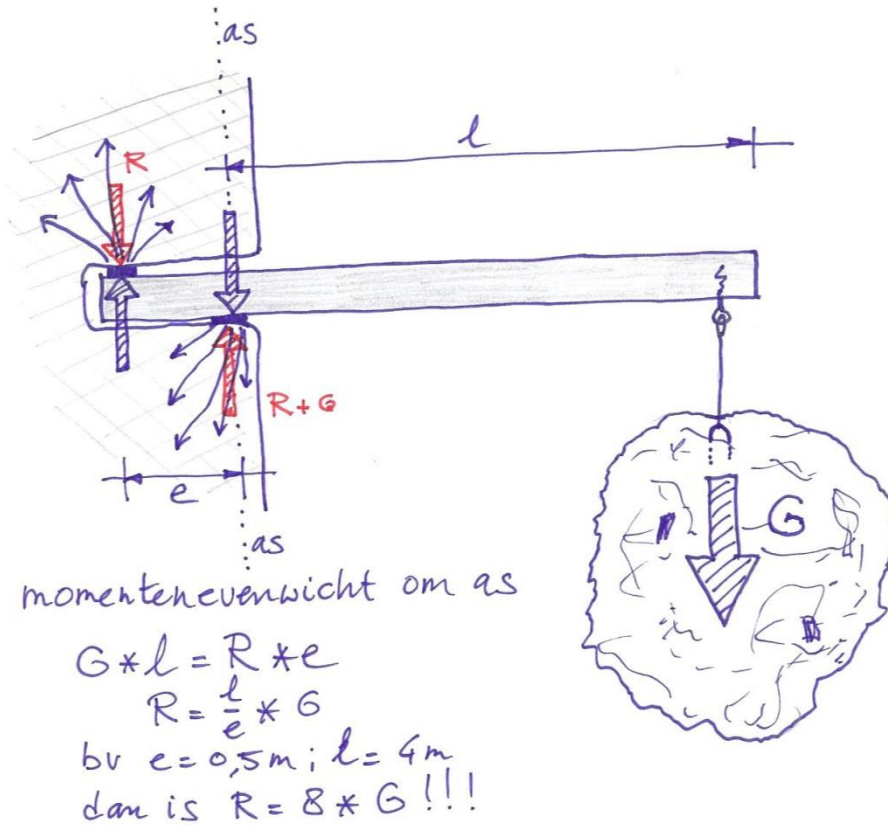


8.3 Inklemming

Een inklemming geeft een buigvaste verbinding met de fundering of met bijvoorbeeld een muur.



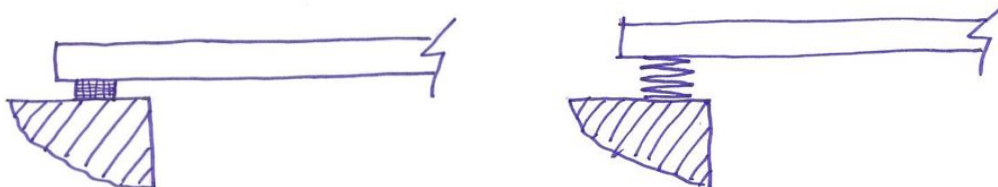
Bedenk wel dat de balk een goed eind in de muur moet steken anders werkt het mechanisme van inklemmen niet goed. In het onderstaande figuur is dit mechanisme afgebeeld. Let goed op dat er maar beperkte gebieden zijn waar de inklemming ontstaat. Hier ontstaan in het materiaal waar de muur uit is opgebouwd plaatselijk grote spanningen die de aanleiding kunnen geven tot scheuren en zelfs het eruit vallen van de balken.



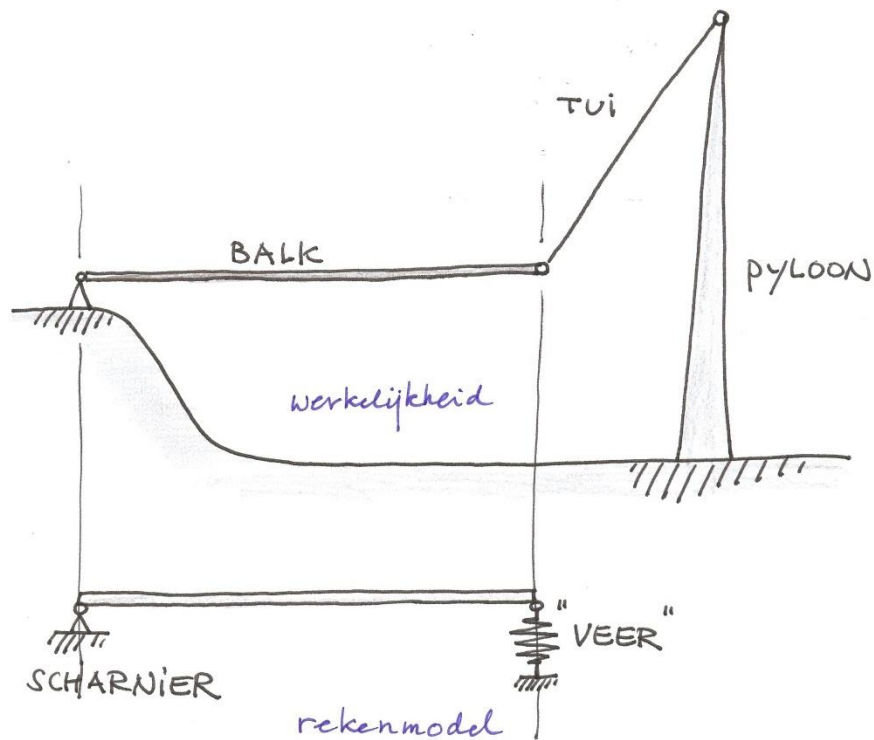
Op bovenstaande figuur is goed te zien hoe een inklemming bij een gat in de muur 'werkt' (geen trekkracht opname in het materiaal van de muur!). Het gewicht van het rotsblok doet de balk doorbuigen. De balk op zijn beurt gaat ter plaatse van de muur op de voorzijde drukken en wil daardoor als het ware omhoog wippen aan de achterkant van de balk, het verst in de muur. Hier gaat de balk dus tegen de bovenkant van het gat aandrukken. De kleine hefboomsarm e in de muur kan grote gevolgen hebben. In de figuur is te zien dat de krachten daar een factor 8 toenemen!

8.4 'Veer'

Een veer is eigenlijk een bijzonder type scharnier (of rol). Door de vervorming van de veer is de verticale verplaatsing niet nul maar een bepaalde waarde. Een veer is bijvoorbeeld een blok rubber of neopreen (= kunstrubber) of een gewonden spiraal van metaal, de veer zoals we die kennen uit je balpen.

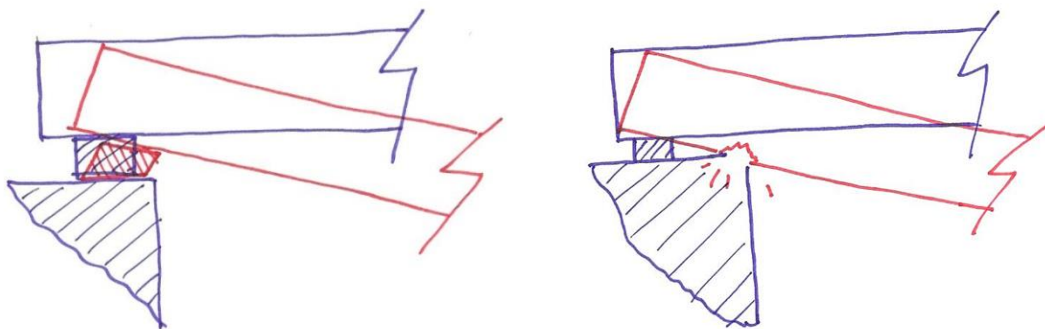


Grafische weergave van een veer-oplegging: een rubber blok en een stalen veer.



Een veer kan ook een kabel zijn, die door zijn (elastische) uitrekking als een veer werkt.

Bij het moeten optreden van een rotatie of een translatie biedt een veer goede oplegmogelijkheden. Vooral bij zwaarbelaste balken geeft een veer goede oplegmogelijkheden zonder tot schade (= afbreken stukken balk of stukken muur (afboeren)) bij doorbuigen te leiden.



9 Bouwmaterialen

Men kan gebouwen uit diverse materialen opbouwen. De materialen waarmee men het draagskelet van een gebouw mee opbouwt, noemt men bouwmaterialen. Dit in tegenstelling tot de afbouwmaterialen, dat zijn de materialen waarmee men de draagstructuur invult om er een volwaardig, functioneel gebouw van te maken. Het draagskelet : balken, kolommen, vloeren en dragende (of constructieve) wanden draagt dus letterlijk het gebouw (zwaartekracht) en geeft weerstand tegen horizontale krachten (wind, aardbeving). De afbouw vult de niet dragende wanden en de gevel in. Natuurlijk moeten deze afbouwelementen wel hun eigen gewicht en de andere, er eventueel op werkende krachten, zoals er tegenaan vallen of windbelasting, kunnen opnemen. Er zijn een aantal bouwmaterialen beschikbaar.



Eén van de eerste bouwwerken van de mens, een hut opgebouwd uit takken. Door het samenbinden aan de top en het verankeren in de grond is de hut stabiel en kan bekleed worden met bladertakken, dierenvellen of doek.

Vanuit de geschiedenis van de mens geredeneerd hadden we eerst *hout* en *natuursteen* als bouw materiaal, daarna kwam gebakken klei, bakstenen in de vorm van *metselwerk* erbij en vanaf midden 19^{de} eeuw deed *ijzer* en vervolgens *staal* op grote schaal zijn intrede in de bouw. Vervolgens betrad begin 20^{ste} eeuw beton, of beter, *gewapend beton* op grote schaal de bouw wereld. *Staal* en *beton* zijn dus niet eens van die oude bouw materialen! Tot slot volgden einde 20^{ste} eeuw twee nieuwe bouw materialen: *glas* en *composiet* (= kunststof moeder materiaal met hoge sterkte kunststof wapening). Deze laatste bouw materialen functioneren nog in de pioniersfase en zijn nog niet algemeen geaccepteerd.

9.1 Hout

Hout is waarschijnlijk het oudste constructiemateriaal dat de mens kent. Zo als algemeen bekend is wordt hout gemaakt van bomen. Hak een boom om in het bos en zaag of kloof de stam in delen en je krijgt balken, planken, latten en schaaldelen. Schaaldelen zijn stukken boomstam waar de schors deels nog opzit. Balken zijn redelijke grote rechthoekige houten delen, planken zijn houten delen die wel breed maar niet zo dik zijn en latten zijn eigenlijk kleine maat balken, meestal vierkant. Eén speciaal houtproduct moet nog genoemd worden: het *finer*. Dit is een dunne plaat hout die van een ronddraaiende boomstam is 'afgeschild'. Door een aantal platen kruislings over elkaar heen te lijmen, ontstaat de multiplexplaat. Deze plaat kan als afdekking van muren of zelfs als dragende vloerplaten gebruikt worden. Vanuit de Canadese houtindustrie is een standaard maat plaat van 1,22 × 2,44 meter gekomen.

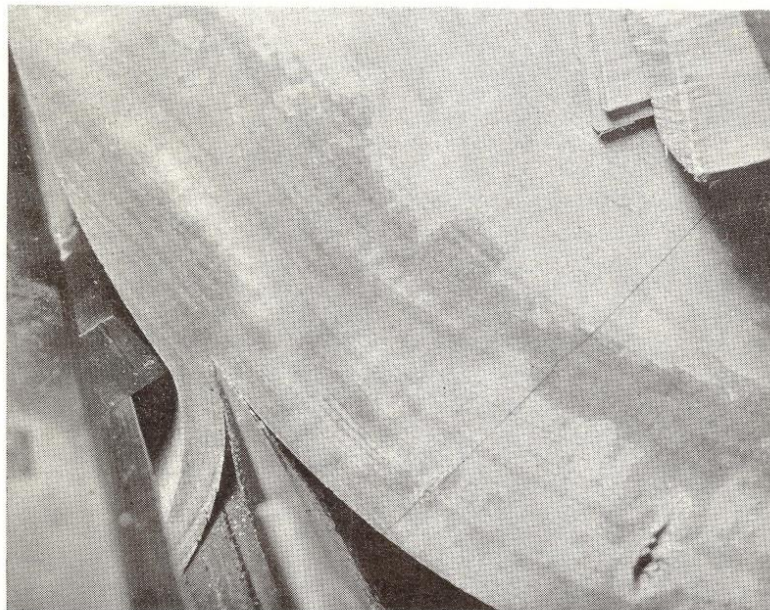


Foto Stichting Houtvoorlichtingsinstituut, Amsterdam

12-2. Zo gaat het schilmes door het hout; let op de kleine scheurtjes onder in het finer; deze kant mag dan ook niet aan de buitenkant van het triplex of multiplex komen, speciaal bij politoerwerk zijn ze erg hinderlijk.

Probleem bij hout, zeker bij vers gekapt hout is het feit dat een boom uit twee soorten hout is samengesteld, binnenin dood hout, buitenom, onder de schors een ring van jong, levend hout. Dat jonge, levende hout is verzadigd met water en zal veel meer krimpen dan de binnenzijde. Hierdoor ontstaan scheuren, niet alleen direct na het kappen van de boom maar ook later nog als het hout al gemonteerd is in het gebouw.

Goed (langzaam) laten drogen na het kappen (eerst soms zelfs in water om de ongelijke krimp tussen dood en jong hout te voorkomen!) en een gelijkmatige luchtvochtigheid in het gebouw kunnen veel scheuren voorkomen. Ook de manier van zagen speelt hierbij een rol. Domweg een boom in dikke planken zagen is niet verstandig; de twee uiteinden van de plank bevatten jong hout, het middendeel dood hout. Hier zullen zeker grote scheuren tussen trekken. Kijk daarom aandachtig naar het plaatje van een verzaagde grote boomstam. Hier worden de diverse zaagmethodes toegelicht.

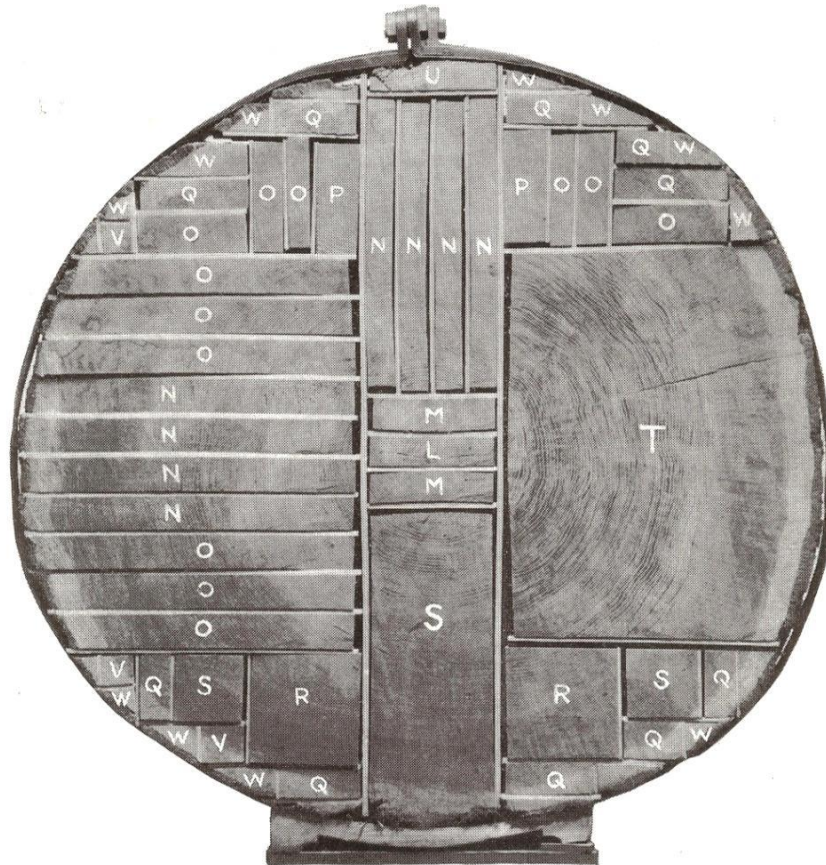


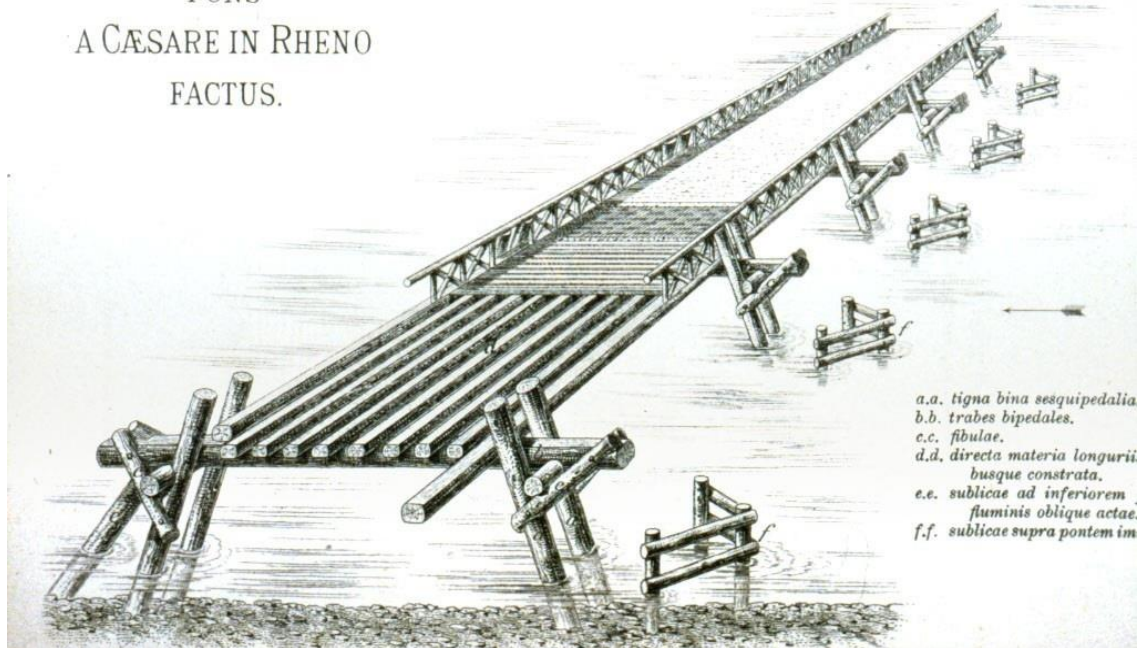
Foto Stichting Houtvoorlichtingsinstituut, Amsterdam

7-2. Zo kan een stam gezaagd worden. De hartplaat levert ook kwartiershout op — merk N —; deel L is niet veel waard; balk T is ook al gescheurd door het verschil in krimp tussen het oude en het jonge hout; O is z.g. halfkwartiershout; de merken Q, V en W bevatten wel veel spint.



Onderin de figuur is een aantal zaagwijzen voor het opdelen van een boomstam in planken. Methoden 1 t/m 4 geven krimp/dopingproblemen. Methode 5, 'dosse'- genaamd, produceert zogenaamd kwartiershout, genoemd naar de verdeling op een uurwerk: een kwartier. Dit geeft de minste krimp/drogingproblemen maar is minder effectief richting totaal geproduceerde planken.

PONS
A CÆSARE IN RHENO
FACTUS.



a.a. tigna bina sesquipedalia
b.b. trabes bipedales.
c.c. fibulae.
d.d. directa materia longurii
busque constrata.
e.e. sublicae ad inferiorem
fluminis oblique actae.
f.f. sublicae supra pontem im

De brug over de Rijn, gebouwd door Julius Caesar, circa 50 voor Christus, om het Romeinse leger over de rivier te zetten laat alle elementen van een goede houten brug zien. Ten eerste werden vanaf een ponton, met handkracht!, twee houten palen (= geschilde eiken stammen) naast elkaar de bodem in geheid. De palen werden schuin geheid om stabiliteit te geven; recht geheid zou de druk van het water ze kunnen ombuigen en breken. Tussen de twee keer twee eiken palen werd een stevige eiken boomstam neergelegd als hoofdbalk. Tussen deze steunpunten (=portaal gevormd door de geheide palen en de boomstam als balk) werden dicht op elkaar kleinere eiken stammetjes, een beetje recht gehakt) neergelegd. Daar bovenop weer eiken stammetjes loodrecht op de vorige balken. Dit gebeurde om de puntlast uit een zwaar beladen kar goed te kunnen spreiden. Daarop werd weer een laag van aangestampte klei en grind gelegd. En stevige brug maar niet stevig genoeg want de slimme Germanen gooiden stroomopwaarts een aantal stevige eiken met wortels en kroon in de rivier. Deze dreef vervolgens naar de brug; bleef steken tussen twee portalen en bouwde zo extra (horizontale!) waterdruk tegen de houten brug op. Na een paar bomen bezweek de brug door deze waterdruk. Maar de Romeinen waren goede ingenieurs vandaar dat bij de volgende nieuw gebouwde brug de Romeinen driehoekige punten voor de portalen zetten.

De boom die tegen de brug dreef raakte op één punt deze voorziening; kantelde daar omheen en dreef in langsrichting tussen de portalen door.

Grofweg ingedeeld zijn er drie groepen houtsoorten: naaldhout, niet tropisch loofhout en tropisch hardhout afkomstig uit respectievelijk koude, gematigde en warme klimaatzones. Het aantal houtsoorten is zeer groot en elke houtsoort laat een eigen patroon en uiterlijk zien.

Dit patroon wordt in belangrijke mate bepaald door de opbouw van een boom in de zogenaamde jaarringen. Elk jaar groeit een boom een laagje in de dikte met nieuw levend hout, direct onder de schors. Dit laagje waarin vooral vaten lopen die het water en de mineralen uit de grond van de wortels naar de bladeren brengen is een jaarring.

Aan de dikte is af te lezen of de boom een goed of een slecht groei-jaar heeft door gemaakt. Door de lineaire structuur van de vaten heeft hout ook in de richting van de loop van de vaten betere sterkte eigenschappen dan er loodrecht op.



Twee naaldhoutsoorten: te herkennen aan de grote nerven, het Europese Dennen en het Noord Amerikaanse Western Red Cedar

Hout is geen sterk bouw materiaal. Gemiddeld genomen zijn de naaldhoutsoorten het minst sterk, is tropisch hardhout het sterkst en zit loofhout uit gematigde streken er tussenin.

| | <i>Toelaatbare buigtrekspanning</i> | <i>Toelaatbare drukspanning</i> | <i>Elasticiteits- modulus</i> |
|-----------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Naaldhout | 7 N/mm ² | 2 N/mm ² | 10.000 N/mm ² |
| Eiken (niet trop. loofhout) | 12 N/mm ² | 3 N/mm ² | 11.000 N/mm ² |
| Azobé (trop. hardhout) | 25 N/mm ² | 8 N/mm ² | 17.000 N/mm ² |

Ook de mate waarin hout door het klimaat wordt aangetast varieert sterk. Naaldhout zal al snel in contact met water en lucht wegrotten (= aantasting door bacteriën, schimmels en paddenstoelen), tropisch hardhout is vaak juist goed bestand hier tegen. Dat moet ook wel want de bomen in het oerwoud groeien onder zware omstandigheden. Een manier om naald- en loofhout te beschermen is het verven. Dit is echter duur (arbeidsintensief), moet steeds herhaald worden en geeft nooit 100 % bescherming (levensduur gering).



Twee loofhoutsoorten, beide groeiend in Nederland: Beuken en Eiken.

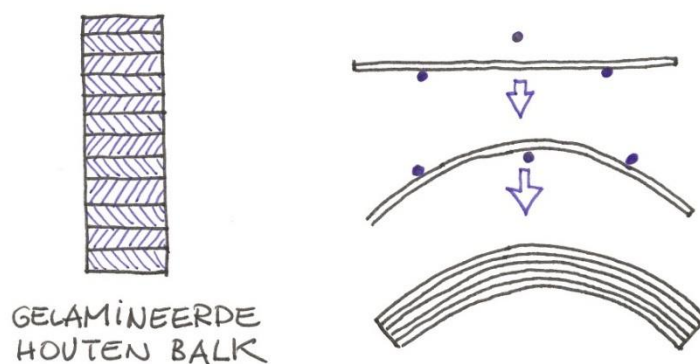


Twee tropische hardhoutsoorten: Azobé, een houtsoort die vaak in de waterbouw wordt toegepast en Java Teak, een houtsoort, die door zijn mooie kleur en tekening in de meubelbouw en als vloer wordt toegepast.

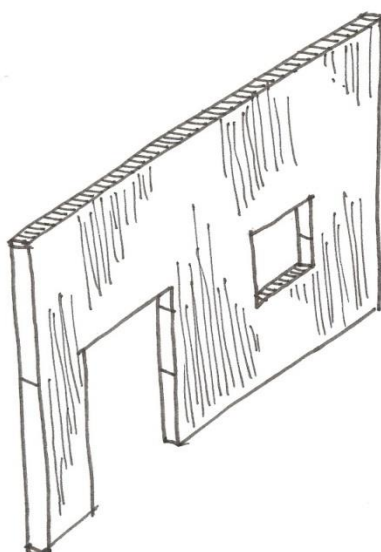
Een verrassende eigenschap van hout is zijn brandwerendheid, hoe raar dit ook klinkt als je gewend bent hout op het haardvuur te gooien. Tropische houtsoorten branden uit zichzelf al moeilijk maar ook een dikke naaldhouten balk is brandveilig. De verklaring hiervoor is dat de buitenste 2 à 3 cm inbranden en verkolen en daardoor als een afsluitend laagje het binnenste van de houten balk tegen de brand beschermen. Als dit overblijvende deel van de balk sterk genoeg is om de belasting die op de balk werkt te dragen dan kan de houtconstructie de brand zonder gevaar voor instorting overleven. Voor dunne houten elementen, zoals latten en platen gaat deze brandwerendheidstheorie natuurlijk niet op! Dan blijft er, behalve wat as, niets over.

Gelamineerd hout

Je kunt een houten balk op een andere manier maken dan hem uit een boomstam te zagen en dat is door de gewenste balkvorm uit allemaal losse latjes in elkaar te lijmen. Dit heet gelamineerd hout. Je kunt iedere grootte, vorm of lengte in elkaar lijmen dus hoge, lange en/of brede balken zijn goed mogelijk. Ook kun je ieder latje vooraf buigen, dat gaat relatief gemakkelijk, en als je dan een balk uit deze gekromde latjes samen lijmt krijg je een gekromde balk of zelfs een boog. Ook de lengte kan onbeperkt vergroot worden door de naden tussen de naast elkaar liggende latten te laten verspringen!



Een nieuwe ontwikkeling op hout gebied is dat niet alleen balken met deze lamineer techniek in elkaar gezet worden maar ook wanden/ muren en zelfs vloeren. Eigenlijk alle twee vervaardigd uit allemaal latten of balken aan elkaar gelijmd tot één vlak, met deur, raam en trapopeningen, dat als wand of als vloer dienst doet.



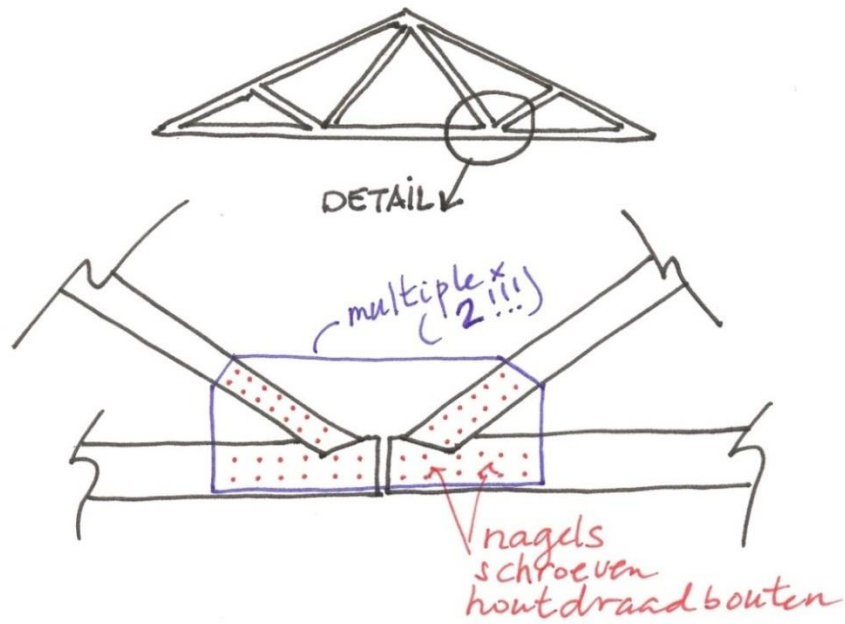


Een voorbeeld van een massief houten kapconstructie uit delen, gezaagde boomstammen opgebouwd.

Een belangrijk aandachtspunt bij ieder constructie materiaal is het verbinden van losse onderdelen tot een samenhangende constructie. Hout is relatief gemakkelijk te bewerken door zagen, schaven, boren en andere stukken hout eraan te lijmen. Als verbindingsmiddelen hebben we de beschikking over spijkers, de timmerman spreekt liever over draadnagels, en schroeven. Ook kunnen met bouten en moeren delen hout aan elkaar verbonden worden. Het gebruik van platen hout of staal die over de te verbinden delen liggen en er door bijvoorbeeld schroeven stevig tegen aan vastgezet zijn is een goede mogelijkheid om één geheel te krijgen dat als draagconstructie kan functioneren.

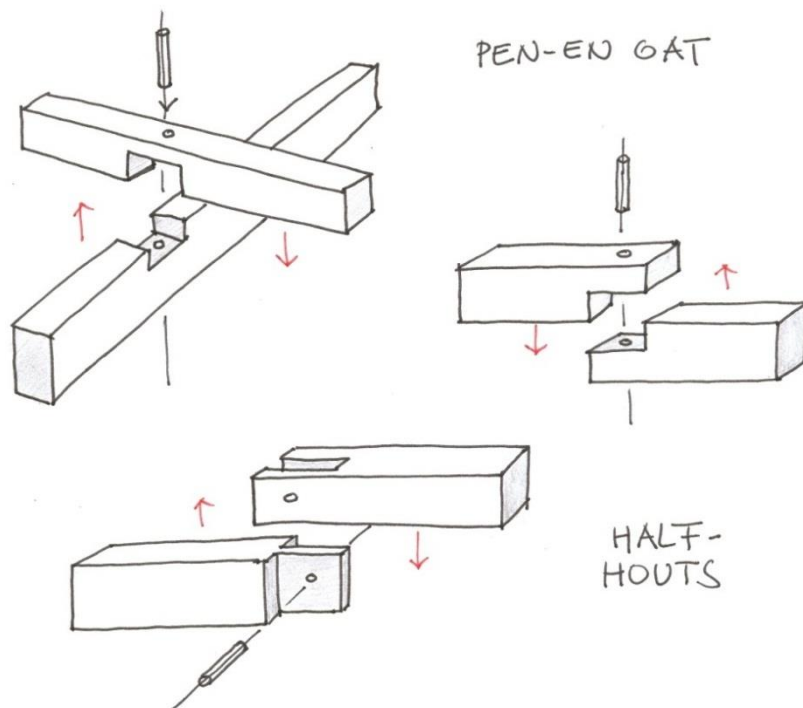


Verbindingsmiddelen voor hout: een schroef, een draadnagel (ook spijker genoemd) en een houtdraadbout (een soort tussenvorm tussen een schroef en een bout).

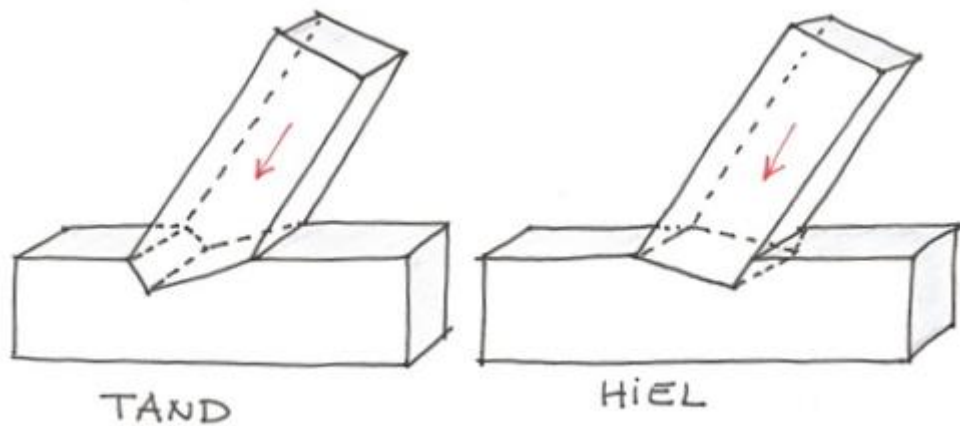


Verbinding van losse houten staven tot een vakwerk met de hiervoor afgebeelde verbindingmiddelen.

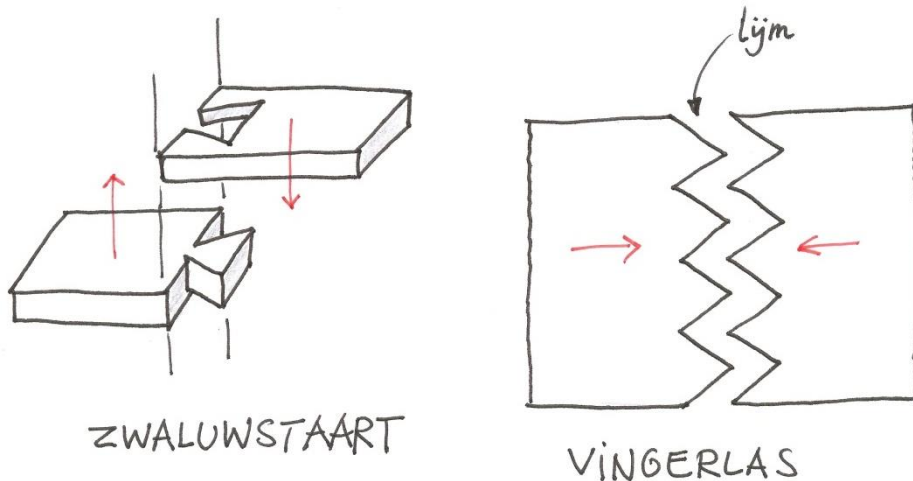
Voor het onderling verbinden van houten balken bestaat nog een speciale oplossing, de hout op hout verbinding. Met een houten pen erdoor heen kan een halfhoutse verbinding op verschillende manieren gemaakt worden.



Voor een houtverbinding die alleen drukkrachten hoeft over te brengen, bijvoorbeeld in een vakwerk, kan een tand- of een hielverbinding aangebracht worden.



Ook bestaan er nog zwaluwstaart- en vingerlasverbindingen. Dit zijn verbindingen die alleen door een goede timmerman gemaakt kunnen worden. De vingerlas maakt gebruik van de hechtende werking van lijm, door de vingerlas is het lijmoppervlak aanzienlijk vergroot.



Besef ook dat verschillende principes gecombineerd kunnen worden in een verbinding zoals bijvoorbeeld de pen/gat-verbinding met een hiel-verbinding.

9.2 Metselwerk, natuursteen

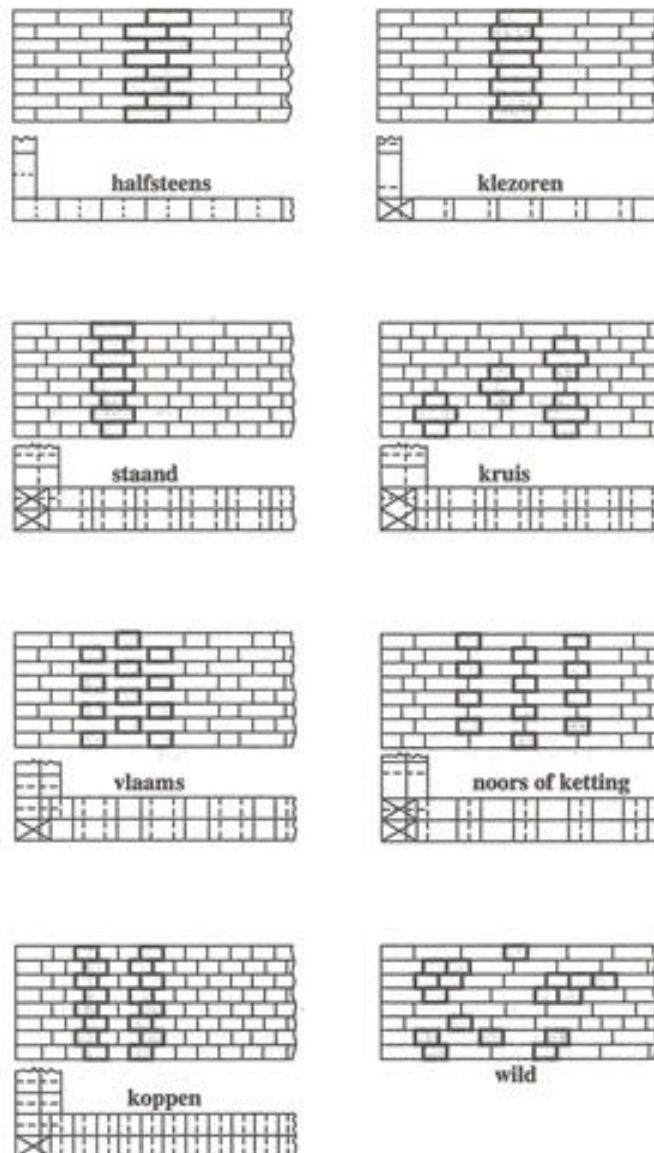


Een uit natuursteen blokken opgebouwde oude muur in de haven van Porto. Let op de goede en de slechte latei boven de opening en het hoogste rivierpeil dat zich afgetekend heeft op de muur.

Na hout zal er door de mens vervolgens met blokken steen gebouwd zijn. Muren uit stapelwerk zijn al in de vroege tijd bekend. Hierbij is de ontwikkeling van het zogenaamde verband in de stapeling ontstaan. Men ontdekte dat als je stenen los op elkaar leegt dat de muur al snel wankel werd. Bij een steen stapeling heb je lintvoegen, de horizontale, meestal doorlopende voegen, en stootvoegen, de verticale voegen tussen de stenen in. Men bemerkte dat door de stootvoegen te laten verspringen, dus niet boven op elkaar te stapelen, dat de muur veel sterker en stijver werd. Het patroon in het stapelwerk dat zo ontstaat noemt men het verband.

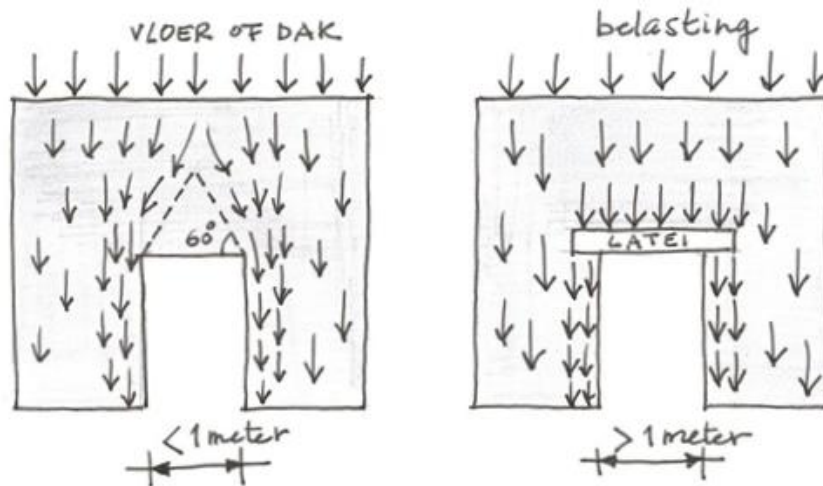
Er zijn nu een aantal vormen van stapeling bekend die allemaal een naam hebben; zie de figuren. Lees achter de namen het woord verband, dan weet iedereen in de bouw waar je het over hebt. Dus halfsteensverband, wild verband of Vlaams verband.

De eerste muren werden uit ruw bijgehakte rotsblokken gestapeld. Op plaatsen waar rotsblokken niet goed voor handen waren, zoals het gebied rond de vruchtbare rivier valleien, ontdekte men dat men uit brokken klei 'stenen' kon bakken. Eerst nog alleen in de zon, later boven een vuur of in een oven: de baksteen. Een baksteen kan vele formaten hebben van kloostermoppen (heel grote stenen) tot vecht-formaat (heel kleine steentjes) maar meestal werken we met waal-formaat, een gestandaardiseerde baksteenmaat van 210 X 100 X 50 mm.

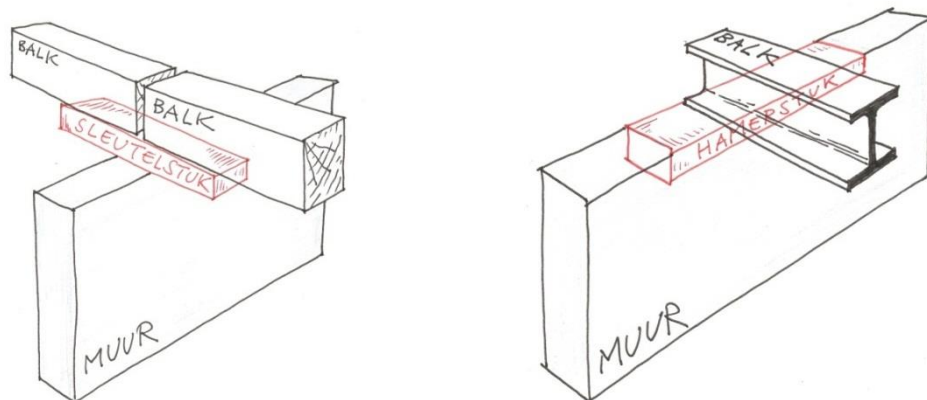


Metselwerkverband

Naast de stevigheid uit het verband werd een andere manier om de muren te verstevigen ontdekt, met specie werden de stenen 'gemetseld'. De eerste specie was gebrande kalk (in Nederland bijvoorbeeld van schelpen gemaakt) dat gemengd met water tot een stevige laag verhardde, die meer samenhang in het geheel bracht. Later werd de gebrande kalk vervangen door cement; de cementspecie. Was vroeger de kalkspecie veel zwakker dan de stenen zelf; nu is de cementspecie sterker dan de stenen. Daarom liepen vroeger de scheuren in metselwerk door de voegen heen; nu scheurt ook de steen. De sterkte van de steen kan enorm variëren van heel zacht en poreus tot zeer hard en dicht (de zogenaamde klinker). In getallen uitgedrukt: de druksterkte van een steen zelf varieert van 5 tot wel 35 N/mm². Voor de sterkte van een muur moet de invloed van de specie meegenomen worden en, vooral bepalend, de mate waarin een steen hecht aan de specie. Daardoor daalt de druksterkte voor het muurdeel tot waardes variërend van 2 tot 10 N/mm². Op trek belast, bijvoorbeeld door buiging, is de toelaatbare spanning voor metselwerk zeer laag, als richtlijn geldt 10% van de druksterkte. Daarom is het beter metselwerk niet op buiging te belasten.



Daarom moet er boven elke opening in een muur een latei (= balk) aangebracht worden als de opening groter is dan 1 meter. Onder die 1 meter vrije deurmaat kan het metselwerk een boogwerking oproepen die de krachten nog net kan opnemen. Daarboven niet meer en is dus een latei noodzakelijk. Dit laatste geeft al aan dat bogen uit metselwerk vervaardigd wel veel belasting kunnen dragen want druk en metselwerk gaan goed samen. Nog een punt om op te passen bij metselwerk is de oplegdruk uit balken. Hier kan heel geconcentreerd een grote belasting op het metselwerk komen te rusten. Daar kan metselwerk slecht tegen. Daarom moeten we deze oplegkracht spreiden. Dit kan met een zogenaamd (houten) sleutelstuk, vooral toegepast bij houten balken in middeleeuwse gebouwen of met een zogenaamd hamerstuk uit natuursteen of, tegenwoordig, beton.



Eén aspect is nog van belang: metselwerk zet relatief veel uit ten gevolge van temperatuurstijgingen of -dalingen. Ook is metselwerk gevoelig voor zettingen in de ondergrond. Metselwerk scheurt snel en al bij lage trekspanningen en kleine zettingsverschillen. Ook krimpt vers metselwerk nog wat na door het verdampen van vocht uit de muren, dit kan ook scheuren veroorzaken. Let maar eens op: bijna iedere metselwerkwoning heeft wel een paar scheuren. Een manier om deze scheuren te vermijden, is de muurvlakken metselwerk te dilateren. Dilateren is een kunstmatige of eigenlijk voorgeprogrammeerde scheur. Dit kan een naad zijn; helemaal los van elkaar (helemaal er door heen) of een inzaging zodat we zeker weten dat de scheur daar optreedt (zwakste plek). Meestal houden we in de bouw een praktisch afstand van 6 à 7 meter tussen de dilataties in het metselwerk aan.

Naast 'metselwerk' uit natuursteenblokken en bakstenen kennen we ook nog 'metselwerk' uit kalkzandsteenblokken. Dit zijn relatief grote blokken: hoog 900 mm, lang 600 mm en breed 100 tot 300 mm, vervaardigd uit onder hoge temperatuur samengeperst zand en kalk (7%). Vooral in de woningbouw worden hier snel en goedkoop goede constructieve muren uit opgetrokken.

Een variant hierop is cellenbeton waarbij beton met een luchtbelvormer wordt gebruikt om de blokken te maken. Door de luchtbellens is het isolerende vermogen veel groter dan van kalkzandsteen en wegen ze minder zodat ze beter te verwerken zijn.

Qua brandwerendheid zit het wel goed met metselwerk of dit nu uit baksteen, natuursteen of kalkzandsteen is opgebouwd. Over brandvoortplanting hoeven we ons ook geen zorgen te maken, steen is onbrandbaar. Je moet er alleen wel goed op letten dat de muren niet te dun zijn anders kan een er tegen aan vallend object de muur doen omvallen.



Rijk gedecoreerd metselwerk in gevel Chocoladefabriek Menier in Noisiel (Frankrijk). Overigens heeft het uit 1872 daterende gebouw een ijzerskelet als draagconstructie en het metselwerk slechts een scheidende functie.

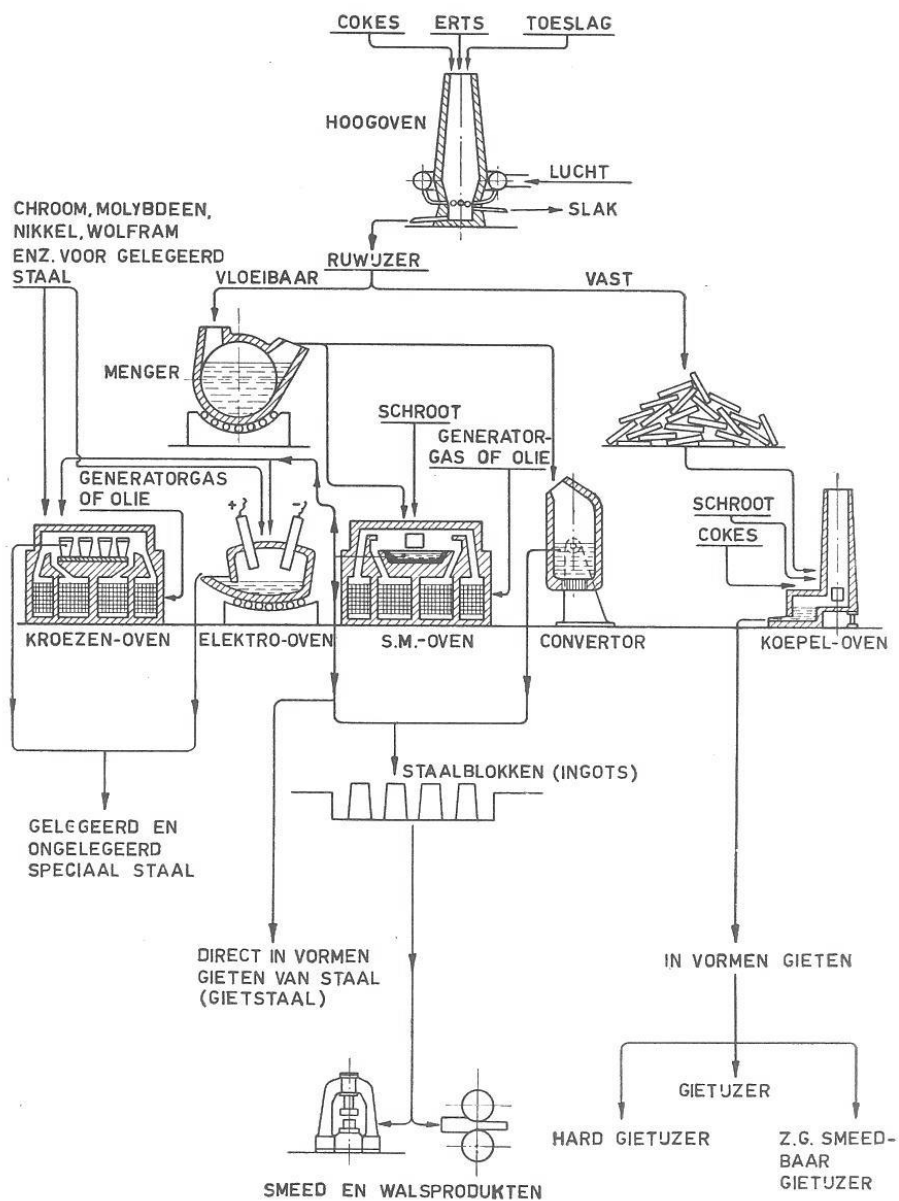
9.3 Staal

Staal (aanvankelijk ijzer) is een relatief nieuw bouw materiaal. De eerste grote constructie, geheel uit ijzer vervaardigd is de Ironbridge te Coalbrookdale in Engeland. Gebouwd door Abraham Darby rond 1790 is het een gietijzeren brug die de circa 40 meter brede rivier de Severn overspant. Voor die tijd werd ijzer al op kleine schaal toegepast als ketting om grote lasten op te takelen of als trekstang in gewelven om de spatkrachten van de boogwerking op te nemen. De Ironbridge is het startschot van een ware explosie van bouwwerken in ijzer en later staal van bruggen naar fabrieken, grote hallen en stationsoverkappingen tot het hoogtepunt van de 19^{de} eeuw: de Eiffeltoren (300 meter hoog), technisch gezien in die tijd net zo'n grote prestatie als de Burj Khalifa (828 meter hoog) in onze tijd.



De Eiffeltoren in Parijs, net nadat hij gereed gekomen is (1889). Een imposante toren van smeedijzer, die met een hoogte van 300 meter nog steeds de skyline van Parijs domineert.

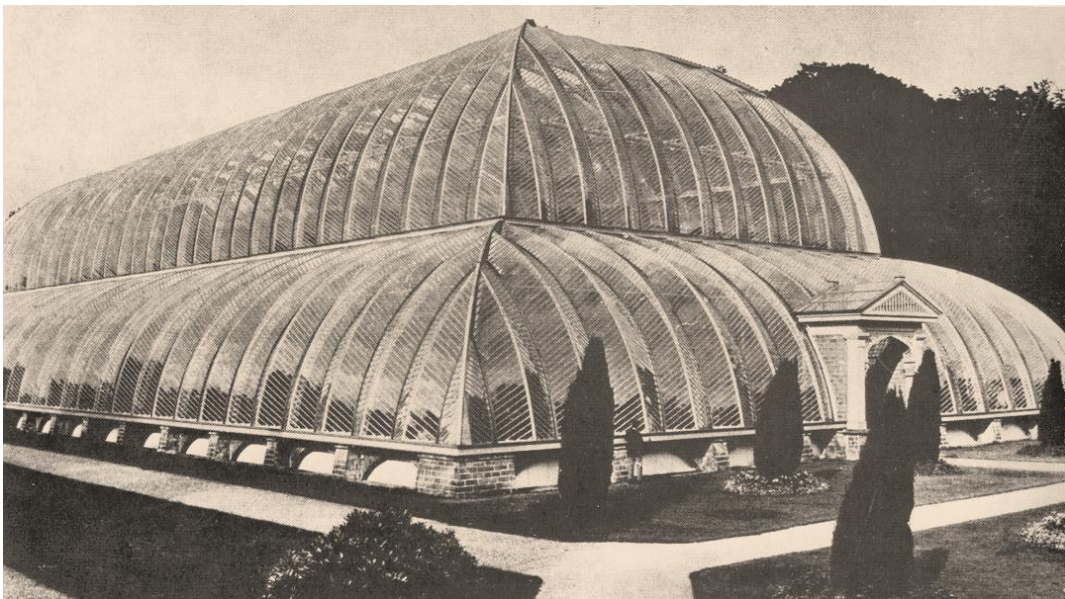
Gietijzer, smeedijzer en staal zijn alle drie ijzersoorten (Fe), alleen bij smeedijzer en staal zit er veel minder koolstof (C) in dan bij gietijzer. Om dit verschil toe te lichten is het nodig dat we het fabricage proces van ijzer/ staal analyseren. IJzer/ staalproductie begint met twee belangrijke ingrediënten cokes ('ontgaste' steenkool met een hoog koolstof-gehalte) en ijzererts en een belangrijk 'apparaat' de hoogoven. Dat 'hoog' in hoogoven is letterlijk nodig om grote trek door het mengsel te krijgen waardoor het vuur zulke hoge temperaturen bereikt dat het ijzererts smelt. Door in de hoge oven afwisselend laagjes ijzererts (Fe_2O_3 ; ijzeroxide) en cokes te stapelen en deze in de brand te zetten, smelt het ijzererts. In de gloeiende massa reageert de C uit de cokes met de O_3 van het ijzererts en ontstaat CO_2 dat als koolzuurgas uit de schoorsteen ontsnapt. Het ruwijzer blijft achter en zal afkoelen in een ijzerkristalrooster.



Schematische weergave van het ijzer - staal productieproces. Cokes is ontgaste kolen en S.M.-oven is een Siemens-Martin-oven.

Probleem voor het ijzerkristalrooster is dat niet alle koolstof uit het mengsel kan ontsnappen. Het niet verbrande deel van de koolstof blijft als lamellen achter in het ijzerkristalrooster en zorgt daardoor voor onregelmatigheden in de opbouw van het kristalrooster. Bij gietijzer kan het C-gehalte oplopen van 2% tot 4% koolstof. De C-lamellen in het gietijzerskelet vertalen zich in een sneller optredende breuk. Het materiaal is bros en heeft een lage treksterkte. Je kunt zeggen dat de koolstof als 'vervuilende' lamellen in het regelmatige Fe-skelet, het kristalrooster, zit en als het ware fouten zijn waar breuk al snel zal optreden.

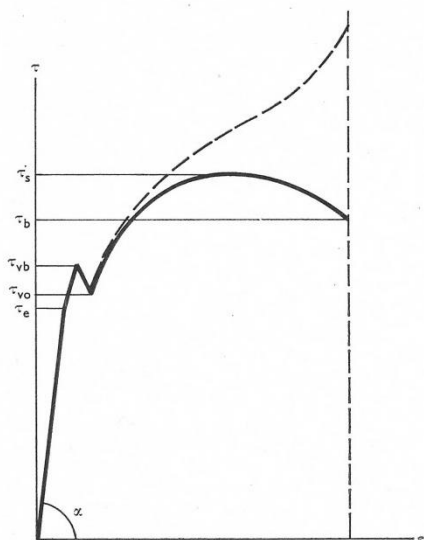
Staal bevat maximaal 0,4% koolstof (C). Hoe krijgen we het voor elkaar dat staal zo weinig koolstof heeft? Dat bereiken we door over of door het gesmolten ijzer uit de hoogoven veel lucht of nog beter zuurstof te blazen. Daardoor zal de zuurstof met de koolstof weer CO₂ vormen, dat als gas uit de schoorsteen ontsnapt (en de globale opwarming gaat verzorgen). In voorgaand diagram is dit proces afgebeeld als de Siemens-Martin-oven en de Converter-oven.



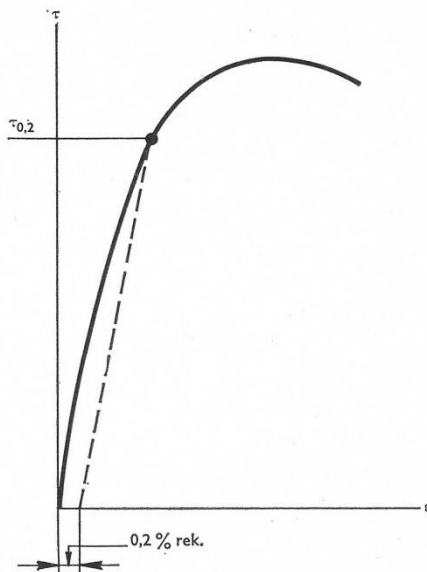
Een ijzeren kas uit de 19de eeuw, aardig om te vermelden is dat de glasplaten de stabiliteit verzorgen. Staat al meer dan 150 jaar maar zou nu niet meer mogen.

Staal bevat minder C, is veel sterker dan gietijzer en vertoont een veel taaier gedrag. Dit taaiere gedrag manifesteert zich als volgt. Tot een zeker spanningsniveau in het materiaal is staal *lineair elastisch* dat wil zeggen dat, als de belasting wegenomen wordt, het materiaal helemaal 'terugveert'. Maar bij die zekere spanning gebeurt er iets bijzonders. Het staal gaat vloeien, dat wil zeggen dat de vervorming toeneemt terwijl de spanning, die wij de *vloeispanning* noemen, gelijk blijft. Na korte tijd komt de vervorming tot stilstand, het staal is verstevigd. Als we daarna de belasting weer opvoeren kan het staal nog meer spanning opnemen maar is niet meer lineair elastisch en zal uiteindelijk breken, de *breukspanning*.

Dit 'vloeit'-gedrag van staal is voor een draagconstructie zeer gunstig, hoe raar dit ook klinkt. Je zou kunnen zeggen dat er door het vloeien een waarschuwing gegeven wordt van: pas op!, je bereikt de grens van mijn draagvermogen. Die waarschuwing is dan de plotselinge toename van de vervorming zonder dat de belasting toeneemt. Wij noemen deze onomkeerbare vervorming ten gevolge van het vloeien van het staal een *plastische vervorming*.



5-2. Uit het spannings-rekdiagram kunnen we verschillende eigenschappen van de staal-soort aflezen.



5-3. Staalsoort zonder vloeigrens. Bepaling van de 0,2% rekgrens ($\tau_{0,2}$).

Bij wegnemen van de belasting zal deze vervorming dan ook niet terug veren naar de oorspronkelijke toestand. Staal kan ook niet twee keer achter elkaar vloeien; het kan maar één keer vloeien. De verklaring hiervoor is dat tijdens het vloeien de ijzerkristalrooster moleculen over de in het rooster opgenomen C-moleculen glijden in een zo gunstig mogelijk positie om de spanning die op het rooster staat door te geven.

De verhouding tussen de spanning (σ) en de rek (ϵ) wordt weergegeven door de elasticiteitsmodulus E ($E = \sigma/\epsilon$). De grootte daarvan bedraagt $210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$. Staal is in verschillende sterkteklassen verkrijgbaar. De meest gebruikte sterkteklasse is S235 met een treksterkte van 235 N/mm^2 . Merk op dat voor alle sterkteklassen de E -modulus gelijk is. De stijfheid neemt dus niet toe met een hogere sterkteklasse.

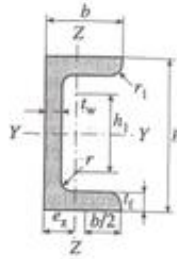
Staal is dus ijzer met een maximale hoeveelheid koolstof van 0,4 %. Er bestaan vele soorten staal of te wel legeringen, ieder met bijzondere eigenschappen zoals de hardheid, een hogere sterkte en zelfs niet roestend: roestvast staal. Deze eigenschappen zijn afhankelijk van kleine hoeveelheden van de zogenaamde zeldzame aardmetalen in het mengsel in de hoogoven zoals vanadium, titanium, chroom, wolfram, mangaan etc. in wisselende samenstelling. In essentie beïnvloeden zij de regelmatige opbouw en de onderlinge samenhang van het ijzerkristalrooster.

De staalproducten die wij kennen zoals profielen, buizen en platen kunnen op twee wijzen vervaardigd worden. De eerste is gieten waarbij het gesmolten materiaal uit de oven in een mal gegoten wordt en daar stolt tot de gewenste vorm. De tweede methode is walsen. Hierbij wordt een (gegoten) klomp staal in de gewenste vorm gedrukt door met twee walsen tegenover elkaar geplaatst het staal te vervormen. Duidelijk is dat I- en de H-profielen op deze wijze vervaardigd worden. Beseft moet worden dat bij deze plastische deformatie tijdens het walsen er restspanningen in het staal zullen zitten die het draagvermogen van het staalprofiel verminderen. Door nagloeien, verhitten kan men deze restspanningen weer laten wegvloeien. Men noemt het dan warm gewalst staal in tegenstelling tot het dus slappere, koud gevormd staal.

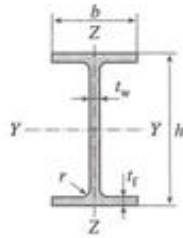
Balkstaal UNP

Helling flenzen 8% bij profielen met $h \leq 300$

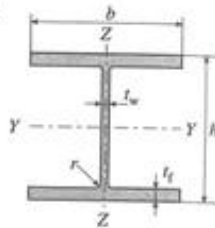
Helling flenzen 5% bij profielen met $h > 300$



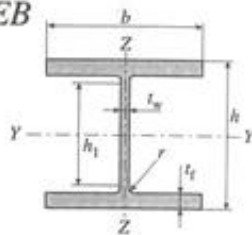
Balkstaal IPE



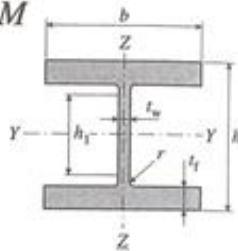
Breedflensbalken HEA



Breedflensbalken HEB

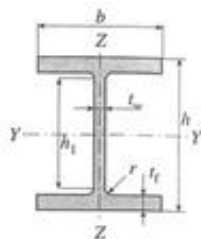


Breedflensbalken HEM



Breedflensbalken HD

als walswerk)



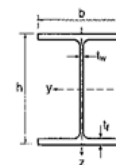
Van de staalproducten is een ruim assortiment uit voorraad leverbaar, zie nevenstaand overzicht. De eerste stappen zijn de meest gebruikte profielsoorten; de UNP balken, ook wel U-profielen genoemd; een U op z'n kant. Standaard leverbaar in een hoogte van 100 mm tot 600 mm. De volgende stap is de IPE-profielen, ook wel I-profielen genoemd. Deze profielen zijn smal en hoog en in hoogte standaard leverbaar van 100 mm tot 800 mm. De volgende zijn de HE-balken, meestal H-balken genoemd. Deze balken of profielen, we gebruiken deze benaming door elkaar heen, zijn (ongeveer) net zo hoog als ze breed zijn. De reeks begint met een HEA-profiel en terwijl de dikte t_f van de flens (de twee horizontale delen; t is thickness = dikte en f is flange = flens) en de dikte t_w van het lijf (het verticale deel; w is web = lijf) steeds dikker worden, loopt de serie via de HEB naar de HEM-profielen. De uitwendige maten blijven ongeveer gelijk. Het slot van de serie zijn de HD-profielen; de dikste en zwaarste jongens.

Overzicht van de U-, de I- en de H-profielen.

Van de HEA-profielen hieronder een volledige lijst van de uit voorraad leverbare profielen. Van ieder profiel type staan de gegevens van massa per meter tot de doorsnede oppervlakte. Ook bestaan er lijsten met daarin vermeld W (weerstandsmoment) en I (oppervlakte traagheidsmoment) om te kunnen rekenen aan de sterkte (W) en de doorbuiging (I).

breedflensbalken, HEA

leveringsvoorwaarden: NEN-EN 10025-1 en -2
 toleranties: NEN-EN 10034; DIN 1025/3
 max. handelslengte: 28 m



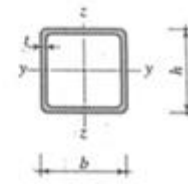
| profiel nr. | G_g kg/m | A mm ² | h mm | b mm | t_w mm | t_f mm | A_L m ² /m | I_y x10 ⁴ mm ⁴ | $W_{y,rel}$ x10 ³ mm ³ | I_z x10 ⁴ mm ⁴ | $W_{z,rel}$ x10 ³ mm ³ | profiel nr. |
|-------------|------------|---------------------|--------|--------|----------|----------|-------------------------|--|--|--|--|-------------|
| 100 | 17,0 | 2124 | 96 | 100 | 5 | 8 | 0,561 | 349 | 72,8 | 134 | 26,8 | 100 |
| 120 | 20,3 | 2534 | 114 | 120 | 5 | 8 | 0,677 | 606 | 106 | 231 | 38,5 | 120 |
| 140 | 25,1 | 3142 | 133 | 140 | 5,5 | 8,5 | 0,794 | 1033 | 155 | 389 | 55,6 | 140 |
| 160 | 31,0 | 3877 | 152 | 160 | 6 | 9 | 0,906 | 1673 | 220 | 616 | 76,9 | 160 |
| 180 | 36,2 | 4525 | 171 | 180 | 6 | 9,5 | 1,02 | 2510 | 294 | 925 | 103 | 180 |
| 200 | 43,1 | 5383 | 190 | 200 | 6,5 | 10 | 1,14 | 3692 | 389 | 1336 | 134 | 200 |
| 220 | 51,5 | 6434 | 210 | 220 | 7 | 11 | 1,26 | 5410 | 515 | 1955 | 178 | 220 |
| 240 | 61,5 | 7684 | 230 | 240 | 7,5 | 12 | 1,37 | 7763 | 675 | 2769 | 231 | 240 |
| 260 | 69,5 | 8682 | 250 | 260 | 7,5 | 12,5 | 1,48 | 10455 | 836 | 3668 | 282 | 260 |
| 280 | 77,8 | 9726 | 270 | 280 | 8 | 13 | 1,60 | 13673 | 1013 | 4763 | 340 | 280 |
| 300 | 90,0 | 11253 | 290 | 300 | 8,5 | 14 | 1,72 | 18263 | 1260 | 6310 | 421 | 300 |
| 320 | 99,5 | 12437 | 310 | 300 | 9 | 15,5 | 1,76 | 22929 | 1479 | 6985 | 466 | 320 |
| 340 | 107 | 13347 | 330 | 300 | 9,5 | 16,5 | 1,79 | 27693 | 1678 | 7436 | 496 | 340 |
| 360 | 114 | 14276 | 350 | 300 | 10 | 17,5 | 1,83 | 33090 | 1891 | 7887 | 526 | 360 |
| 400 | 127 | 15989 | 390 | 300 | 11 | 19 | 1,91 | 45069 | 2311 | 8564 | 571 | 400 |
| 450 | 142 | 17803 | 440 | 300 | 11,5 | 21 | 2,01 | 63722 | 2896 | 9465 | 631 | 450 |
| 500 | 158 | 19754 | 490 | 300 | 12 | 23 | 2,11 | 86975 | 3550 | 10367 | 691 | 500 |
| 550 | 189 | 21176 | 540 | 300 | 12,5 | 24 | 2,21 | 111932 | 4146 | 10819 | 721 | 550 |
| 600 | 181 | 22646 | 590 | 300 | 13 | 25 | 2,31 | 141208 | 4787 | 11271 | 751 | 600 |
| 650 | 193 | 24164 | 640 | 300 | 13,5 | 26 | 2,41 | 175178 | 5474 | 11724 | 782 | 650 |
| 700 | 208 | 26048 | 690 | 300 | 14,5 | 27 | 2,50 | 215301 | 6241 | 12179 | 812 | 700 |
| 800 | 229 | 28583 | 790 | 300 | 15 | 28 | 2,70 | 303443 | 7682 | 12639 | 843 | 800 |
| 900 | 256 | 32053 | 890 | 300 | 16 | 30 | 2,90 | 422075 | 9485 | 13547 | 903 | 900 |
| 1000 | 277 | 34685 | 990 | 300 | 16,5 | 31 | 3,10 | 553846 | 11189 | 14004 | 934 | 1000 |

Naast alle I-, U- en H-profielen hebben we ook nodig kokers en buizen. Mooie symmetrische profielen die als kolom goed te gebruiken zijn want in de twee hoofdrichtingen, dezelfde eigenschappen. Dit in tegenstelling tot de I- en de H-profielen die een sterke en een zwakke as hebben. De benamingen kokers en buizen worden een beetje door elkaar heen gebruikt. De officiële namen zijn rechthoekig buisprofiel en rond buisprofiel. De gewone man (en wij dus ook) noemt een rechthoekig buisprofiel een koker. Naast vierkante kokers heb je ook rechthoekige kokers. Een nieuwe ontwikkeling op het beschikbaar zijn van vormen is het ellipsvormige buisprofiel, een aardige ontwikkeling.

Je ziet in het volgende overzicht de term *warmgevormd* staan. Dit betekent dat het profiel met warmgestookt en daardoor gemakkelijk vervormbaar staal gemaakt is. Dit in tegenstelling tot koudgevormd staal. Hierbij wordt het (niet verwarmde) staal met geweld in een vorm gedrukt. Hierbij ontstaan er hoge spanningen in het koud vervormde materiaal die in mindering gebracht moeten worden op de toelaatbare spanningen in het staal. Koudgevormd staal is goedkoper dan warmgevormd maar de profielen moeten groter zijn om het vereiste draagvermogen te kunnen ontwikkelen.

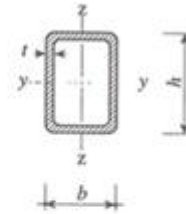
Vierkante warmgevormde buisprofielen

| | | | | |
|-----|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| DIN | afmetingennorm DIN59410 mei 1974 | | | |
| | afroningsstraal | $h \leq 100$ | $r_u = 1,00 \times t$ | $r_i = r_u - t$ |
| | | $100 < h \leq 140$ | $r_u = 1,40 \times t$ | $r_i = r_u - t$ |
| | | $h > 140$ | $r_u = 2,00 \times t$ | $r_i = r_u - t$ |
| BS | afmetingennorm BS4848:Part 2:1991 | | | |
| | afroningsstraal | uitwendig | $r_u = 1,25 \times t$ | |
| | | inwendig | $r_i = 1,00 \times t$ | |

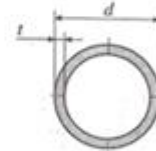


Rechthoekige warmgevormde buisprofielen

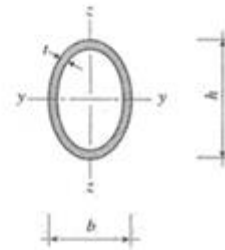
| | | | | |
|-----|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
| DIN | afmetingennorm DIN59410 mei 1974 | | | |
| | afroningsstraal | $h \leq 100$ | $r_u = 1,00 \times t$ | $r_i = r_u - t$ |
| | | $100 < h \leq 140$ | $r_u = 1,40 \times t$ | $r_i = r_u - t$ |
| | | $h > 140$ | $r_u = 2,00 \times t$ | $r_i = r_u - t$ |
| BS | afmetingennorm BS4848:Part 2:1991 | | | |
| | afroningsstraal | uitwendig | $r_u = 1,25 \times t$ | |
| | | inwendig | $r_i = 1,00 \times t$ | |



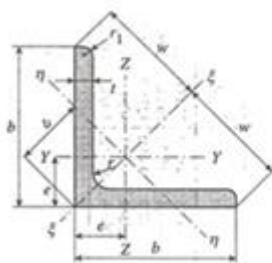
Ronde buisprofielen



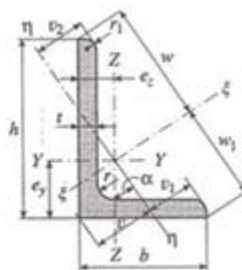
Ellipsvormige warmgevormde buisprofielen



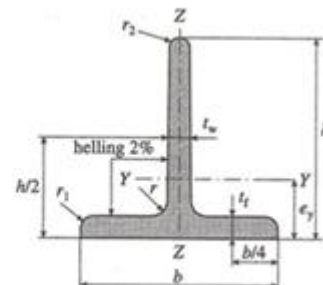
De volgende serie profielen zijn sterk asymmetrisch, houdt hier rekening mee bij de mogelijke vervorming; zij kunnen scheef wegzakken!
 Het zijn de hoekstalen, gelijkzijdig en ongelijkzijdig, ideale profielen om iets; een muur of een balk, in op te leggen. Een ander familielid is het T-stalen; eigenlijk twee hoeklijnen rug aan rug vastgemaakt.



Gelijkzijdig hoekstaal



Ongelijkzijdig hoekstaal

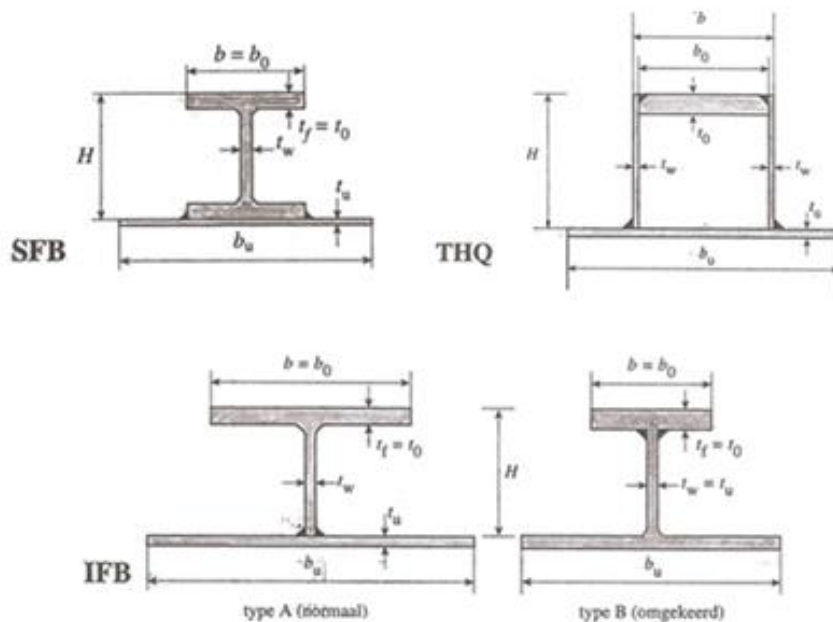


T-staal

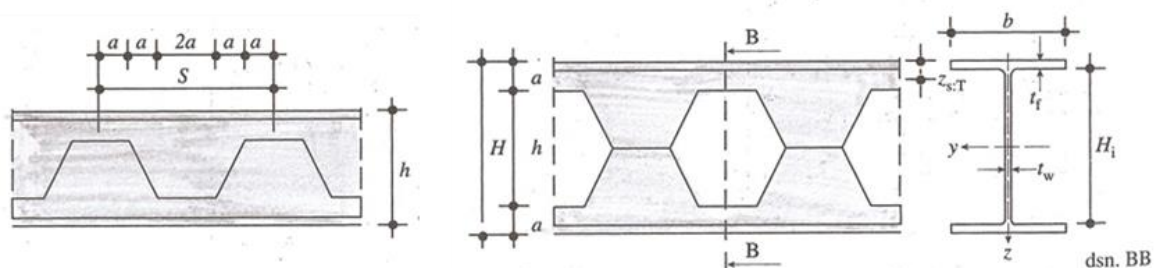
Na de hoekstalen en de T-stalen komen we bij de volgende familie speciale staalprofielen; de geïntegreerde liggers ook wel hoedliggers genaamd omdat hun vorm, brede onderplaat, smallere bovenplaat en ertussen een koker- of plaatachtig element op een hoed lijkt.

De staalindustrie biedt drie hoofdtypes aan, de SFB-ligger met een onderplaat gelast aan een gewoon H-profiel, de IFB-ligger met een onder- (type A) of bovenplaat (type B) gelast aan een gehalveerd H-profiel en een THQ-ligger, een echte hoedligger uit stalen platen aan elkaar gelast.

Deze geïntegreerde liggers worden vooral in vloeren van gebouwen toegepast. Groot voordeel van dit type ligger is dat de ligger in de hoogte van de vloer 'geïntegreerd' kan worden en er niet (of weinig) onder uit steekt.



Tot slot van ons overzicht komen we bij de raat-liggers, een heel economische ligger: weinig kilo's staal per meter ligger en toch een hoog draagvermogen. Via een slimme truc worden deze raat-liggers vervaardigd. We snijden het lijf van een gewoon I- of H-profiel in regelmatige, ongelijke stukken. We verschuiven het onder- en het bovendeel een stuk op en lassen de twee delen weer aan elkaar vast. Zodoende krijg ik een grofweg twee keer zo hoge ligger uitgaande van een standaard profiel. De kilo's profiel zijn dus gelijk maar het draagvermogen op sterkte; $W = 1/6 \times b \times h^2$, wordt vier keer zo groot en de weerstand tegen doorbuiging; $I = 1/12 \times b \times h^3$, wordt zelfs 8 keer zo groot!



Als we een gebouw uit stalen onderdelen in elkaar willen zetten moeten we die onderdelen met elkaar verbinden op zodanige wijze dat er krachten in de verbinding kunnen worden overgebracht. Het moet immers een samenhangend (= sterk, stijf en stabiel) geheel worden. Voor staal zijn daar twee verbindingmethoden het meest geschikt : bouten en lassen). Bij boutverbindingen worden een bout (= staaf staal met schroefdraad erop met aan één kant verbreding in de vorm van een moer) door gaten in de constructie gestoken, terwijl aan de andere kant een moer erop gedraaid wordt. Door de moer met kracht aan te draaien klemmen de twee constructie onderdelen stevig tegen elkaar aan.



Een moer, een bout en een volgplaat (tussen de moer en het constructieonderdeel aan te brengen).

boutklasse 4.6

| bout d_n | A_s [mm ²] | A_{st} [mm ²] | \hat{F}_t [kN] |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| M10 | 58 | 78,5 | 13,9 |
| M12 | 84,3 | 113 | 20,2 |
| M16 | 157 | 201 | 37,7 |
| M20 | 245 | 314 | 58,8 |
| M24 | 353 | 452 | 84,7 |
| M30 | 561 | 707 | 134,7 |

boutklasse 8.8

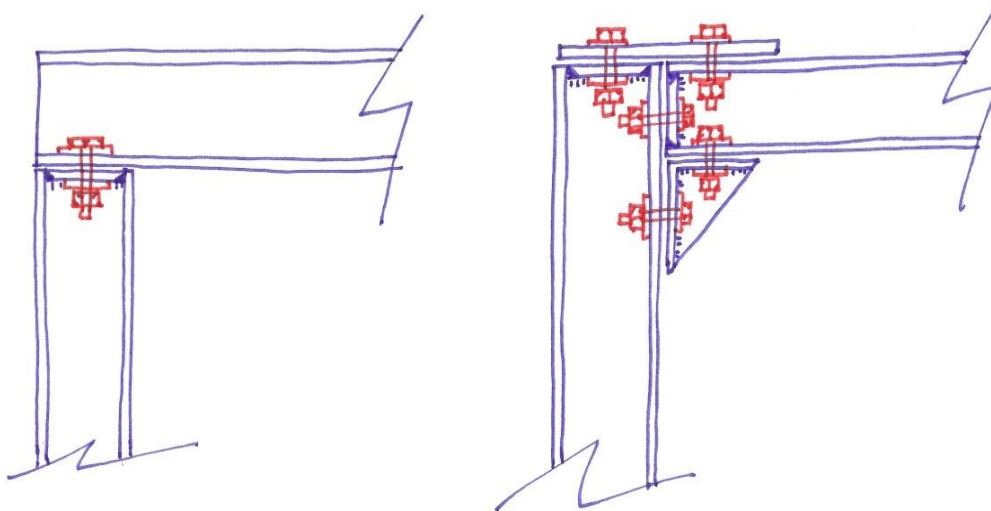
| bout d_n | A_s [mm ²] | A_{st} [mm ²] | \hat{F}_t [kN] |
|---------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------|
| M10 | 58 | 78,5 | 32,5 |
| M12 | 84,3 | 113 | 47,2 |
| M16 | 157 | 201 | 87,9 |
| M20 | 245 | 314 | 137,2 |
| M24 | 353 | 452 | 197,7 |
| M30 | 561 | 707 | 314,2 |

Overzicht toelaatbare trekkrachten in bouten voor twee klassen; gewoon staal (4.6) en hoogwaardig staal (8.8).

Bij lassen laat men met een gasvlam of een elektrische vonkenboog een klein gedeelte van het staal van de twee onderdelen smelten. Vanuit de laselektrode wordt er nieuw materiaal in de voeg tussen de twee gesmolten delen 'gespoten'. Hierdoor wordt de opening gevuld en kunnen de twee onderdelen na afkoeling 100% aan elkaar vastzitten. Zij zijn als het ware aan elkaar gesmolten. Een goed uitgevoerde las, zonder fouten of onvolkomenheden is net zo sterk als het moedermateriaal van de losse stalen gebouwoonderdelen. De las moet natuurlijk wel afdoende dik zijn om de spanningen in de verbinding onder het maximaal toelaatbare niveau te houden.

Het liefst zouden we dus een hele staal constructie in elkaar lassen. Alleen het vervoer van de productieplaats naar de bouwplaats en het beperkte draagvermogen van de kranen staat dit meestal in de weg. Ook de kwaliteit van het laswerk op de bouwplaats; in de regen en wind en meestal moeilijk bereikbaar om rustig een goede las te leggen, maakt lassen op de bouwplaats problematisch. Vandaar dat je veel geboute verbindingen zult zien.

Door de uitvoering van de verbinding kun je al zien welke krachten overgedragen kunnen worden. Hieronder twee voorbeelden, de ene boutverbinding is een scharnier, de andere boutverbinding is een inklemming / stijve hoek, die ook een buigend moment kan overdragen.



Twee mogelijke verbindingen tussen een balk en een kolom; links een scharnier, rechts een inklemming. Links goedkoop maar slap; rechts duur maar sterk/stijf.

Gesignaleerd al is dat staal/ ijzer gemakkelijk roest, het metaal ijzer; chemisch geschreven Fe, wil dolgraag terug naar het stabiele chemische huwelijk Fe_2O_3 . Voor gebruikers van de stalen voorwerpen is dit vervelend. Staal is een sterk, vast materiaal, roest is een kruimelige losse substantie waar weinig draagvermogen aan te ontleen is. Het is dus zaak roestvorming in de stalen constructieonderdelen te voorkomen. Beseft moet worden dat er aan twee belangrijke voorwaarden voldaan moet worden voordat ijzer/staal roest, eigenlijk in ijzeroxide verandert. Dat zijn water of vocht en zuurstof oftewel lucht. Het water/ vocht is nodig om elektronen uitwisseling (=stroom) tot stand te kunnen brengen (eigenlijk geleiding, contact) en lucht is nodig om het zuurstof te leveren voor de chemische verbinding Fe_2O_3 . Zonder één van deze twee geen roestvorming. Daarom zijn er ook twee beschermingsmethoden.

De eerste is de lucht weghouden: een afsluitend laagje over het staal/ ijzer aanbrengen, het verven. Dit blijft een zwakke bescherming, beschadigingen en vergeten te verven / moeilijk bereikbare plekken zullen al snel toch roestvorming veroorzaken.

De tweede is de elektronen uitwisseling te voorkomen of beter gezegd staal/ ijzer haar elektronen te laten houden en 'iemand' anders dit te laten doen. Dat houdt in dat je een opofferingsmetaal aanbrengt dat onedeler is dan ijzer/ staal. Goud is het edelste metaal, ijzer zit middenin en zink is één van de onedelste metalen. Dat betekent dat

bescherming door een laagje zink perfect werkt. De zuurstof uit de lucht zal zich via een elektronenstroom door het laagje vocht/ water verbinden tot zinkoxide en het ijzer/ staal blijft onaangetast. Deze beschermingsmethode heet verzinken en het meest toegepast is thermisch verzinken waarbij de stalen onderdelen in een gesmolten zinkbad worden gedompeld zodat er een laagje zink overal op het staal zit. Het vervelende is dat zinkoxide een enigszins poederachtig materiaal is dat kan wegslijten en als al het zink 'op' is (=gebruikt, opgeofferd voor het staal) moet het ijzer/staal er ook aan en gaat het toch roesten. De beste bescherming van ijzer/ staal tegenwoordig is het duplex-verfsysteem waarbij zowel thermisch verzinkt als geveerd wordt. Eigenlijk, in plaats van verven hier gemoffeld: verf heet aanbrengen zodat het strak om het object heen krimpt. Maar ook dit gecombineerde systeem wordt maar tot 30 jaar gegarandeerd.

Tot slot kunnen we nog vermelden dat er een derde 'beschermings'methode is en dat is *roestvast* staal (niet roestvrij staal want dat is ieder schoon gepoetst stalen onderdeel) waarbij door legeringen (= zeldzame aardmetalen aan de smelt toegevoegd) bescherming tegen roesten ontstaat en wel permanent. Nadeel alleen is dat dit een vele malen duurder materiaal is dan gewoon staal. Als je echter alle kosten van schoon maken, vernieuwen en arbeidsloon/ voorzieningen om het te bereiken (steigers/ kranen) meeneemt, kan tegenwoordig toepassing van rvs (*roestvast staal*) lonend zijn. Naast dit roestvaste staal is er nog een staalsoort *Cortenstaal* genaamd die wel begint te roesten maar niet verder roest. Door de toevoeging van koper aan de smelt ontstaat een stabiele roestlaag die voor een beschermend laagje roest op het ijzer/ staal zorgt.

Gietijzer is veel duurzamer dan staal. Oude gietijzeren kolommen van meer dan een eeuw oud, verkeren nog in prima staat, zelfs als deze doorlopend met hun voeten in het water staan. Ook het oude smeedijzer is roestbestendiger dan gewoon staal. Mogelijk is dat een belangrijke reden dat de Eiffeltoren er nog steeds staat. Smeedijzer, dat inmiddels niet meer wordt gemaakt, heeft een zeer laag C-gehalte. Voor wat betreft sterkte-eigenschappen lijkt smeedijzer enigszins op een lage sterkteklasse staal.

Tot slot nog twee vervelende eigenschappen van staal. De eerste is zijn gebrek aan weerstand tegen brand de tweede is de kans op schade ten gevolge van vermoeiing.

De weerstand tegen brand, of beter warmte/ hitte, van staal is gering. Bij 500 graden is de draagkracht van staal al gehalveerd en bij 900 graden is het bijna nul en zakt alles dus als een plumpudding in elkaar. Bij een brand kan de temperatuur bij afdoend beschikbaar zijn van brandbaar materiaal al snel oplopen tot 1000 à 1200 graden. Daarom moeten we staal altijd tegen brand beschermen. Dat kan op drie wijzen. De eerste is het stalen onderdeel in te pakken of te bekleden met metselwerk, gipsplaten of afdoend dikke houten platen. De tweede is het staal te verven met een zogenaamde brandwerende verf. Dat is verf die bij verhitting gaan opschuimen en doordat dat laagje schuim als isolatie materiaal optreed beschermt dit het staal van de hoge temperaturen.

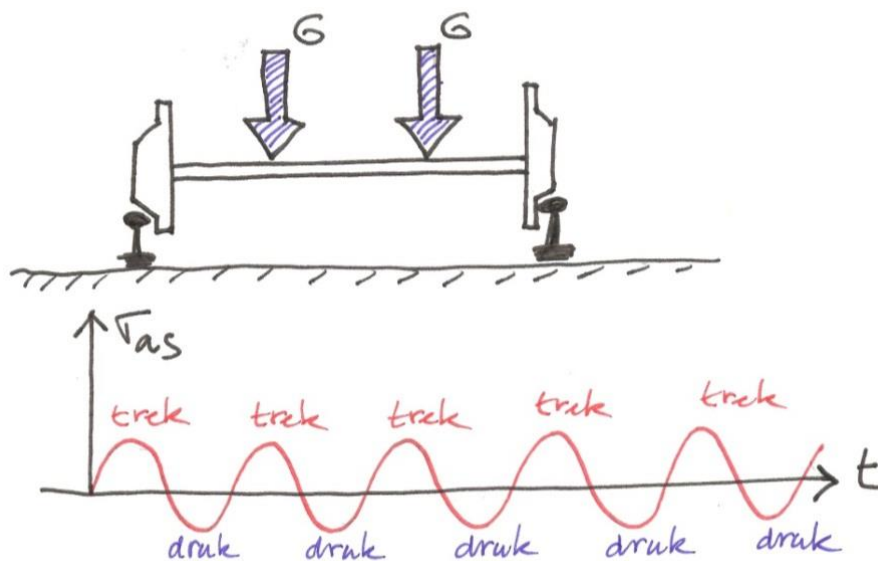
De derde methode is het gebouw van een sprinklerinstallatie te voorzien. Via een buizenstelsel en sproeikoppen in het plafond wordt er water op de beginnende brand gespoten die daardoor zich niet verder zal ontwikkelen.

Tweede vervelende eigenschap van staal is bezwijken door vermoeiing. Dit betekent dat na een groot aantal wisselingen van spanning in een constructie-element er plotseling, bij een laag spanningsniveau, dus ruim onder de vloeispanning, toch breuk kan optreden.

Het duidelijkst is dit uit te leggen aan de hand van het eerste door de mens geconstateerde geval van dit materiaal technisch fenomeen. In de tweede helft van de 19de eeuw, toen de spoorwegen zich over de hele wereld uitbreiden, zag men dat na een aantal maanden de wielassen van nieuwe spoorwagens spontaan braken, zelfs al was de wagon niet eens volgeladen! Na veel speurwerk kwam men er achter dat hier de vermoeiing van het staal van de assen verantwoordelijk voor was.

Er gebeurde namelijk het volgende. De spoorwagon as met links en rechts een wiel op de rails wordt door het gewicht van de wagon op buiging belast. Onderkant van de as op trek, de bovenkant op druk. Niets aan de hand, spanningsniveau ruim onder maximaal mogelijk. Maar nu gaat de trein rijden en met elke wiel omwenteling verandert in het staal van de as de spanning van maximaal trek naar maximaal druk. Dat gebeurt dus als de trein op volle snelheid rijdt honderden keren per minuut. Bij iedere spanningswisseling wordt het kristalskelet van het staal eerst in elkaar gedrukt en een onderdeel van een seconde later weer uitgerekt. Deze 'pompende' beweging doet de minuscule scheurtjes in het kristalskelet steeds een beetje groeien totdat de scheur zo groot is geworden dat breuk optreedt. Het staal is als het ware vermoeid geraakt daarom heet dit verschijnsel ook vermoeiing. Gelukkig treedt dit pas op na heel veel wisselingen, denk aan minimaal honderdduizenden keren.

NB. Ook beton heeft hier last van; bij de verkeersbruggen in ons land treedt tegenwoordig ten gevolge van de steeds groter wordende verkeersbelasting ook vermoeiing op.



Vermoeiing van de (ronddraaiende!) as van een spoorwegwagon in beeld gebracht.

In onze gewone gebouwen komt dit dus weinig voor. De wind bijvoorbeeld wisselt ook steeds van grootte maar niet vaak genoeg om vermoeiing te geven. Maar het voorbeeld van de spoorassen toont aan dat we er toch alert op moeten zijn.

Bijvoorbeeld onze stalen bruggen worden door de klappen van het iedere keer weer er op en er af rijden van de auto's op vermoeiing belast. Voeg daaraan toe dat het gewicht van één of meerdere vrachtauto's op een brug de spanning in het staal al redelijk doet oplopen en besef dat, hoe dichterbij je tegen de maximaal toelaatbare spanning aan zit, hoe gevoeliger een constructie voor vermoeiing is, dan begrijp je dat stalen bruggen op vermoeiing gedimensioneerd en berekend moeten worden.

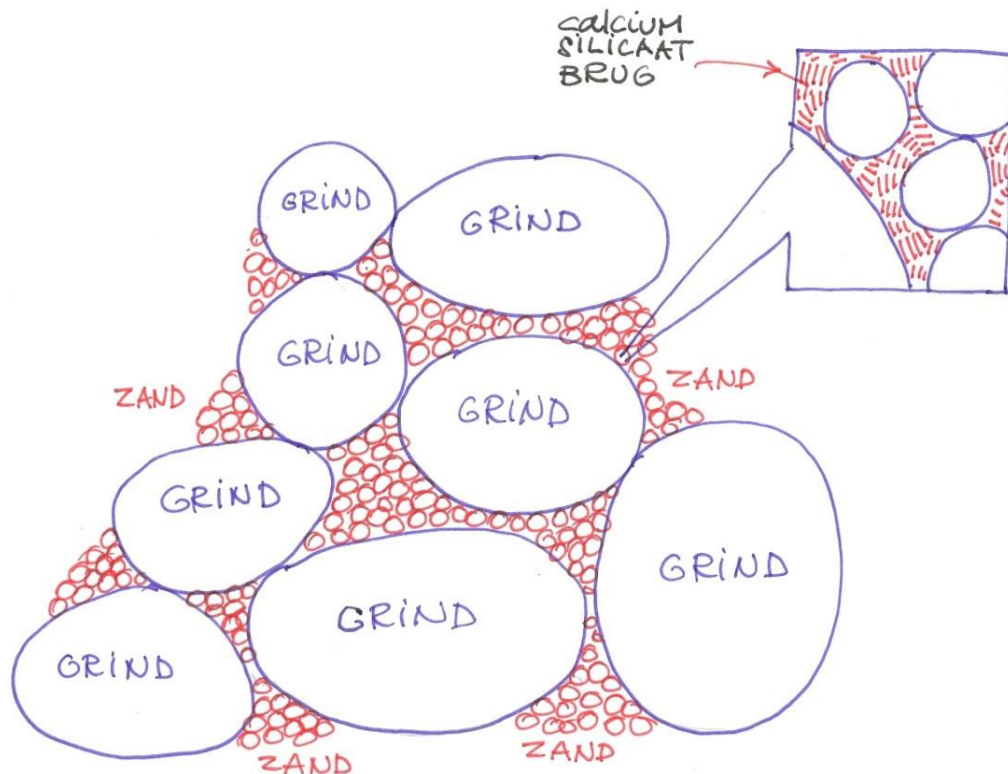
9.4 Beton

Beton is een mysterieus materiaal; je gooit water, zand en grind in een bepaalde verhouding bij elkaar, voegt wat cement toe, mengt de boel goed door elkaar heen, laat het blubberige mengsel een tijdje staan en, voilà, het geheel is verhard tot een stenige massa. Het ontstaan van beton gaat als volgt: de zandkorrels vullen de openingen tussen de grindkorrels op zodat er een dicht gepakt korrelskelet ontstaat. Dit korrelskelet kan uitstekend drukkrachten opnemen maar keer je de emmer dan dondert alles er uit. Een (los) korrelskelet kan namelijk geen trekkrachten opnemen. Het water en het cement mengen met elkaar in de nog resterende kleine openingen die in het zand/ grindskelet zijn overgebleven. Daar reageren het water en het cement met elkaar. Dat wil het cement erg graag want cement is niets anders dan bepaalde steensoorten die heel erg verhit (en gemalen) worden zodat ze tot poeder uit elkaar vallen. Het water stelt het cement in staat weer in zijn oude steen-moleculen-vorm terug te groeien. Dat gebeurt dan ook en in alle ruimtes tussen de zand- en grindkorrels gaan na het mengen allerlei calciumsilicaat-bruggetjes groeien.



Casa da Musica in Porto (Portugal) van architect OMA. Bouwfase in 2003 met wit betonnen constructie.

Er zijn vele Calciumsilicaat soorten. De ene soort groeit snel en geeft de eerste sterkte aan beton; de zogenaamde groene sterkte die al een paar uur na menging ontstaat maar de belangrijkste en sterkste Calcium silicaatsoort groeit heel langzaam en komt pas na 4 weken op volledige sterkte. De Calciumsilicaat bruggetjes koppelen alle zand- en grindkorrels aan elkaar vast en er ontstaat samenhang in het korrelskelet en dus ook trekkracht opname capaciteit. Helaas zijn de Calciumsilicaat bruggetjes niet sterk, de treksterkte van beton is dan ook maar een fractie van druksterkte van beton.



Eenvoudig model van het korrelskelet van beton met de aangifte van de op micro niveau werkzame calciumsilicaat bruggetjes, die als enige trekkrachten kunnen opnemen.

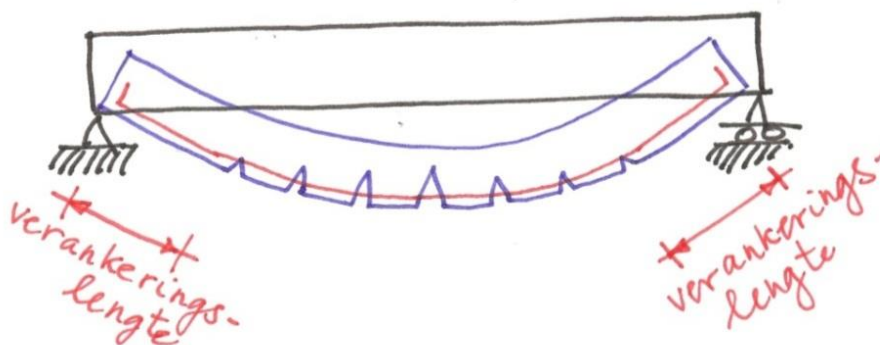
Beton komt in onze gebouwen in twee hoofdverschijningsvormen voor; als ter plaatse gestort beton of als prefab beton. Ter plaatse gestort beton wordt op de bouwplaats in elkaar gezet. Eerst wordt de bekisting uit houten platen en balken in elkaar getimmerd. Besef wel dat daardoor alle vormen van recht naar krom en scheef mogelijk zijn. De bekisting is eigenlijk een mal waarin het beton gestort wordt. Tijdens het storten is het beton nog vloeibaar, dat betekent dat de bekisting de vloeistofdruk van het nog onverharde beton moet kunnen opnemen. Daar zijn allerlei hulpconstructie zoals tijdelijke steunpunten (onderstempelingen en centerpennen) voor nodig. Na gereed komen van de bekisting moeten de benodigde wapeningsstaven in de 'kist' gevlochten worden. Pas als dat klaar is, kan er beton in de bekisting gestort worden.

Vroeger werd beton op het werk in een betonmolen gemengd; het zogenaamde 1, 2, 3 beton dat stond voor één deel cement, twee delen zand en drie delen grind plus net zo veel water tot er een smeug mengsel ontstond. De kwaliteit van dit zelf gemaakte beton was vaak slecht zodat tegenwoordig beton vrijwel altijd uit de betoncentrale komt waar het met de computer zorgvuldig gemengd wordt. Met grote betonmixer-vrachtauto's wordt het beton naar de bouwplaats gereden en via een betonpomp of een kübel (bak met klep aan de onderkant) in de bekisting gestort. Nadat het beton in de bekisting is verhard, kunnen pas de onderstempelingen en de bekisting verwijderd worden. Dan resteert het beton gestold in de vorm van de bekisting. Duidelijk zal zijn dat de kwaliteit van het oppervlak van in het werk gestort beton moeilijk in de hand gehouden kan worden; goed beton zichtwerk is een echt vak waar veel kennis en ervaring voor nodig is.

In een fabriek, vooral onder gecontroleerde omstandigheden zoals geen regen, wind of kou, zullen veel betere resultaten bereikt kunnen worden. Dit is één van de redenen dat meer en meer beton als prefab, dat wil zeggen van tevoren in een werkplaats vervaardigde betonnen onderdelen, in de bouw gebruikt worden. Voordelen van prefab beton zijn onder meer de betere kwaliteit, zowel in oppervlak als in sterkte, de lagere kosten ten gevolge van hergebruik bekisting in de fabriek, minder arbeidskosten en de snellere bouwtijd. Meteen na montage kan er verder gebouwd worden, je hoeft niet te wachten tot het beton hard geworden is. Nadelen van prefab beton zijn bijvoorbeeld de vele naden en de aansluitingen die nodig zijn. Niet alles kan immers over de weg getransporteerd worden of opgetakeld worden door een kraan.

Ook de groter dan vereiste maatnauwkeurigheid (past alles wel?) en hogere voorbereidingskosten en de tijd die daarvoor nodig is zijn een nadeel. Voor prefab elementen moeten zeer nauwkeurige tekeningen gemaakt worden die veel eerder beschikbaar moeten zijn dan bij ter plaatse gestort beton. De bouwtijd van een prefab skelet zal inderdaad zeer snel gaan maar al maanden van tevoren moet alles voorbereid en uitgetekend zijn om de productie mogelijk te maken. Voor ter plaatse gestort beton is veel minder voorbereidingstijd nodig. Uit de praktijk blijkt dat de som van voorbereidingstijd + uitvoeringstijd voor prefab beton en ter plaatse gestort beton bij elkaar in de buurt ligt.

Voor normaal constructiebeton, code C25, is de kubusdruksterkte 25 N/mm^2 en de treksterkte maar 3 N/mm^2 . Als we een betonnen balk op buiging belasten, zal er al snel een scheur ontstaan in het midden van de balk aan de onderzijde waar de trekspanning het hoogst is. Door die scheur kan de balk bezwijken en in stukken naar beneden vallen. Dat willen we natuurlijk niet in onze gebouwen en daarom vond men rond 1850 de wapening uit, in de vorm van stalen staven, die de betonbalk behoorlijk veel sterker maakt. Het beton scheurt nog steeds snel maar de stalen wapeningstaven overbruggen de scheur, geven samenhang en verhogen het draagvermogen van de betonbalk aanzienlijk. De wapeningstaven worden dus op trek belast en daar kan staal heel goed tegen. Wel moet je er op letten dat deze trekkracht in de wapeningstaaf op een andere (niet gescheurde) plek weer aan het beton afgegeven kan worden. Wij noemen dit het verankeren van de wapeningstaven.



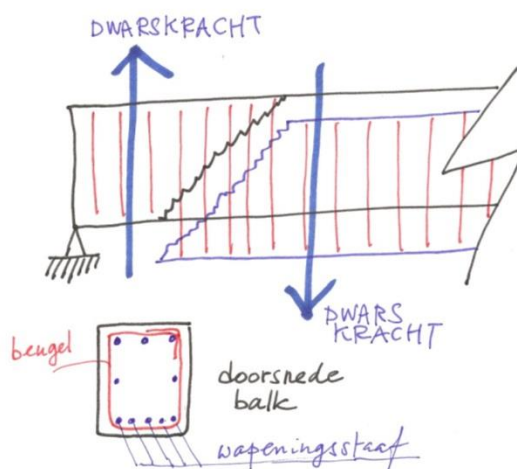
Een betonligger op buiging belast gaat scheuren, de stalen wapeningstaaf overbrugt de scheuren, koppelt het gescheurde beton en zorgt voor blijvende samenhang. Essentieel is dat de (getrokken) wapeningstaaf in het ongescheurde beton, in dit geval bij de opleggingen verankerd kan worden.

Zoals iedereen weet, roest ijzer zonder bescherming al snel weg. Wapeningsstaven in beton gestort, zullen gewoonlijk niet roesten omdat de pH van beton laag is. Cement creëert een basisch milieu en beschermt zodoende het wapeningsstaal tegen roesten. Wel moet men er op letten dat de wapeningsstaven voldoende diep in het beton zitten. De lucht (zure regen!) en de omstandigheden (opslagvat van zure materialen en, vooral dooizouten of zeewater) tasten het beton van af buiten aan en maken het beschermende laagje beton langzaam zuurder en heffen de roest beschermende werking op. Daarom moet er altijd, afhankelijk van de omstandigheden waarin het betonnen onderdeel moet functioneren, een zekere laagdikte beton vanaf het betonoppervlak tot de wapeningsstaaf aanwezig zijn, wij noemen dit de dekking.

Tabel 4.19 Betondekking op betonstaal van de buitenste wapening

| constructiedeel | bedekking c_{min} [mm] | | | toeslag bij: - voorspanstaal - nabewerkt oppervlak - oncontroleerbaar oppervlak - kubusdruksterkte $f'_{ck} < 25 \text{ N/mm}^2$ |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------------|--|
| | milieuklasse ¹⁾ | | | |
| | droog XC1 | vochtig XC2, 3, 4 | vorst/ dooizouten | |
| | | nat/vorst XF1, 3 | XD1, 2, 3 XF2, 4 | |
| | | | zeelucht XS1 zeewater XS2, 3 | |
| | | | agressief XA1, 2, 3 | |
| plaat/wand | 15 | 25 | 30 | 5 |
| balk/poer/console | 25 | 30 | 35 | 5 |
| kolom | 30 | 35 | 40 | 5 |
| toelaatbare scheurwijdte [mm] | 0,4 | 0,3 | 0,2 | |

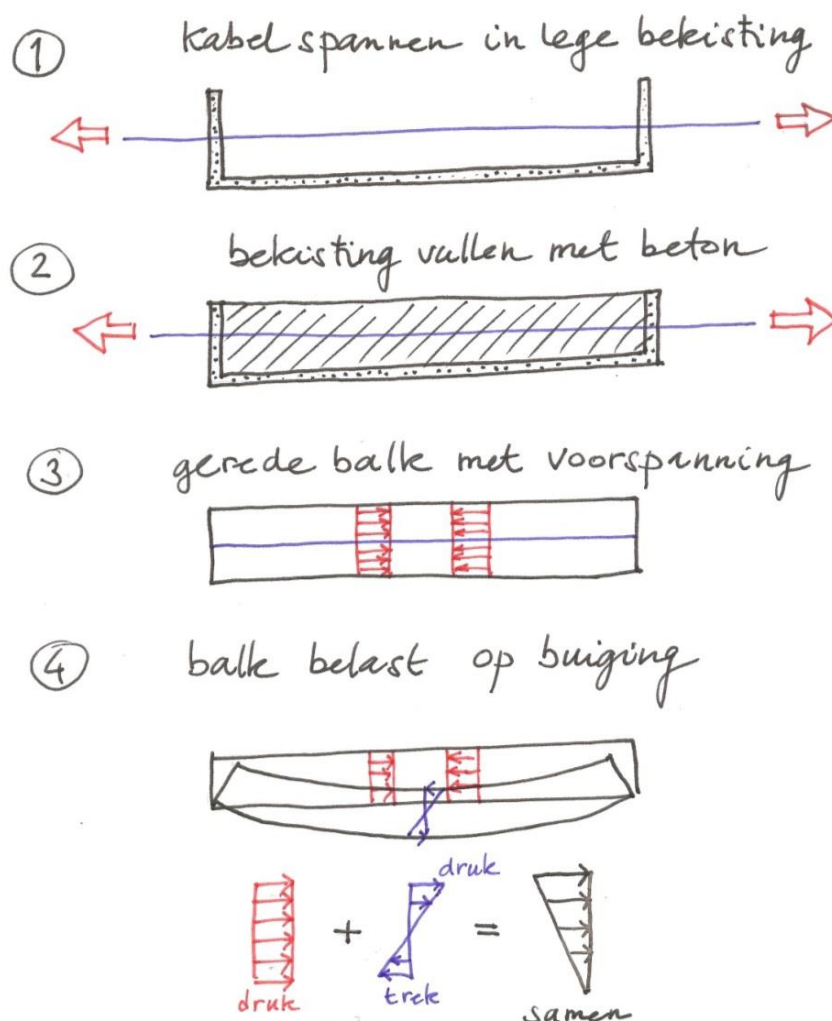
Overzicht van de benodigde dekking op het wapeningstaal (om roesten te voorkomen) bij diverse omstandigheden; de milieuklasse.



Werking van de beugels bij het opvangen van scheurvorming in het beton ten gevolge van dwarskracht.

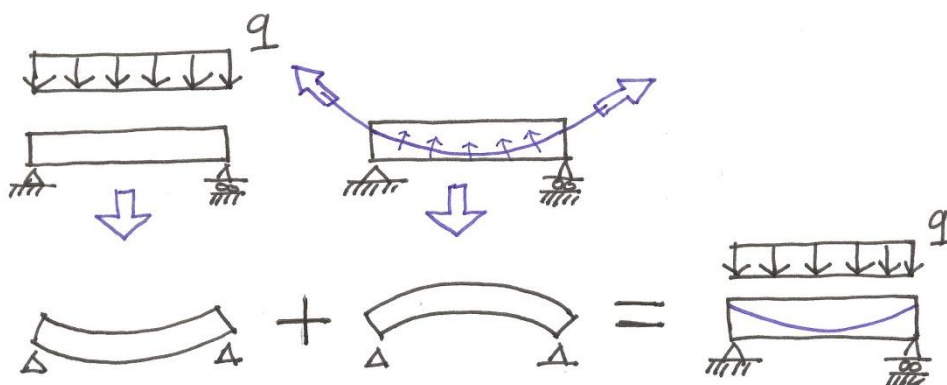
Betonnen balken worden niet alleen op buiging belast maar ook op dwarskracht of afschuiving. Vooral rond de oplegpunten is de dwarskracht het grootst en daar is het mogelijk dat de (af)schuifkrachten in het beton niet meer opgenomen kunnen worden. Ook hier is de oorzaak het feit dat het betonskelet weinig trekspanning kan opnemen. Dus moet hier ook de wapening hulp bieden; hier wordt dat vorm gegeven door stalen staven tot beugels te vouwen en op deze manier de (af)schuifscheuren te laten overbruggen.

Wapeningsstaven zijn passieve constructie onderdelen; pas na het scheuren van het beton ten gevolge van (over-) belastingen moeten ze aan het werk. We kunnen er ook actieve constructie elementen van maken door ze aan te spannen, het zogenaamde voorspannen. Hierbij worden bepaalde elementen, meestal geen staven maar kabels, in het beton ingestort die voor of na het verharden van het beton aangespannen worden.

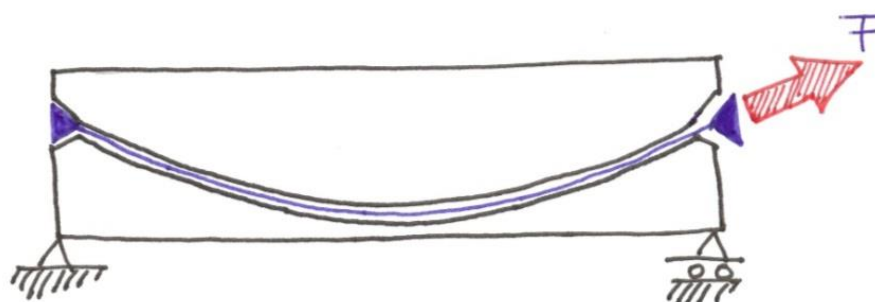


Werkwijze van het voorspannen van een betonconstructie door vooraf onder spanning gezet stalen kabels of staven vast te laten hechten aan vers gestort beton. Na verharden beton kan het staal afgeslepen worden en staat er permanent drukspanning in het beton. Stap 3 illustreert die situatie, stap 5 geeft de spanningstoestand na het aanbrengen van belasting op de balk. Bij deze methode wordt dus **vooraf** de drukspanning ten gevolge van **voorspannen** aangebracht.

Je kunt voorspanning op twee manieren aanbrengen. Ten eerste door een kabel (of een wapeningsstaaf) voordat het beton gestort wordt onder spanning te zetten (en te houden), daarna het beton te storten en te laten verharden en vervolgens de uitwendige kracht die de staaf onder spanning heeft gezet weg te halen. De staaf zal vervolgens willen krimpen maar hij zit aan alle kanten vast in het beton en zal dus zijn trekkracht via afschuiving aan het beton moeten afgeven. Hierdoor wordt drukspanning op het beton gezet. Bij deze methode moet de staaf (of kabel) recht lopen, een kromming is niet mogelijk.



*Voorspannen door na verharden van het beton een kabel of staaf onder een grote trekspanning te brengen. Na verankering van deze voorspankracht bij de bevestigingspunten staat er dus een permanente drukspanning in de betonconstructie. Als we deze kabel of staaf krom laten lopen ontstaat er (zie figuur) een opbolling in de constructie. De belasting q zorgt juist weer voor een bolling naar beneden toe. Als het goed is compenseren deze twee invloeden elkaar en blijft de balk of vloer dus horizontaal na belasting. De werkwijze van voorspannen zou men eigenlijk beter **naspanssen** kunnen noemen.*



De tweede methode is een holle buis in te storten in het beton. Na verharden van het beton wordt door de holle buis een kabel getrokken die aan één kant verankerd wordt en waar aan de andere kant heel hard aan getrokken wordt. Aan het einde van het heel hard trekken, wordt de losse kabel aan het ingestorte verankeringsblok vastgemaakt en geeft het zo een drukspanning in het beton. Nu kan dus wel een krom kabelverloop gerealiseerd worden. Eigenlijk is de benaming voorgespannen beton niet op zijn plaats voor deze methode. Het beton is immers al verhard en wordt achteraf op drukspanning gezet. Het zou dus beter **naspanssen** kunnen heten.

Voorspannen kan op twee manieren een bijdrage geven aan het draagvermogen van een betonnen ligger. De eerste is dat het aanspannen resulteert in een alom aanwezige drukspanning in het beton. Als nu een balk bijvoorbeeld door buiging wordt belast dan

moet de door de buiging opgeroepen trekspanningen eerst de al aanwezige drukspanning ten gevolge van voorspanning 'opeten' voordat er echt trek op het korrelskelet van het beton actief kan worden.

De tweede manier is de voorspankabel krom door de ligger te laten lopen. Als je kabel nu aanspant gaat hij de balk omhoog drukken. Als er vervolgens belasting op de balk gezet wordt moet deze belasting eerst de opbuiging ten gevolge van het voorspannen wegdrücken voordat het beton van de balk er iets van gaat merken.

Beton is in verschillende sterkteklassen verkrijgbaar. Hieronder enkele eigenschappen van gewoon beton (C30) tot zeer hoge sterkte beton (C200)

| Eigenschappen verharde Zeer Hoge Sterkte Beton | | | |
|---|-------------------|-----------------------|------------------------|
| | | B45 | B200 |
| druksterkte | MPa | 45 | 170 - 230 |
| treksterkte | MPa | 1,65 | 7 - 12 |
| buigtreksterkte | MPa | 3,3 | 30 - 60 |
| breukenenergie | kJ/m ² | 0,1 | 20 - 40 |
| elasticiteitsmodulus | GPa | 33 | 50 - 60 |
| dichtheid | kg/m ³ | 2400 | 2525 |
| diffusiecoëfficiënt C_i | m ² /s | 1.1×10^{-12} | 0.02×10^{-12} |

| Andere duurzaamheidsaspecten | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| | | B30 | B80 | B200 |
| porositeit | vol % | 15 | 10 | 1 |
| permeabiliteit lucht | | | | |
| 5 dagen bij 50°C | | 30×10^{-18} | 0.3×10^{-18} | |
| 30 dagen bij 80°C | | | 120×10^{-18} | 2.5×10^{-18} |
| diffusiecoëff C_i : D_{eff} | m ² /s | 1.1×10^{-12} | 0.6×10^{-12} | 0.02×10^{-12} |
| carbonatatie diepte | mm | 10 | 2 | 0.02 |
| corrosiesnelheid | mm/jr | 1.2×10^{-3} | 0.25×10^{-3} | $<0.01 \times 10^{-3}$ |
| elektrische weerstand | kΩ/cm | 16 | 96 | 137/1133 |
| erosie | V/Vref | 4.0 | 2.8 | 1.3 |
| vries/dooi scaling | g/cm ² | >1000 | 900 | 7 |

Van beton moeten we nog één vervelende eigenschap vermelden. Nee, niet de brandwerendheid, die is zelfs uitstekend te noemen, maar de in de tijd toenemende vervorming onder gelijkblijvende belasting. Dit noemen wij kruip. Als je dus een zware last op een (goed gewapende) betonbalk zet, zal de balk in eerste instantie direct een stuk doorbuigen maar als je bijhoudt hoeveel die vervorming nog in de tijd toeneemt dan zal je zien dat over een periode van 3 tot 5 jaar de eerste, initiële vervorming nog met zo'n 30% kan toenemen. Kruipvervorming is lastig en kan bijvoorbeeld scheurvorming als gevolg hebben in metselwerkmuren die op betonnen vloeren staan. In het algemeen lossen wij deze door de kruip ontstane problemen op door het spanningsniveau in het beton laag te houden en dus eigenlijk over te dimensioneren. De kruip zal er nog wel zijn maar hooguit tot 5 à 10 % zijn invloed laten gelden.

9.5 Glas

Alhoewel glas als ruiten in gevels al eeuwenlang wordt toegepast, en dus de windbelasting moet dragen!, wordt glas pas de laatste twintig jaar als een potentieel constructief bouwmateriaal gezien. Glas kan op zich heel sterk zijn, op druk zelfs wel tot 1000 N/mm^2 maar op trek belast is het zwak en, vooral, onbetrouwbaar. De oorzaak is dat glas weliswaar lineair elastisch is maar dat als het breekt het ogenblikkelijk zijn samenhang totaal verliest. Een stalen balk vloeit en vervormt; een betonnen balk scheurt en vervormt (mits goed gewapend); een houten balk kraakt en scheurt en vervormd maar de constructies behouden hun vorm en liggen niet zoals glas beneden op de vloer in 1000 scherven.

Deze negatieve eigenschap van glas kan overwonnen worden door twee bewerkingen. De eerste is door het glas te lamineren, dat betekent lagen op elkaar te plakken. Hierdoor wordt de kwetsbaarheid beduidend minder. Als een steen de buitenste ruit breekt dan zijn de achterliggende ruiten nog intact en worden zelfs door de eraan klevende brokken gebroken glas beschermt tegen de volgende stenen.

De tweede bewerking is het glas te harden. Hierbij wordt een glazen element in een oven tot circa 700 graden verhit en dan opeens uit de oven gehaald. Daardoor stolt de buitenkant van het glazen element bij kamertemperatuur maar het binnenste is nog steeds op 700 graden. Dit binnenste gedeelte gaat ook afkoelen en zal dus moeten krimpen maar zit nog steeds innig verbonden aan de al gestolde buitenkant. De krimpende binnenkant gaat dus heel hard trekken aan de buitenkant en introduceert in die buitenkant een drukspanning. En dat is voor glas heel gunstig.

Druk is nooit een probleem, dwarskracht trouwens daarom ook niet, maar trek is fataal voor glas. Want zoals een wijs man eens heeft gezegd: glas heeft geen materiaal-eigenschappen maar is volkomen afhankelijk van de conditie, de kwaliteit van het oppervlak. Ideaal glas gemaakt onder laboratoriumcondities kan een treksterkte bereiken van 3000 N/mm^2 . Ons gewone vensterglas dat we floatglas noemen, kan maar $10\text{-}50 \text{ N/mm}^2$ opnemen, met dan ook nog een grote spreiding! De verklaring hiervoor is dat het oppervlak van het laboratoriumglas volkomen glad was en ons floatglas ten gevolge van de productie in de grote ovens van de glasindustrie en alle beschadigingen bij vervoer, montage en schoonmaken onder kleine en grote krassen en butsen zit. Zetten we een trekspanning op een oppervlak met kleine scheuren dan zal de trekspanning die scheuren extra onder trek zetten. Daardoor springt een scheur of barst in het glas die door niets wordt tegen gehouden en doorschiet tot hij de andere kant van de plaat bereikt en de plaat zijn samenhang verliest oftewel in stukken uit elkaar valt. Nu begrijp je ook waarom dat harden zo effectief is. De geïntroduceerde drukspanning aan de buitenkant drukt juist al die scheuren dicht. Het glas wordt minder gevoelig voor trekspanningen. Resumerend: glas is een gevaarlijk constructiemateriaal, je moet het òf lamineren, òf harden, òf slechts een laag spanningsniveau toelaten. En hoe ouder de glasplaat wordt, hoe lager de toelaatbare spanning is, want met de leeftijd neemt het aantal scheuren en beschadigingen toe en daalt het draagvermogen van glas.

Maximaal toelaatbare trekspanningen in (gewoon) floatglas.

| | |
|---------------------------------------|---------------------|
| Kortdurend (windvlagen in een storm) | 45 N/mm^2 |
| Een paar minuten (bv verkeer/ mensen) | 27 N/mm^2 |
| Langdurend (waterdruk, eigen gewicht) | 7 N/mm^2 |

Voor volledig gehard glas geldt voor alle omstandigheden (door het harden!) 120 N/mm^2 , voor half gehard glas geldt voor alle omstandigheden 60 N/mm^2 .

We gebruiken bij voorkeur half gehard glas omdat het wat sympathieker breekt, geen explosie van kleine glasscherfjes (denk aan de autoruiten vroeger; opeens zag je niets meer) en geen gevaar voor Nikkelsulfide schade (plotselinge breuk in een warme periode) vertoont. De laatste jaren is het gelukt om alle elementen van een constructie in een volledig glazen uitvoering te realiseren. Zie de in glas uitgevoerde verbinding tussen twee gebouwen in de dierentuin te Arnhem (zie afbeelding). Hierin kun je de volgende geheel uit glas opgebouwde constructie-elementen herkennen: een glazen balk, een glazen trap, een glazen vloer, een glazen wand of gevel en een glazen dak.

Glas heeft één zeer vervelende eigenschap: het kan totaal niet tegen brand. Al bij lage temperaturen springen de scheuren erin. Gehard glas gedraagt zich iets gunstiger maar niet veel. Je kunt wel brandwerend glas maken maar hierbij maak je weer een gelamineerde glasplaat waarbij er tussen de buitenste twee glasplaten een bij hitte opschuimend laagje wordt gevormd die het achterliggende glas beschermt. Deze (zolang het niet brandt) transparante glassoort is zeer kostbaar.



*Verbindingsbrug tussen twee gebouwen van de dierentuin Arnhem; Burgers ZOO.
Een echte, bijna volledige glasconstructie.*

9.6 Composit

Composit is de verzamelnaam voor alle kunststof producten die bestaan uit een moedermateriaal (de grote massa) waarin een ander materiaal van veel hogere sterkte als wapening is opgenomen. Dat moedermateriaal kan bijvoorbeeld kunsthars zijn of polyester. De wapening kan bestaan uit koolstofvezels (merken Twaron en Kevlar), hoge sterkte kunststof (met als merknaam Dynema), of glasvezels, want in de vorige paragraaf stond al dat glas heel sterk kan zijn.

Net als bij beton kunnen alle vormen in composiet gemaakt worden, denk aan een zeilschip of een brug. Hier vinden de eerste toepassingen plaats. In de reguliere bouw komt het echter langzamerhand ook opzetten. Wat er voor pleit is het lichte gewicht, hetgeen zeker bij grote overspanningen een groot voordeel is, en de resistentie tegen biologische aantasting (rotten, aanvreten) en tegen de aantasting door water en lucht (roesten). Nadelen zijn de brandgevoeligheid, de mogelijkheid dat er kruipvervorming optreedt en de verkleuring/ontkleuring die soms optreedt.



Voorbeeld van een kunststof (composiet) brug.



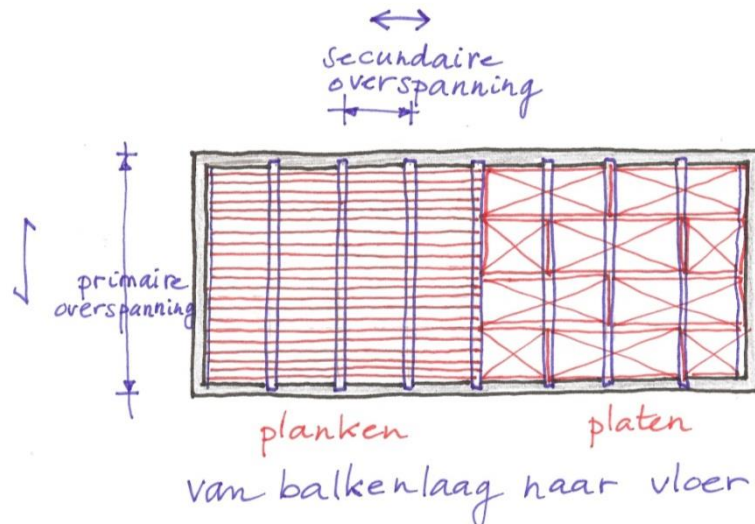
Voorbeeld van een kunststof (composiet) viaduct.



Een mooie natuur-'composiet'-constructie: een zwaluwnest opgebouwd uit brokjes natte leem met stro als wapening.

10 Balken

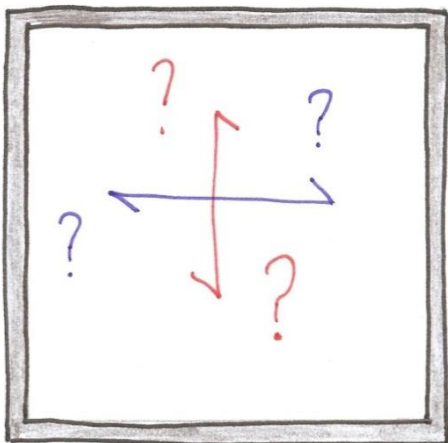
Balken zijn lineaire elementen die op buiging belast van steunpunt naar steunpunt lopen. De afstand tussen die steunpunten noemt men de overspanning. Als je een rechthoekige ruimte, omsloten door vier muren moet overspannen is het verstandig om de balken neer te leggen in de richting van de kleinste overspanning.



Als je de balken netjes in de richting van de kortste overspanning, de primaire overspanning hebt neergelegd moet de vloer zelf nog gelegd worden. Deze rust op (of tussen) de balken en als het een houten vloer is zijn dit planken of (multiplex) platen. Deze planken of platen overspannen de secundaire overspanning; de hart op hart afstand tussen de balken. Gezien de geringe dikte (en dus draagvermogen) van deze elementen kan de secundaire overspanning niet te groot zijn, in de praktijk is dit meestal rond de 600 mm. De hart op hart afstand (meestal afgekort tot hoh.) bepaalt ook hoeveel van de vloer belasting op de balk terecht gaat komen.

10.1 Overspannen vierkante ruimte

Bij een rechthoekige vloer plattegrond is er altijd een kortste overspanning, maar hoe zit dit bij een vierkante plattegrond? Hierbij moet je een keuze maken of de balken in een patroon leggen. Hier onder afgebeeld de verschillende mogelijkheden.

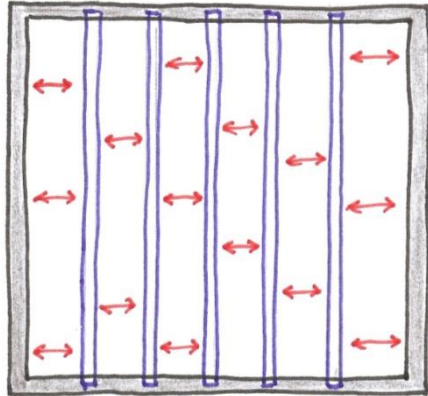


Vierkant

Bij een vierkante ruimte is het de vraag:

In welke richting moet ik de balken leggen?

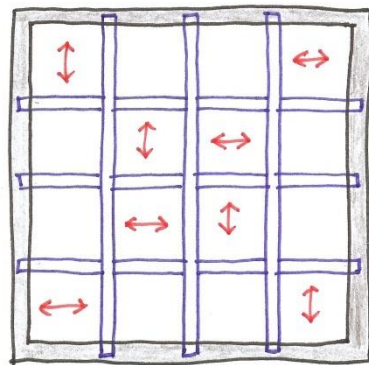
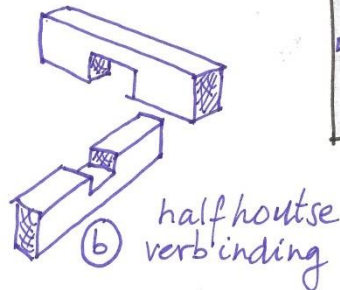
↔ = secundaire (planken)
overspanning (platen)



De eerste mogelijkheid is gewoon een richting te kiezen en de balken naast elkaar neer te leggen. Naast het feit dat dit een beetje saai plafond uiterlijk geeft is dit ook niet een qua materiaalverbruik slimme oplossing: de balkhoogte, die bepaald wordt door de grootste overspanning en die is er eigenlijk niet! Qua bouwkosten is dit wel weer een optimum, je legt zonder ingewikkeld zaagwerk en moeilijk verbindingen de balken direct neer en kun verder met de vloer.

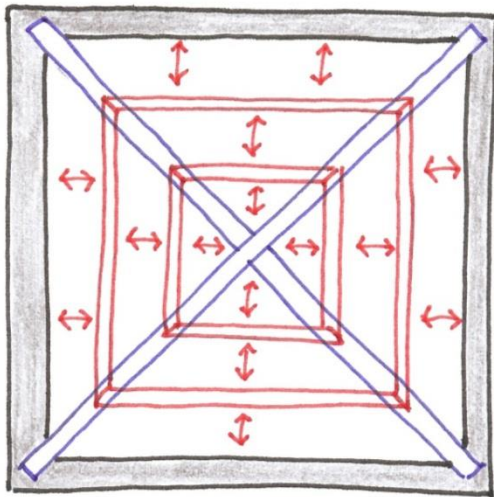
① één hoofdrichting.

↔ = secundaire overspanning



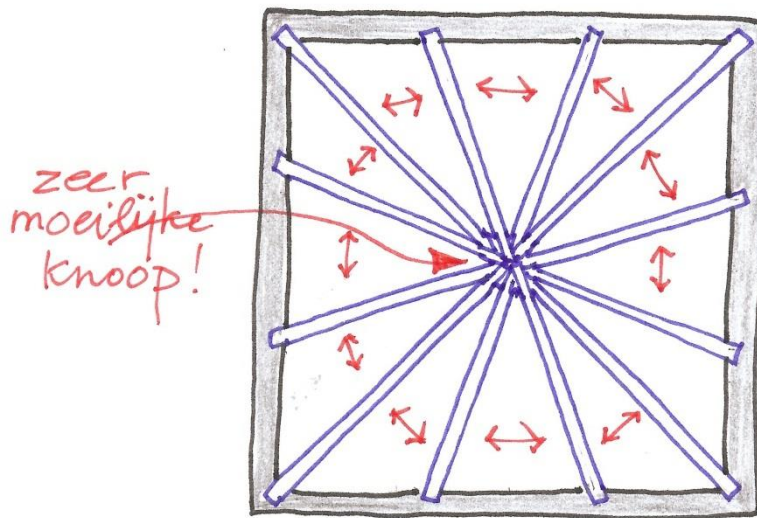
② balkenrooster.

De volgende mogelijkheid is de balken bewust in beide richtingen te leggen, hierdoor ontstaat mogelijkheid 2: een balkenrooster. De overspanning neemt weliswaar niet af maar iedere balk draagt in vergelijking met mogelijkheid 1: één hoofdrichting, slechts de helft van een veld. Hierdoor neemt de belasting met 50% af en kan dus ook de balkhoogte minder zijn, globaal tot 75% van de hoogte bij een hoofdrichting. Beseft wel dat bij dit systeem extra arbeidskosten gemaakt moeten worden door het neerleggen van meer balken en door alle verbindingen tussen de twee balklaag-richtingen. Voor die verbindingen zijn er twee mogelijkheden, of stapelen, boven op elkaar, of in een vlak door middel van de halfhoutse verbinding. Deze laatste methode is mooier maar ook weer duurder en heeft bij gelijke hoogte uiteraard ook een veel lagere sterkte.



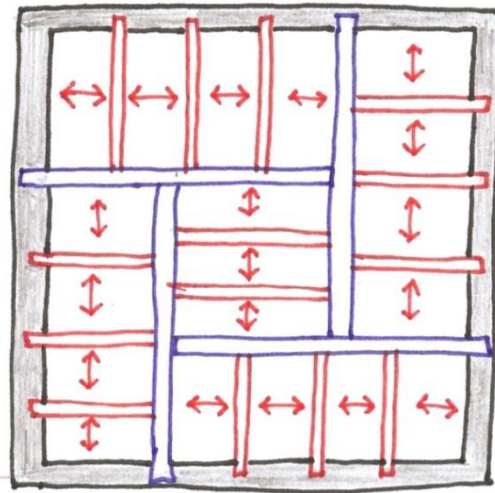
De derde mogelijkheid is het opdelen van de balklaag in grotere primaire balken en daarop steunend lichtere secundaire balken. In het totaal kan balkmateriaal bespaard worden omdat de secundaire balken (veel) minder overspannen. Bedenk wel dat hier weer meer arbeidsloon in geïnvesteerd moet worden om dit mooiere patroon te verwezenlijken, vooral het vele zaagwerk is hier debet aan.

③ diagonalen als primaire balk



④ radiaal patroon

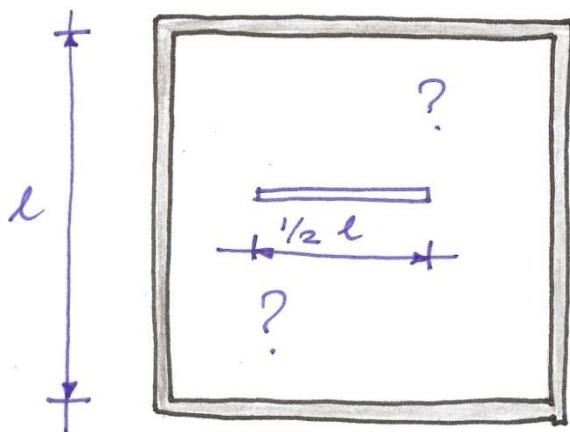
Mogelijkheid 4 is een radiaal patroon. Hierbij lopen alle balken naar een punt in het midden. Ook hier geldt dat de vloerbelasting per balk minder is dan bij een hoofdrichting. De plaats waar alle balken bij elkaar komen is een zeer moeilijke knoop! Oftewel hier is heel knap timmermanswerk en maatbeheersing nodig, of, pragmatischer, een stalen ring in het middenpunt waartegen de houten balken bevestigd worden.



⑤ Swastika - patroon.

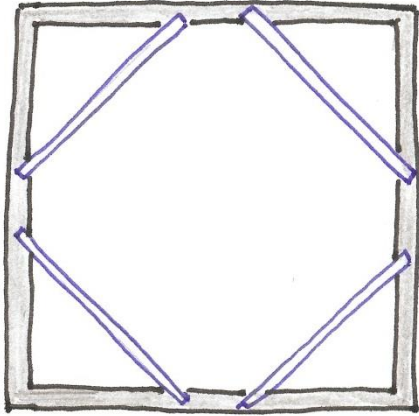
Tot slot mogelijkheid 5, het zogenaamde swastika-patroon (ook wel hakenkruis genoemd maar sinds WO II een beetje beladen begrip). Hierbij liggen de primaire balken in het swastika-patroon en overspannen de secundaire balken een duidelijk kleinere overspanning. Dezelfde overweging voor arbeidskosten als bij de vorige balkpatronen is weer van toepassing. Alleen het aardige van een swastika-patroon is dat de primaire balken ogenschijnlijk halverwege de overspanning stoppen; ze steunen op elkaar. Dus in het geheel van balken overspannen zij wel de totale overspanning maar individueel niet. Je kunt een swastika-patroon zelfs zo uitvoeren dat de primaire of hoofdbalken alleen op elkaar rusten; een bijzonder gezicht.

Tot slot nog een aardige variant op de balkenpatronen, die tevens een verrassende bijdrage zal geven aan jullie constructieve inzicht. De vraag is hoe overspan je een vierkante ruimte met overspanning l (lengte) met balken van lengte half l ($1/2 \times l$)?



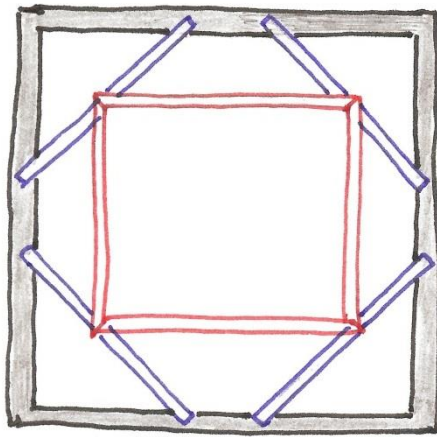
HOE?

Het probleem van de (te) korte balken bij een grotere overspanning.



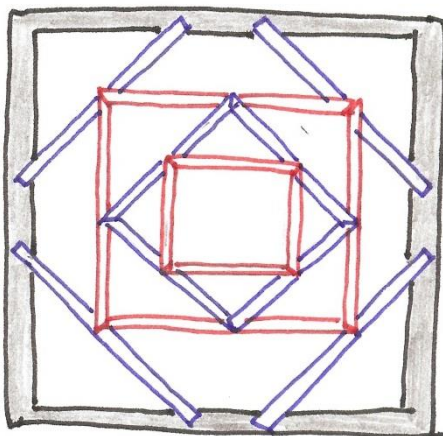
STAP 1.

Het geheim van de oplossing zit in het neerleggen van de te korte balk op de plek die hij nog net kan overspannen. In de hoeken dus!



STAP 2.

Vervolgens leg je de tweede laag balken op deze eerste laag, wederom in hun grootste mogelijkheid. Zoals je in figuren kunt zien heb je door deze truc de overspanning al behoorlijk gereduceerd!



STAP 3.

Vervolgens ga je door met dit principe totdat je de hele plattegrond hebt vol gelegd.

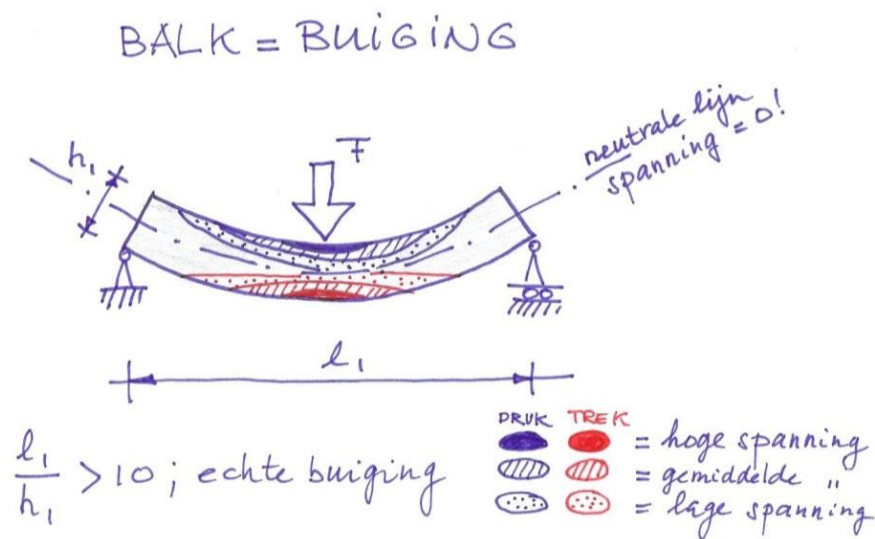
Wat er nu ontstaat is een fascinerende stapeling van balken in een prachtig steeds van richting veranderend patroon. Je kunt de balken op elkaar neer leggen (stapelen), je kunt ook als je een deskundig timmerman bent de balken in een vlak laten werken met een mooie gezaagde en verlijjnde verbinding.

10.2 Slanke ligger versus gedrongen ligger

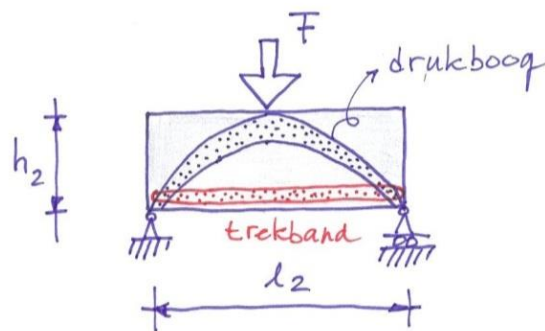
Als de afstand tussen de muren klein wordt, zeg twee meter, dan kun je jezelf afvragen of een (dikke) balk zich nog wel als balk, dat wil zeggen op buiging belast, gaat gedragen. Dat blijkt niet zo te zijn. We spreken dan van gedrongen constructies, die zich wezenlijk anders gedragen dan een balk op buiging.

De eerste vraag is wanneer is een ligger echt een balk? Natuurlijk zijn ligger en balk, zo hebben we in het zesde hoofdstuk (Elementen van een constructie) geleerd, woorden voor hetzelfde begrip maar we bedoelen nu: wanneer werkt een balk als een buigligger, voornamelijk belast door buiging? Het blijkt dat alleen *slanke liggers*, dus met een kleine hoogte ten opzichte van de overspanning zich echt als *buigligger* gedragen. Bij een niet slanke oftewel *gedrongen ligger* gaat de *dwarskrachtoverdracht*, of eigenlijk de boogwerking, in de gedrongen ligger een overheersende rol spelen en is de buiging secundair.

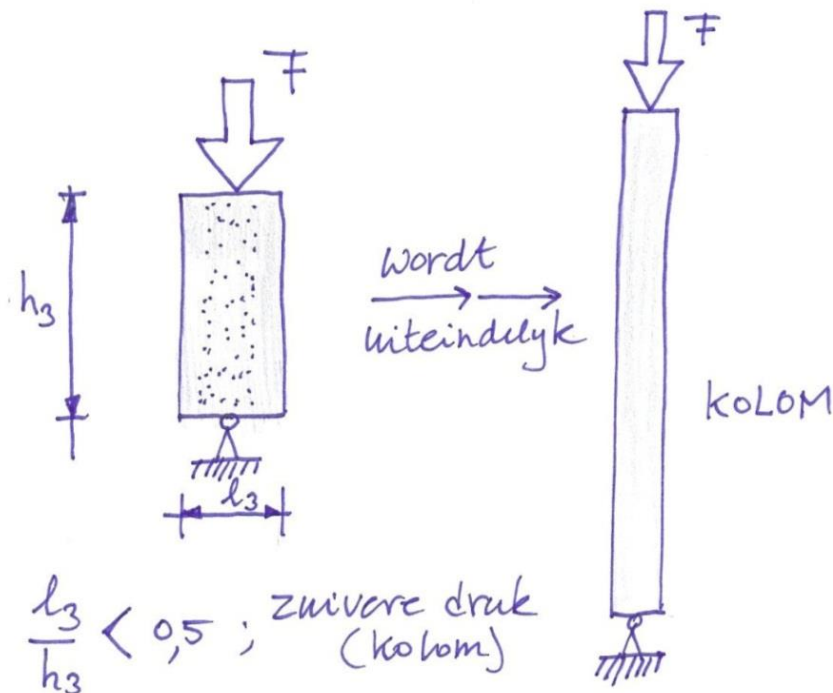
De plaatjes hieronder laten het effect van de krachtswerking in de balk zien.



GEDRONGEN LIGGER



$\frac{l_2}{h_2} < 5$; geen buiging meer;
drukboog + trekband model



Zo zien we dat de kolom eigenlijk een (zeer) bijzondere vorm van de balk is, of andersom natuurlijk. Alleen is de manier waarop spanningen worden overgebracht totaal verschillend via buiging in de 'echte' balk van boogwerking in de gedrongen ligger naar zuivere druk in de kolom.

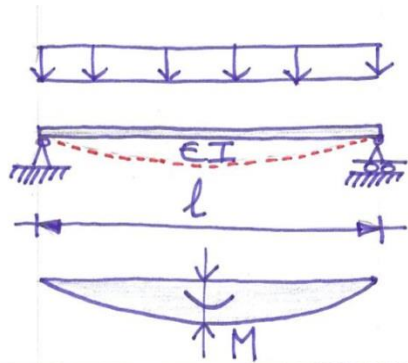
We gaan in dit hoofdstuk echter verder met de 'echte' balken, slanke balken, dus belast op buiging. Buiging is een slap mechanisme die al bij kleine belastingen vervormingen, doorbuigingen laat zien. Die vervorming is echter essentieel bij het bieden van weerstand door de balk tegen de belasting. Eigenlijk is een balk een grote veer die de belasting terug moet duwen! Zonder vervorming geen terugveerkracht dus respect voor de vervorming, juist hierdoor heeft de balk terugveer vermogen: het kan niet anders!

10.3 Overzicht momenten en vervormingen

In onderstaand figuur staan een groot aantal standaard situaties afgebeeld met de bijbehorende buigende momenten en de optredende vervormingen of doorbuigingen. We noemen dit wel de 'vergeet-mij-nietjes' omdat iedere constructeur ze eigenlijk uit zijn hoofd moet weten. Jullie hoeven ze niet uit het hoofd te leren maar ze wel goed kennen want ze geven een goed inzicht hoe je door te manipuleren met de oplegcondities de vervorming van een balk kan beïnvloeden. Zo kun je zien dat door de zelfde balk met de zelfde overspanning en belasting in plaats van bij de opleggingen 'vrij' (= rol of scharnier) op te leggen deze in te klemmen, de doorbuiging met een factor 5 of tot 20% kan verminderen!

Ook het overzicht van de buigende momenten is illustratief van een éénveldsligger met $1/8 q \cdot l^2$ naar $1/2 q \cdot l^2$ (400% meer!) voor een uitkragende ligger.

Verder zien we dat bij de buigende momenten, die het spanningsniveau (het criterium Sterkte!) in een ligger bepalen de overspanning l in het kwadraat gaat. Een twee keer zo lange ligger heeft dus een vier keer zo hoge spanning in het materiaal van dezelfde ligger. Bij doorbuiging, het criterium Stijfheid!, wordt het nog erger: een twee keer zo lange ligger geeft een zestien keer (tot de macht vier!) zo grote doorbuiging te zien.

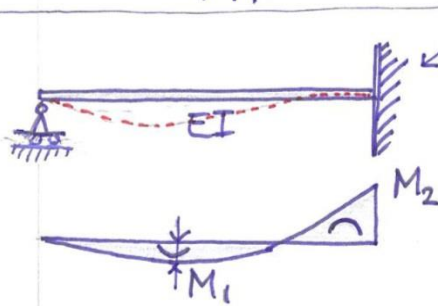


SCHARNIER + ROL

$$M = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 \quad [kNm] \quad (100\%)$$

$$\delta_{\max.} = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad [mm] \quad (100\%)$$

(t.p.v. midden)



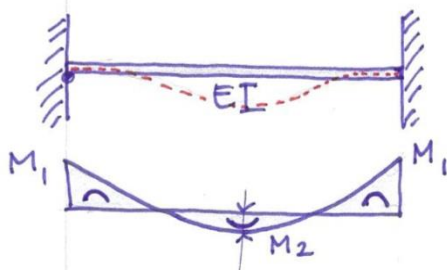
ROL + INKLEMMING

$$M_2 = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 \quad (100\%)$$

$$M_1 = \frac{9}{128} \cdot q \cdot l^2 \quad (56\%)$$

$$\delta_{\max.} = \frac{2 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (40\%)$$

(t.p.v. M₁)



INKLEMMING + INKLEMMING

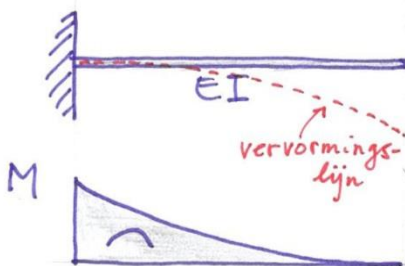
let op temperatuur beweging!

$$M_1 = \frac{1}{12} \cdot q \cdot l^2 \quad (67\%)$$

$$M_2 = \frac{1}{24} \cdot q \cdot l^2 \quad (33\%)$$

$$\delta_{\max.} = \frac{1 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (20\%)$$

(t.p.v. midden)



INKLEMMING + VRIJ

$$M = \frac{1}{2} \cdot q \cdot l^2 \quad (400\%)$$

$$\delta_{\max.} = \frac{1 \cdot q \cdot l^4}{8 \cdot E \cdot I} \quad (960\%)$$

Het belangrijkste overzicht van dit dictaat: Buigend moment grootte en de bijbehorende doorbuigingen uitgedrukt in de overspanning (lengte l), de op de balken werkende belasting (gelijkmatig verdeelde belasting q), de materiaalsoort (elasticiteitsmodulus E) en de stijfheid van de doorsnede van de balk (oppervlakte traagheidsmoment I). Ook van groot belang de opleggingsuitvoering: een rol, een scharnier of een inklemming. In het rood de gevolgen op de grootte van het buigende moment M of de doorbuiging 'delta'.

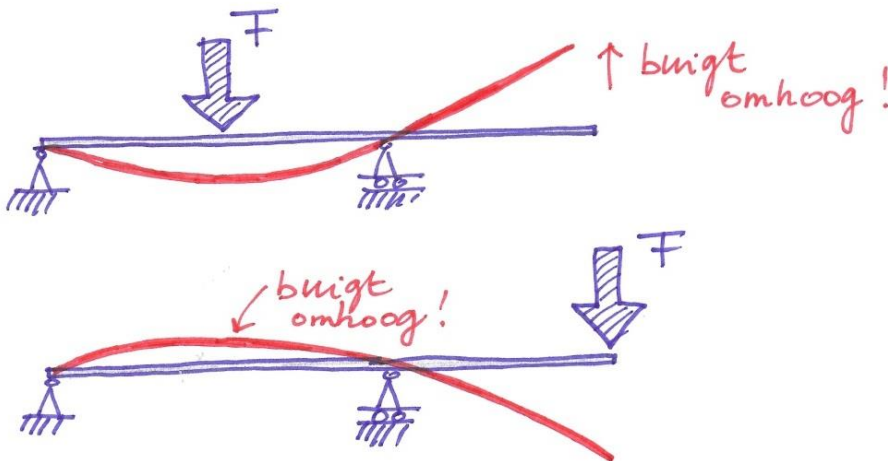
10.4 Balken met een uitkraging

Tot nu toe hebben we balken beschouwd die op twee steunpunten opgelegd lagen en een zogenaamd enkel veld overspande. Balken kunnen echter een stuk doorlopen voorbij de oplegging; dit noemen we een uitkraging.



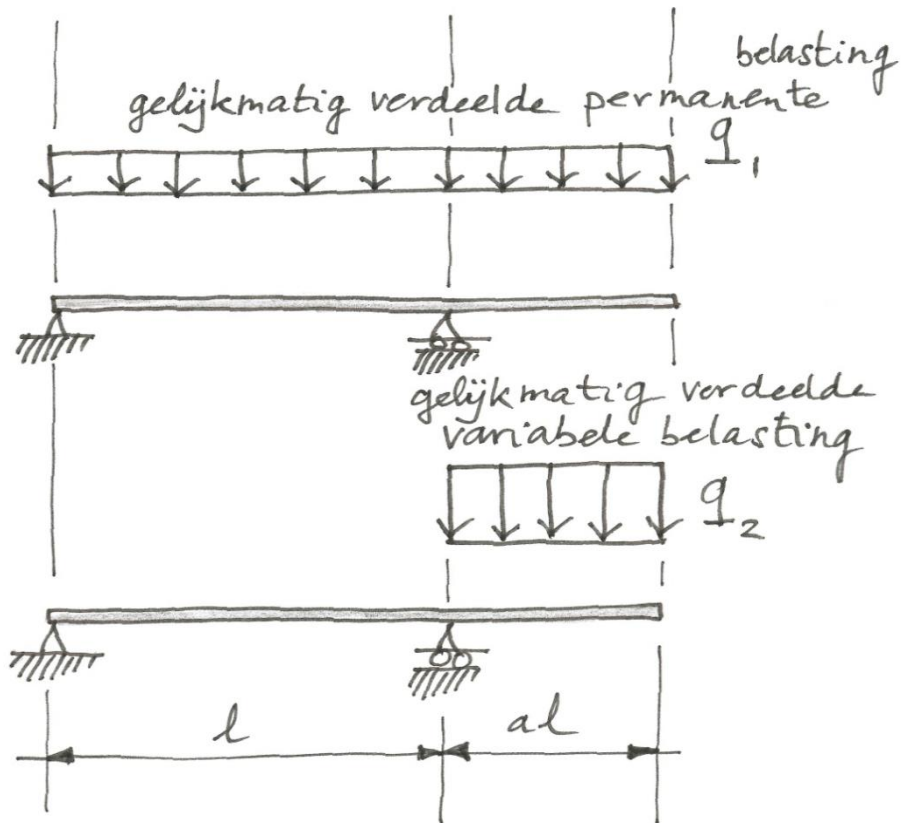
UITKRAGENDE BALKEN

In deze paragraaf concentreren wij ons op de uitkragende balk eerst met slechts aan één kant een uitkraging. Als we het vervormingsgedrag van dit type balk onder invloed van een puntlast bestuderen dan blijkt dat de puntlast, die volgens de zwaartekracht naar beneden is gericht, op sommige posities van de puntlast de balk omhoog kan laten bewegen; tegen de zwaartekracht in!

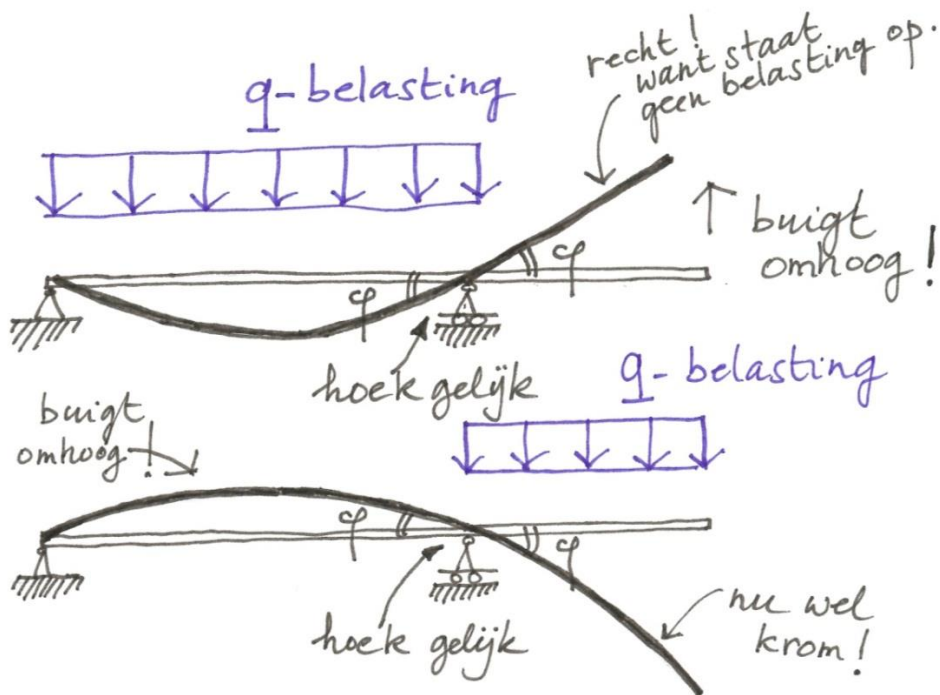


Uitkragende balk met puntlast op verschillende posities zodat bepaalde delen van de balk tegen de zwaartekracht in omhoog gaan.

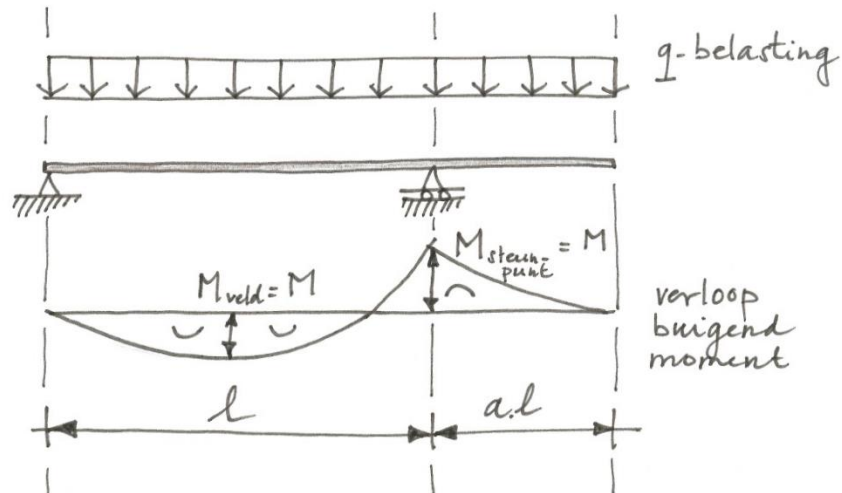
De vraag die dan opkomt is; hoe kunnen we dit slim gebruiken om met lichtere balk profielen (dus goedkoper en duurzamer) een overspanning te maken. We gaan nu uit van een balk belast door een gelijkmatig verdeelde belasting q ; een gelijkmatig verdeelde belasting komt immers veel meer voor dan een puntlast; denk aan de rustende belasting, die er altijd is, zoals eigen gewicht, vloer- en plafondafwerking etc. Ook kan de gelijkmatige verdeelde belasting slechts lokaal aanwezig zijn in de vorm van een variabele belasting zoals bijvoorbeeld mensen of goederen.



In het onderstaande figuur wordt eerst de vervorming van een uitkragende balk belast door een q -belasting toegelicht en in de volgende figuur een toelichting gegeven op de vraagstelling: Hoeveel moet de balk uitkragen om dit opwip-effect (tegen de zwaartekracht in! Dat komt niet veel voor!) optimaal te benutten?



De vraag die opkomt is: hoe groot moeten we die uitkraging maken om "balans" te maken tussen de opbuiging ten gevolge van de q-belasting (gelijkmatig verdeelde belasting) op de uitkraging en de doorbuiging ten gevolge van de q-belasting op het veld tussen de twee steunpunten. Met balans bedoelen we dat de balk zowel in het midden van de overspanning (het veld noemen we dit ook wel eens) als bij de steunpunten evenveel belast wordt; de buigspanningen in het materiaal zijn daar gelijk. De balk wordt dus het meest economisch benut.



Bij welke $a.l$ zijn de twee momenten M ; de ene bij het steunpunt; de andere in het veld gelijk?

① $M = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (a.l)^2$
 $M = \frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot q \cdot l^2 \dots \dots \text{formule } ①$

inklemming! M
 model voor uitkragende deel van de balk

② $M = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 - (\frac{1}{2} M)$
 $M = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 - \frac{1}{2} \cdot (\frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot q \cdot l^2)$
 $M = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 - \frac{1}{4} \cdot a^2 \cdot q \cdot l^2 \dots \dots \text{formule } ②$

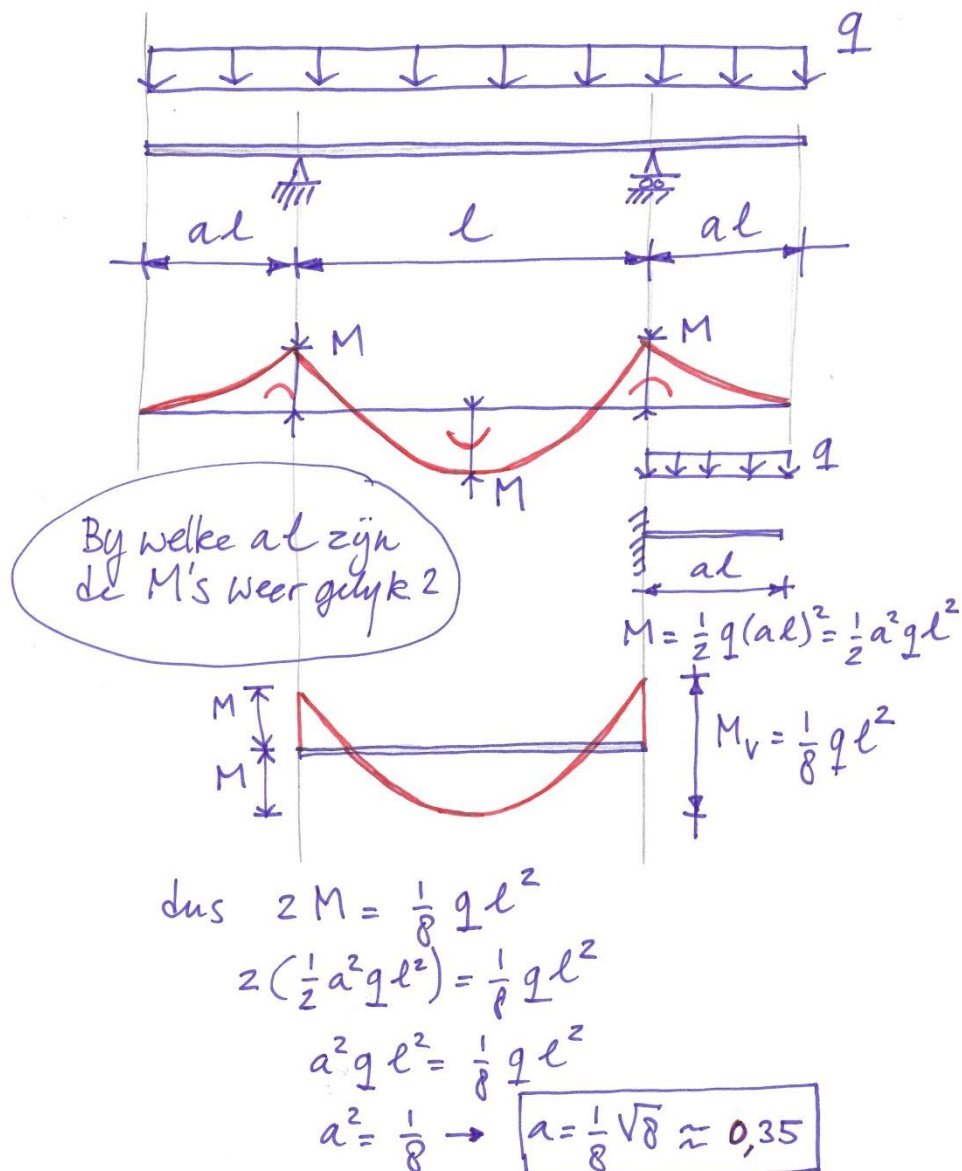
model voor velddeel van de balk
 $M_v = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2$
 formule midden

① = ② dus $\frac{1}{2} \cdot a^2 \cdot q \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 - \frac{1}{4} \cdot a^2 \cdot q \cdot l^2$
 $\frac{3}{4} \cdot a^2 \cdot q \cdot l^2 = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2$
 $\frac{3}{4} \cdot a^2 = \frac{1}{8} \Rightarrow a = \frac{1}{6} \sqrt{6} \approx 0,41$

in het midden geldt
 formule ① invullen

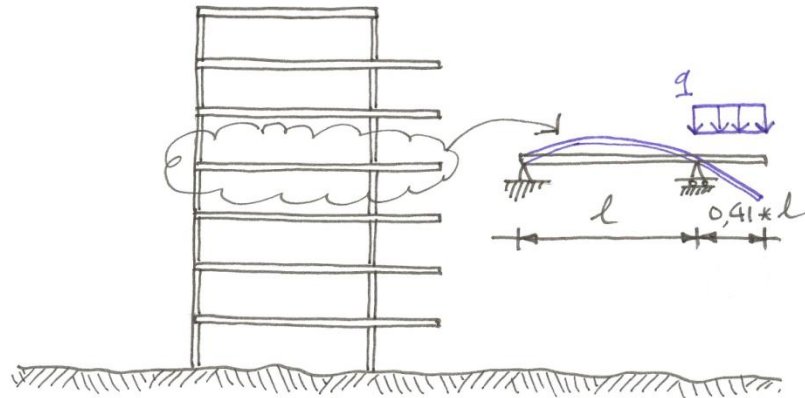
Je ziet dat bij een uitkragend deel groot circa 0,41 x de lengte tussen de steunpunten (= L) de balk optimaal profiteert van de uitkraging. Dit is een belangrijke les want dat betekent dat ik een balk zonder hem te hoeven te versterken straffeloos 0,41 x L kan laten uitkragen! Dientengevolge is een uitkraging maken gunstig voor de balk en ook een voorbeeld van Duurzaam Bouwen: meer doen met minder materiaal.

Nu we dit weten voor de enkelzijdig uitkragende balk kunnen we dezelfde vraag stellen voor een balk die aan twee zijden uitkraagt: een dubbelzijdige uitkraging. Bij welke lengte uitkraging wordt deze balkvorm optimaal benut?

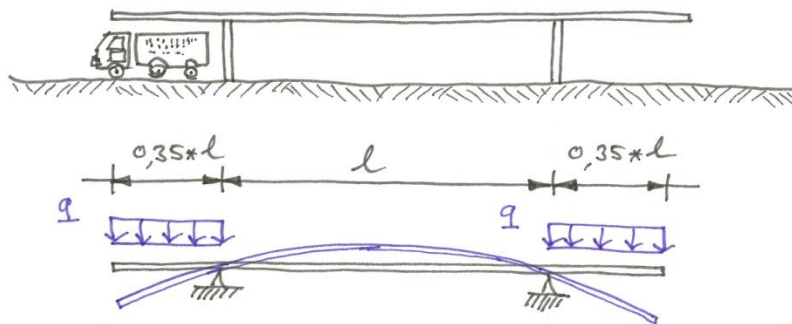


Bij een uitkraging aan twee zijden blijkt een uitstekende deel balk dus over 0,35 x (de overspanning van de hal) de meest economische keuze te zijn.

Het concept van de uitkragende balk biedt legio mogelijkheden om de constructie economischer in te zetten. Hieronder een paar concrete voorbeelden.

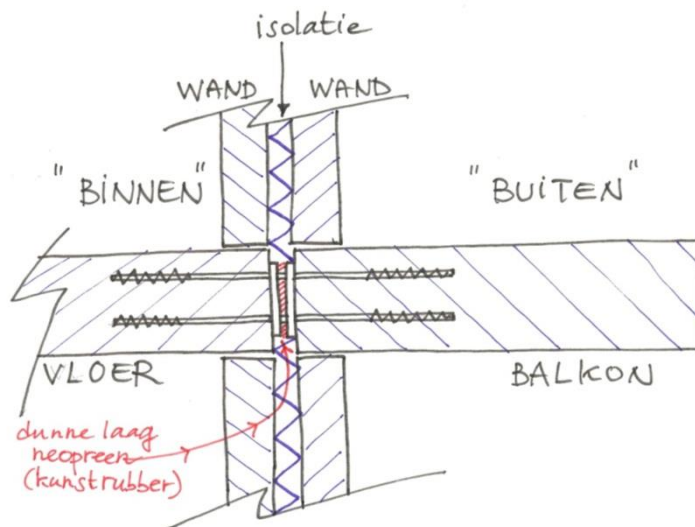


GEBOUWEN MET BALKONS



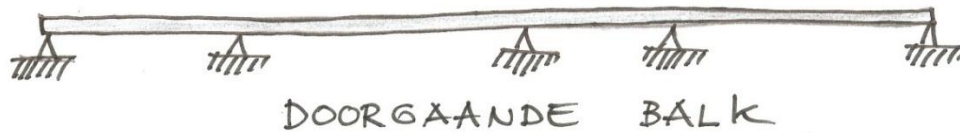
HAL MET LUIFELS

Let wel altijd op het mogelijk optreden van een koude brug, in het Engels beter uitgedrukt als 'thermal bridge'; het gaat tenslotte om energieverlies beperking. Een doorgaande balk is te knippen in een warm en koud deel door terplekke van de overgang een (stevige) boutverbinding te maken. Dit principe detail wordt hieronder ook afgebeeld. In principe steken alleen de bouten door van binnen naar buiten maar dit is zo weinig oppervlak dat het acceptabel is. In het hieronder getekende voorbeeld van een uitkragend balkon steken alleen de bouten van de verbinding tussen de warme binnenruimte en de koude buitenruimte heen: een verwaarloosbaar energieverlies en (bijna) geen kans op condensatie binnen op de koude bouten.

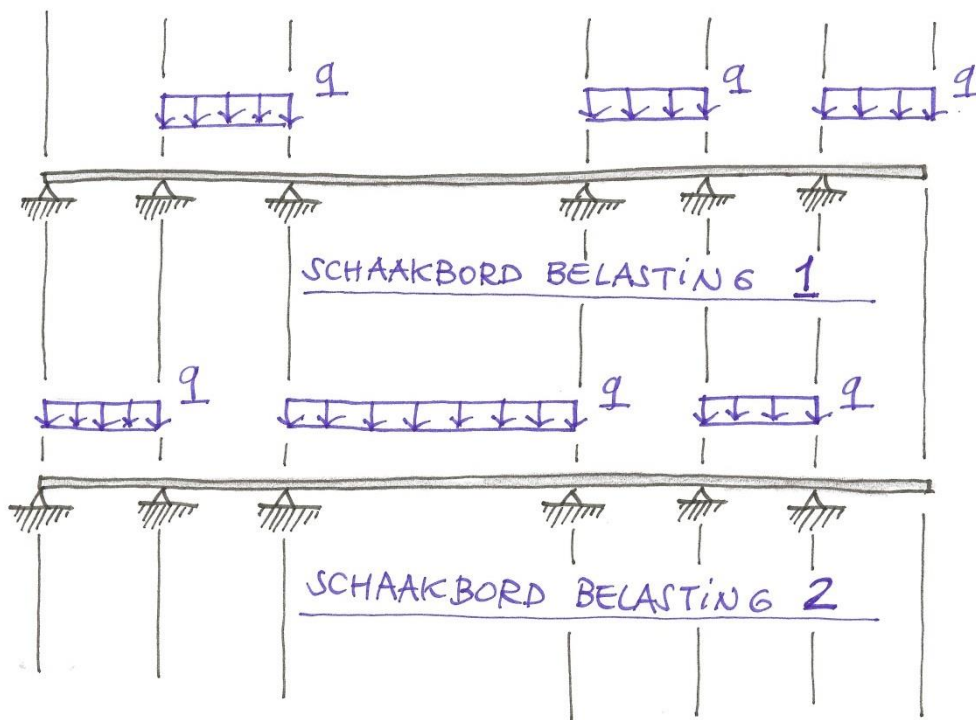


10.5 Doorgaande balken

Tot nu toe hebben we ons gericht op balken die op twee steunpunten opgelegd lagen. Natuurlijk kunnen lange balken over meerdere steunpunten doorlopen. Ook kunnen we stukken balk met verbindingen aan elkaar koppelen tot één grote balk.



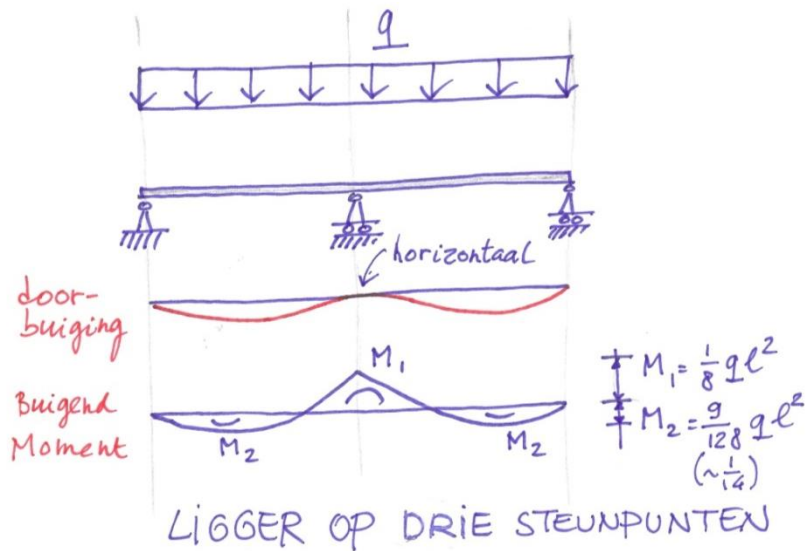
Het berekenen van de balken wordt wel een stuk ingewikkelder, ook de te rekenen belasting op de doorgaande balken is ingewikkelder, zo kan er op het ene balk deel wel variabele belasting staan en op het andere niet. Eigenlijk heb je de computer nodig om de buigende momenten (dus spanningen in het materiaal) en de vervormingen voor alle belasting gevallen netjes uit te rekenen.



Doorgaande balk met schaakbord belasting.

We beginnen met de ligger op drie steunpunten. Opvallend is dat het grootste moment precies boven het middelste steunpunt zit en het aardige is dat het net zo groot is als het veldmoment van een ligger op twee steunpunten; $1/8 \times q \times l^2$. Alleen is dit een opbuigend (negatief) moment waardoor er trek aan de bovenzijde zit en druk aan de onderzijde van de balk ontstaat. Compleet tegengesteld aan de enkel veld ligger!. Het veld moment van de ligger op drie steunpunten is minder dan het veld moment van de ligger op twee steunpunten.

Hieronder een afbeelding van de ligger op drie steunpunten en alle maatgevende momenten.

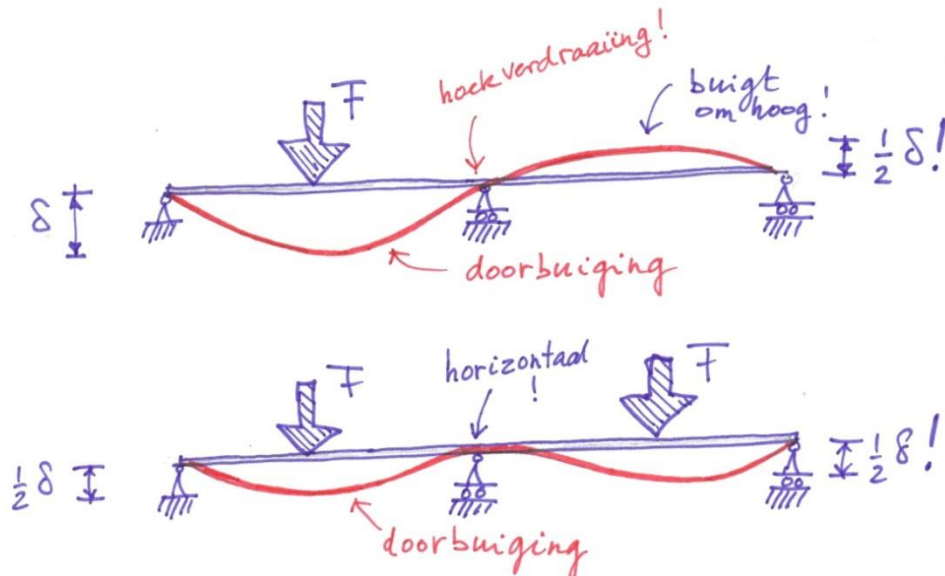


Naaste de momenten, waarmee de optredende spanningsniveaus in het balk materiaal berekend kunnen worden, de controle op Sterkte, kan ook de Stijfheid van de ligger maatgevend zijn. Hiervoor is de doorbuiging bepalend. Vergeleken met de doorbuiging van een één veld ligger (= 100%) buigt het veld van een ligger op drie steunpunten minder door (circa 60%).

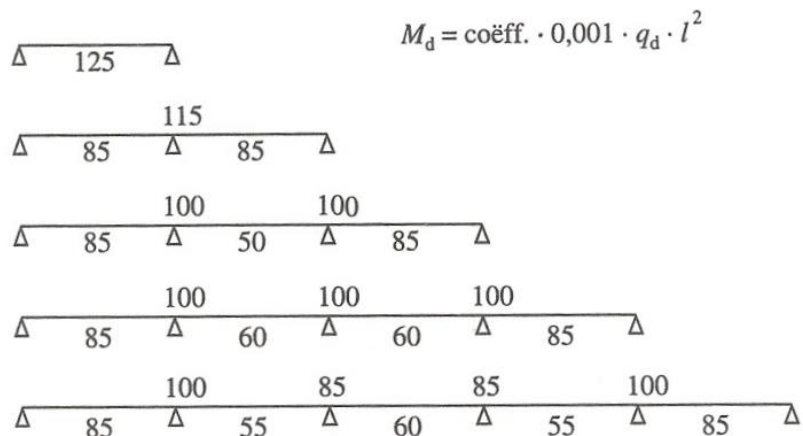
Conclusie is dat een ligger op drie steunpunten zich veel stijver gedraagt dan twee één veld liggers met de zelfde overspanning.

In het figuur hieronder wordt dat aangeven door de invloed van een puntlast op een ligger op drie steunpunten te laten zien. Conclusies zijn:

- Puntlast op één veld leidt tot de helft van de doorbuiging in het ernaast gelegen (onbelaste) veld. Maar omhoog gericht! Dat het de helft is, is te begrijpen als we beseffen dat twee liggers weerstand tegen vervorming bieden.
- Bij een puntlast in beide velden is de doorbuiging daardoor ook tot de helft gereduceerd. Een ligger over drie steunpunten buigt dus minder door bij volbelasting!
- Bij een puntlast in beide velden loopt de doorlopende ligger boven het middelste steunpunt horizontaal: het lijkt dus op een inklemming!



We laten nu het aantal steunpunten onbeperkt aangroeien. Hieronder een tabel waarin aangegeven wordt (berekend met computermodellen waarbij de invloed van een schaakbordbelasting is meegenomen) hoe groot op de diverse posities de maatgevende buigende momenten (en dus de spanningen in het materiaal) zijn.



- voor de maatgevende steunpuntsmomenten moet voor $q_d \cdot l^2$ de grootste van de beide aangrenzende velden worden genomen
- voor het maatgevende veldmoment geldt $q_d \cdot l^2$ van het beschouwde veld

Coëfficiënten balken over meerdere steunpunten.

Uit deze tabel kunnen we een paar interessante conclusies trekken:

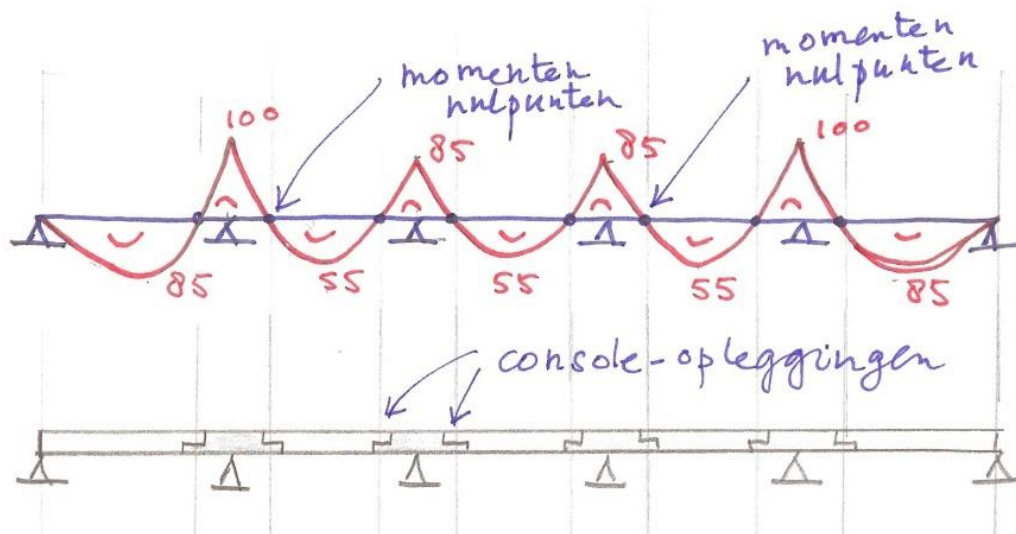
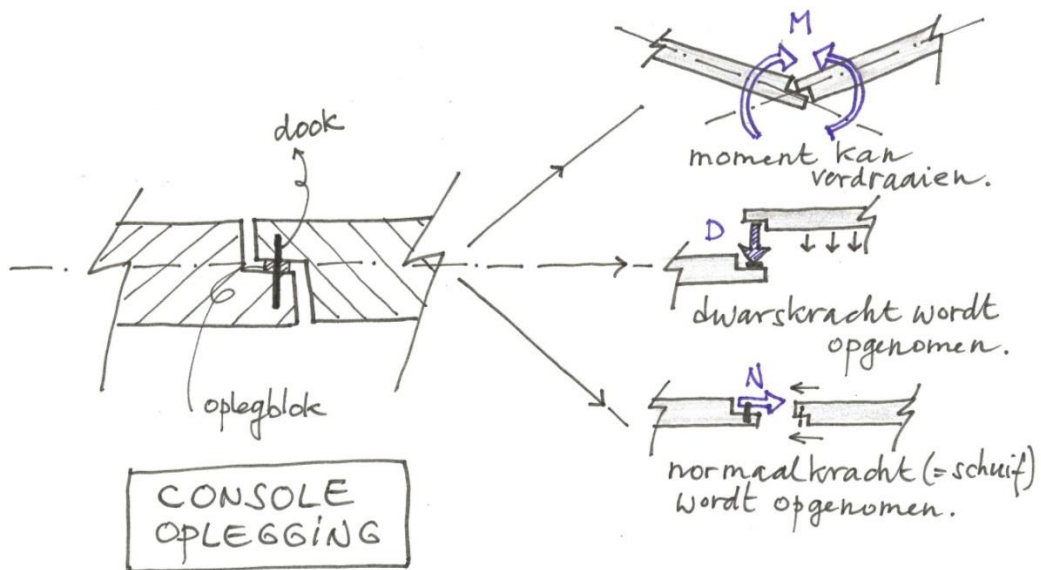
1. De grootste momenten (en dus de grootste spanningen) zitten boven de steunpunten. Trek in het materiaal van de balk zit dus aan de bovenkant van de balk! Precies tegenovergesteld aan het buigende moment in het veld van de ligger.
2. Het 'rand'-veld wordt altijd het meest belast, vergelijk coëfficiënt 85 tegen 55 tot 60 bij de 'binnen'-velden.
3. Bij doorlopende liggers moeten de 'rand'-velden altijd grotere / sterkere balken zijn dan de 'binnen'-velden.

Blijven we met één probleem zitten: waar koop ik een balk van bijvoorbeeld 40 meter lang? Bij staal is dat door aaneen lassen van stukken balk nog voorstelbaar en bij ter plaatse gestort beton natuurlijk ook maar bij prefab beton (denk aan vervoer naar de bouwplaats!) en bij hout niet.

Bij naaldhout gaan de ligger maten tot maximaal 10 meter; bij tropisch hardhout is 20 meter nog een optie maar dit zijn zeer grote (en dure) balken! Aardig om te vermelden is dat bij gelamineerd hout (balken samengesteld uit houten latten op elkaar en aan elkaar gelijmd) 25 tot 30 meter haalbaar is.

We zullen dus een technische truc moeten verzinnen om uit korte stukken balk een (in technische zin) doorlopende balk te vervaardigen.

Die truc is de console-oplegging. De zo ontstane balk noemen we een Gerber ligger, naar de 19^{de}-eeuwse Duitse ingenieur Gerber, die deze liggervorm voor het eerst toepaste.



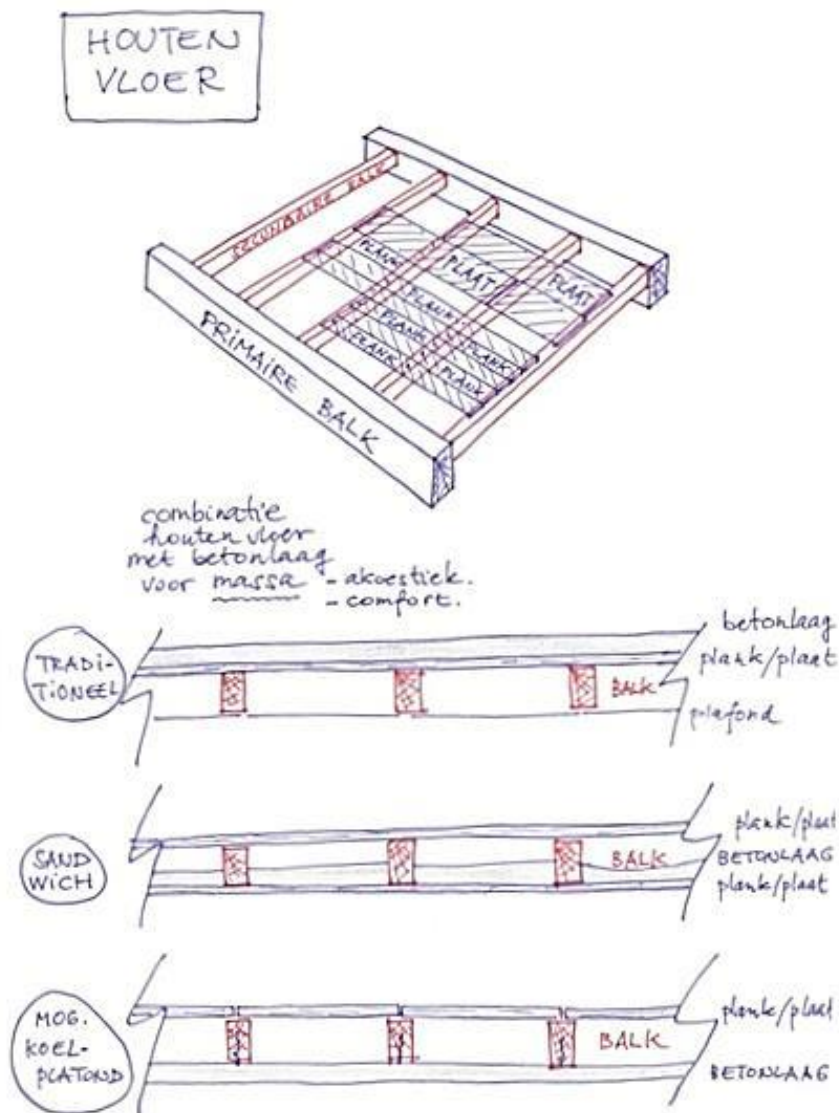
Principe (doorgaande) Gerber ligger.

De momentenlijnen in de figuur zijn getekend op basis van de coëfficiënten uit de tabel hiervoor. In de momenten nulpunten kun je straffeloos de balken 'doormidden zagen'. Op die plekken hoeft alleen dwarskracht (en soms normaalkracht, bijvoorbeeld ten gevolge van het remmen van voertuigen op de brug) overgebracht te worden. De console kan dit, bij een goed gedetailleerde uitvoering goed aan. Zodoende zijn we in staat uit allemaal losse balken toch een (constructief gezien) doorgaande ligger te maken. Met alle voordelen van minder doorbuiging en minder grote buigende momenten ten opzichte van een aaneenschakeling van één-veldsliggers.

11 Vloeren

11.1 Houten vloeren

Houten vloeren zijn de goedkoopste vloeren die wij kennen. Toch wordt in de woningbouw tegenwoordig bijna geen houten vloer meer gemaakt. De reden hiervoor is dat door de geringe massa (gewicht) van de vloer de geluidsisolatie tussen de twee boven elkaar gelegen vertrekken gering is. De bewoners van vooroorlogse woongebouwen kunnen dit nog steeds aan de lijve ondervinden. Voor afdoende geluidsisolatie hebben je massa nodig en ook kieren en openingen zijn niet welkom. Daarom worden vloeren in woningen tegenwoordig uit beton vervaardigd, lekker zwaar en geen kieren of andere openingen. Het huidige Bouwbesluit (de normen die de Overheid aan de Bouw stelt) zegt zelfs dat er 600 kg/m^2 vloer of scheidingswand aanwezig moet zijn, dat betekent een 250 mm dikke betonvloer. Met hout zou je dat nooit halen. Daarvoor zijn er wel weer wat bouwfysische trucjes te bedenken zoals een zwevende dekvloer of een laagje beton op de houten vloer, akoestisch gescheiden (=compleet los van elkaar), maar dat valt buiten het kader van Constructies.



Een houten vloer wordt dus voor secundaire ruimtes gebruikt waar geen geluidseisen aan gesteld worden zoals een schuur, een garage, een bijkeuken of gewoon het dak. Een houten vloer stellen we samen uit twee componenten. Ten eerste de balken, die de rustende en veranderlijke belasting dragen en ten tweede de vloer zelf: houten planken of multiplex platen die op, of tussen de balken bevestigd worden. De balkrichting noemen we de primaire richting de planken- of plaatrichting de secundaire overspanning. De afstand tussen de primaire balken noemen we de hart- op- hart afstand. Deze is meestal gelijk aan de secundaire overspanning. In de loop der eeuwen is uitgevonden dat voor planken van een dergelijke 20-25 mm dikte de ideale overspanning en dus de hart- op- hart afstand van de balken zo'n 600 mm is. We leggen de houten balken van een houten vloer in de richting van de kortste overspanning. Dan zijn de buigende momenten het kleinst en kunnen we een lichtere en goedkopere balk toepassen.

Besef dat het buigende moment (en de daardoor opgeroepen spanning in het materiaal) met het kwadraat van de overspanning oploopt (éénveldsligger: $M=1/8 \times q \times l^2$). Een twee keer zo grote overspanning roept dus een vier zo groot buigend moment op. Dat betekent weer dat de balk twee keer zo hoog moet zijn ($W=1/6 \times b \times h^2$).

Onderstaande tabellen uit een Polytechnisch Zakboekje van 25 jaar geleden geven een beeld van wat er voor een bepaald type houten voer gekozen moet worden. Kijk daar eens aandachtig naar. Het geeft je op een bijzondere manier veel informatie hoe een houten vloer gemaakt moet worden. Voor houten balken variërend in grootte van 44×125 mm ($b \times h$) tot 75×225 mm, deze lijst is de zogenaamde gangbare / leverbare handelsmaten van houten balken. Ook wordt het toelaatbare draagvermogen gegeven. Zo kun je het verschil tussen een verdiepingsvloer, met mensen en meubilair erop, en een dakvloer, incidenteel beloopbaar en sneeuw, zien in de grootte / zwaarte van de balken. Daarnaast zie dat door een keuze voor een bepaalde overspanning je een maximaal toelaatbare balkafstand (hart-op-hart afstand van de balken) krijgt opgegeven. Belangrijkste les is eigenlijk dat meer dan 6 meter overspanning voor een houten vloer onmogelijk is.

*Tabel 2.18 Maximale balkafstand (a_{max}) van balklagen voor platte daken
Ongeschaafd Europees naaldhout, kwaliteit standaardbouwhout, vochtgehalte maximaal 24%.
Dakbeschot van Europees naaldhout dik 20 mm waarop mastiek en grind [mm].*

| | <i>b</i> | <i>h</i> | 2700 | 3000 | 3300 | 3600 | 3900 | 4200 | 4500 | 4800 | 5100 | 5400 | 5700 | 6000 |
|----------|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>a</i> | 44 | 125 | 307 | | | | | | | | | | | |
| <i>a</i> | 44 | 150 | 517 | 432 | 340 | | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 50 | 140 | 510 | 413 | 314 | | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 50 | 150 | 611 | 508 | 386 | 301 | | | | | | | | |
| <i>a</i> | 50 | 175 | 893 | 758 | 614 | 478 | 379 | 306 | | | | | | |
| <i>a</i> | 50 | 200 | 1020 | 1020 | 897 | 713 | 566 | 457 | 374 | 310 | | | | |
| <i>A</i> | 63 | 150 | 814 | 640 | 487 | 379 | 301 | | | | | | | |
| <i>A</i> | 63 | 160 | 950 | 777 | 591 | 460 | 365 | | | | | | | |
| <i>A</i> | 63 | 175 | 1020 | 997 | 773 | 602 | 478 | 386 | 316 | | | | | |
| <i>a</i> | 63 | 200 | 1020 | 1020 | 1020 | 899 | 714 | 576 | 471 | 391 | 327 | | | |
| <i>A</i> | 75 | 150 | 1001 | 762 | 580 | 451 | 358 | | | | | | | |
| <i>A</i> | 75 | 175 | 1020 | 1020 | 921 | 817 | 569 | 459 | 376 | 311 | | | | |
| <i>A</i> | 75 | 200 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 850 | 686 | 561 | 465 | 390 | 330 | | |
| <i>A</i> | 75 | 225 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 976 | 799 | 662 | 555 | 470 | 401 | 345 |
| <i>a</i> | 75 | 250 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 909 | 762 | 645 | 550 | 474 |
| <i>a</i> | 75 | 275 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 | 1014 | 858 | 733 | 631 |

Hout in de met *A* en *a* aangegeven maten wordt uit het buitenland aangevoerd. De met een hoofdletter aangeduide maten zijn het gemakkelijkst uit voorraad leverbaar.

l = dagmaat (= overspanning - 150 mm)

Tabel 2.17 Maximale balkafstand (a_{\max}) van balklagen voor verdiepingvloeren van woonhuizen Ongeschaafd Europees naaldhout, kwaliteit standaardbouwhout, vochtgehalte maximaal 24%. Beplanking van vloerhout klasse I dik 20 mm [mm].

| | <i>b</i> | <i>h</i> | 2700 | 3000 | 3300 | 3600 | 3900 | 4200 | 4500 | 4800 | 5100 | 5400 | 5700 | 6000 |
|----------|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>a</i> | 44 | 125 | | | | | | | | | | | | |
| <i>a</i> | 44 | 150 | 419 | 345 | | | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 50 | 140 | 414 | 319 | | | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 50 | 150 | 492 | 392 | | | | | | | | | | |
| <i>a</i> | 50 | 175 | 711 | 611 | 474 | 369 | | | | | | | | |
| <i>a</i> | 50 | 200 | 730 | 730 | 708 | 551 | 437 | 353 | | | | | | |
| <i>A</i> | 63 | 150 | 649 | 494 | 376 | | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 63 | 160 | 730 | 600 | 457 | 355 | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 63 | 175 | 730 | 730 | 597 | 465 | 369 | | | | | | | |
| <i>a</i> | 63 | 200 | 730 | 730 | 730 | 695 | 551 | 445 | 364 | 302 | | | | |
| <i>A</i> | 75 | 150 | 730 | 588 | 448 | 349 | | | | | | | | |
| <i>A</i> | 75 | 175 | 730 | 730 | 711 | 554 | 440 | 355 | | | | | | |
| <i>A</i> | 75 | 200 | 730 | 730 | 730 | 730 | 656 | 530 | 434 | 359 | 301 | | | |
| <i>A</i> | 75 | 225 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 617 | 512 | 429 | 363 | 310 | |
| <i>a</i> | 75 | 250 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 702 | 588 | 498 | 425 | 366 |
| <i>a</i> | 75 | 275 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 730 | 663 | 566 | 487 |

Hout in de met *A* en *a* aangegeven maten wordt uit het buitenland aangevoerd. De met een hoofdletter aangeduide maten zijn het gemakkelijkst uit voorraad leverbaar.

l = dagmaat (= overspanning - 150 mm)

11.2 Betonnen vloeren

In deze paragraaf worden betonnen vloersystemen besproken. Er zijn twee hoofdtypen; ter plaatse gestorte vloeren (ook wel in situ vloeren genoemd) en prefab vloersystemen. Het eerste type wordt in zijn geheel op de bouwplaats vervaardigd. Het tweede type vloer, de prefab vloer, wordt in de werkplaats (de fabriek) vervaardigd, naar de bouwplaats getransporteerd en op de bouw in elkaar gezet.

Beide systemen hebben voor- en nadelen en het hangt van de situatie af welk systeem voor een bepaald gebouw het meest geschikt is. Laten we ze in meer detail bespreken.

Ter plaatse gestorte vloeren zijn arbeidsintensief: eerst een bekisting en een bijbehorende ondersteuning maken (nodig zolang het beton nog niet verhard is), vervolgens wapening vlechten, dan beton in de bekisting storten en na afdoende verharding van het beton, meestal 3 à 4 dagen de bekisting verwijderen waarna op de nieuwe vloer het werk aan de rest van de betonconstructie kan beginnen.

Bij prefab komen de onderdelen, al afdoende sterk op de bouw binnen, kunnen meteen vanaf de vrachtauto op hun plaatst gemonteerd worden en direct weer belast worden bij de bouw van de rest van het gebouw. Als je denkt dat prefab bouwen dus veel sneller zal gaan dan heb je gelijk voor wat betreft de tijd op de bouwplaats zelf maar vergeet nooit dat de voorbereidingstijd bij prefab (reken, teken en productietijd) voor het gehele proces ook mee genomen moet worden. En dan is het verschil veel minder maar prefab is meestal toch iets, niet veel, sneller.

Voorals qua sterkte en uiterlijk kunnen de verschillen tussen ter plaatse gestort beton en prefab beton groot zijn. Door het werken in de werkplaats onder gecontroleerde omstandigheden met goede apparaten is de betonkwaliteit van prefab beton, zowel op sterkte als uiterlijk, duidelijk beter. Ter plaatse gestort heeft echter veel minder voegen, naden en aansluitingen die op zich al lelijk eruit kunnen zien maar ook aanleiding kunnen geven tot lekkages. Wat dat betreft is ter plaatse gestort beton weer beter. Compleet geprefabriceerde vloeren bestaan vrijwel niet; altijd wordt er wel een laagje (50 tot 100 mm dik) beton (meestal met wapening tegen scheuren) over de gehele vloer uit gegoten. Dit kan een laagje beton zijn met een constructieve functie: alles aan

elkaar vastkoppelen om de (horizontale) windkrachten door te geven van de gevel naar de stabiliteitselementen. Dat laagje beton noemen we een druklaag. Deze laag kan ook een afvlakkende (om alle hoogteverschillen tussen de prefab elementen te compenseren) of een waterdichtende functie hebben (naden, voegen en kleine openingen dichten). Dan noemen we het ook wel een afwerklaag. Een ander belangrijk constructief voordeel van een druklaag is dat, als één kanaalplaat door een grote puntlast belast wordt en daardoor gaat doorbuigen, de druklaag ervoor zorgt dat de buurkanaalplaten mee moeten gaan en de puntlast niet door één kanaalplaat gedragen wordt maar door minimaal drie!

a. Balkenvloer

Een van de eerste vloersystemen in ter plaatse gestort beton was de balkenvloer. Voor het eerst op goede wijze (dus met wapening op de juiste plek) toegepast in Frankrijk door ingenieur Hennebique rond 1900. Beton is dus een vrij modern bouw materiaal! Eigenlijk werd een houten vloersysteem nagebouwd in beton, relatief zware balken en dunne vloerplaten daartussen in. Zo is men lang blijven bouwen in beton. Kolommen en balken van forse maten en dunne vloerplaten, 80 tot 100 mm daartussen. Het zal duidelijk zijn dat een vloer met balken moeilijk en tijdrovend bekistingwerk betekent.

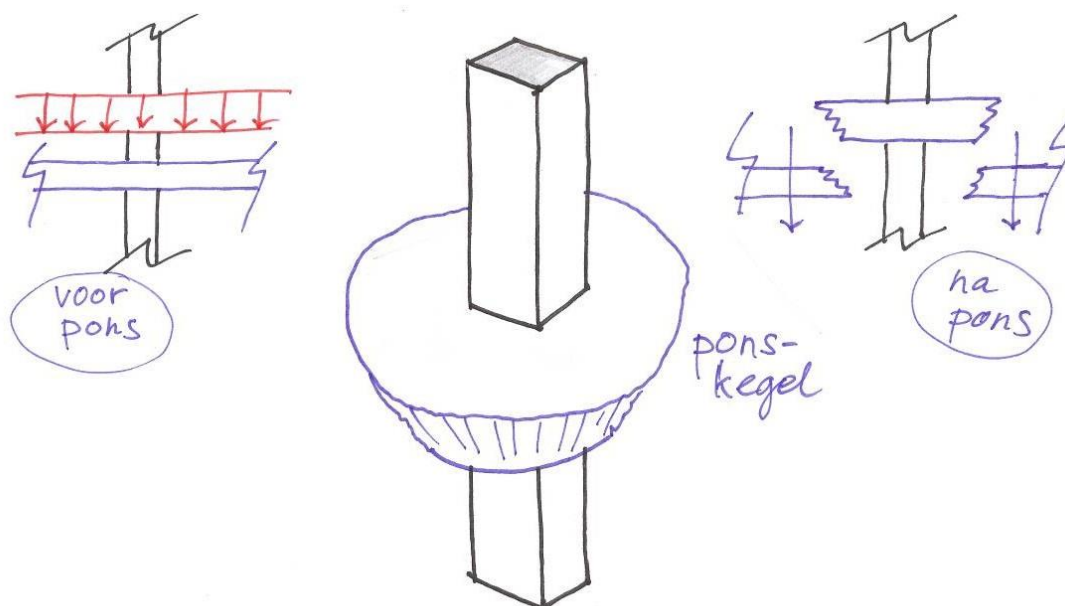


Veem Koningin Emma, Amsterdam, 1914; een klassiek balkenpatroon met dunne vloerplaten ertussen. Let ook op de leuke verzwaring van de balk vlak bij de kolom, de zogenoemde vouten; hierdoor ontstaat een sterkere inklemmingsmogelijkheid!

Vroeger met lage lonen voor de arbeiders was dat niet zo'n probleem; de besparing aan materiaal, beton en wapening woog veel zwaarder. Maar toen in de jaren 60-70 van de vorige eeuw de lonen aanzienlijk hoger werden, begonnen sommige aannemers dit te heroverwegen. Zou het niet veel simpeler zijn een vlakke vloer te maken met een duidelijk eenvoudigere bekisting maar wel met meer beton, maar ook met een veel eenvoudigere wapening? Inderdaad dus en zo werd de vlakke plaatvloer ontwikkeld.

b. Vlakke plaatvloer

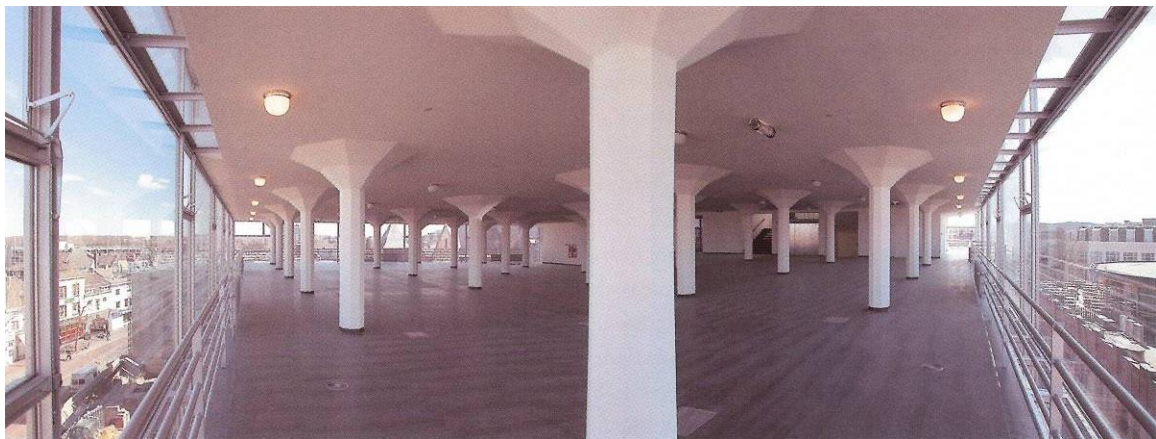
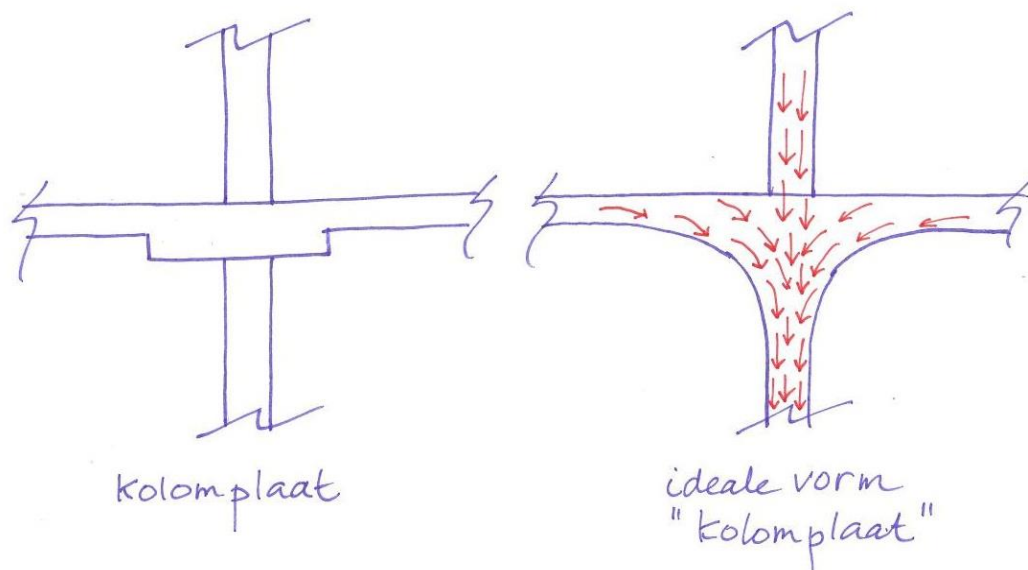
Een vlakke plaat dus zonder er onder uitstekende balken. Ook voor de installaties; leidingen, kabels en kanalen die meestal onder de vloer lopen is het een uitkomst dat zij niet meer door de balken heen hoeven. Dat laatste is ook voor de constructeur gemakkelijk want een balk of wand met grote gaten erin is constructief gezien een grote verslechtering. Nadeel van de vlakke plaatvloer is dat hij vrij dik moet zijn, vooral om stijf genoeg te zijn; niet teveel doorbuigen. Want het verlies aan stijfheid van een betonnen vloer ten gevolge van *scheuren* (afname oppervlakte traagheidsmoment I) en *kruip* en *krimp* (afname elasticiteitsmodulus E) kan aanzienlijk zijn.



Ook bestaat er bij een vlakke vloer gevaar voor Pons. Bij dit bezwijkmechanisme breekt de vloer als het ware los van de kolom en schuift langs de kolom naar beneden. Dit mechanisme wordt veroorzaakt doordat de dwarskracht (afschuiving) niet meer in het beton kan worden opgenomen en manifesteert zich door het beeld van de ponskegel rondom de kolom. Met beugels en opgebogen wapeningstaven kan dit fenomeen vermeden worden maar het vereist veel staal/ wapening. Wat weer de terechte vraag oproept kan het beton bij het storten tijdens de uitvoering op de bouwplaats wel door en om al die dikke staven heen vloeien?

Ook is er de aantekening dat bij een kolom die op een vloerrand staat de afschuiving nog kritischer wordt. Er is immers maar een halve cirkel materiaal beschikbaar voor de ponskegel. Laat staan de hoekkolom; daar is maar een kwart cirkel beschikbaar. Gelukkig is het vloerveld dat op de kolom draagt ook navenant kleiner maar dat maakt niet dat het totaal gunstiger wordt, integendeel rand- en hoekkolommen zijn altijd kritisch voor ponsgevaar.

Een mogelijke oplossing voor het ponsgevaar zou zijn de vloer dikker te maken maar aangezien pons lokaal, de zone rond de kolom, op kan treden. Beter zou het zijn ook de vloer lokaal dikker te maken, waarmee de kolomplaat is uitgevonden. Het allermooiste is als de kolomplaat de vorm van de (vergrote) ponskegel zou kunnen aannemen. Dan zien we als het ware hoe de verticale afschuifkrachten in de vloer langzaam wegvloeien in de kolom. Al voor 1910 verschenen de paddenstoelvloeren, waarbij deze vorm werd toegepast.



Paddenstoelvloer in het Glaspaleis in Heerlen: (bijna) de ideale constructieve kolomvorm onder een vlakke plaatvloer. Gerenoveerd gebouw uit de jaren dertig van architect Peutz.

c. Bollenvloer en Airdeck-vloer

Een groot nadeel dat grote eigen gewicht van beton, althans constructief gezien, want voor geluidsisolatie tussen twee ruimten is het juist een voordeel. Ongewapend beton weegt 2300 kg/m^3 , gewapend beton zelfs 2400 kg/m^3 . Een vloer van 250 mm dik, de min of meer standaard dikte in onze gebouwen weegt 600 kg/m^2 (6 kN/m^2). Als je beseft dat de variabele belasting in kantoren $2,5 \text{ kN/m}^2$ is dan is dat dode gewicht, zoals het in Engelstalige landen zo mooi heet (dead load), 250% van de nuttige (gebruiks)belasting. Zonde natuurlijk want nu moet een groot deel van het draagvermogen van de betonvloer gebruikt worden om zijn eigen gewicht te dragen! Bijkomend vervelend verschijnsel is dat het beton zelf weinig trekspanning kan opnemen. Bij 3 a 4 N/mm^2 trek scheurt (gewoon) beton. Dat betekent dat in een vloer op buiging belast de hele trekzone van de doorsnede gescheurd is en dat de wapening daar zijn nuttige bijdrage levert door de trekspanningen op te nemen. Maar dat betekent ook dat een aanzienlijk deel van de betonnen vloer gescheurd is (en dus geen bijdrage meer kan leveren aan het draagvermogen) maar wel als dood gewicht blijft

hangen! Zeker in het midden van de overspanning waar de buiging het grootst is, is dit dode gewicht zeer onwelkom.
Wat kunnen we hier aan doen? De eerste suggestie zou zijn: "laat dat gescheurde beton maar weg", maar dat is uitvoeringstechnisch zeer moeilijk. Vragen zoals "waar zit dat gescheurde beton nu precies en hoe maak ik de bekisting" zijn niet makkelijk te beantwoorden.



Het Educatorium in Utrecht

Toch is het een keer gedaan. Bij het Educatorium in Utrecht vroeg de architect OMA, Rem Koolhaas een collegezaal een betonnen dak te geven dat om allerlei architectonische redenen slechts 200 mm dik mocht zijn. Voor een overspanning van 20 meter heb je een betonnen vloer, type vlakke plaatvloer nodig van zo'n 600 mm dikte. De 200 mm dikte uitdaging is hier opgelost door de wapening uit de vloer te laten komen en het gescheurde beton als het ware weg te laten. Dat leverde ook mooie beelden op van de verankering van de dikke staven in het beton en de roestige wapeningsstaven die uit het beton tevoorschijn komen.



Verankering van trekkracht in beton (links) en de mysterieuze wapeningsstaaf die uit het beton komt (rechts).

De tweede oplossing van ons dood gewicht probleem wordt gegeven door de bollenvloer (Bubble-deck) en de Airdeck-vloer. Bij deze vloersystemen wordt het beton in de vloer vervangen door bollen polystyreen of blokken gerecycled polypropyleen. Deze bollen of blokken worden ingestort zodat je ze niet meer ziet maar wel zo dat de onder en bovenwapening van de vloer door kan lopen. Punt van aandacht is dat door de ingestorte ruimtes de dwarskrachtcapaciteit (zoals bij het ponsprobleem rond de kolommen) achteruit gaat. Daarom mogen de bollen of de blokken niet bij opleggingen zoals wanden en kolommen toegepast worden maar moet de volle doorsnede beton zijn om weerstand tegen dwarskracht of pons te kunnen leveren.



Een bollenvloerplaat (Bubble-deck) met ook de bovenwapening erop, arriveert op de bouwplaats.

| | Airdeck vloer |
|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Standaardbreedte | 3000 mm (werkend) |
| Lengte | min. 820 mm; max. 9000 mm |
| Plaatdikte | 60-65-70-75 mm |
| Gewicht | 150-162-175-187 kg/m ² |
| Totaal dikte incl. druklaag | 280-340-390-450 mm |
| Gewicht incl. druklaag | 520-605-675-770 mm |
| Dikte beton boven airbox | 50 mm |
| Benodigde hoeveelheid beton druklaag | 159-195-226-264 l/m ² |
| Sterkte klasse beton | C30/37 |
| Sterkte klasse beton druklaag | min. C25/30 |
| Staalkwaliteit | FeB 500 |
| Tralieliggers | 5 rijen per standaardbreedte |
| Materiaal airboxen | gerecycled polypropyleen |
| Afmetingen airboxen | 210x210x180-240-290-350 mm |
| H.o.h. afstand airboxen | 300 mm |

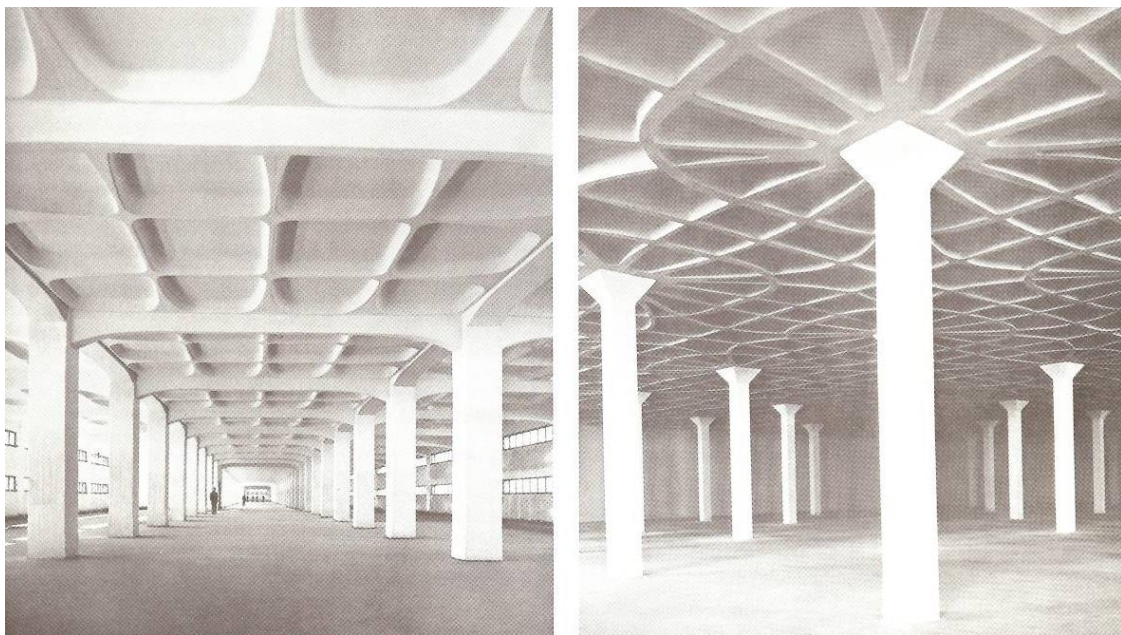


Airdeck vloer in plaats van bollen dozen op de geprefabriceerde vloerplaat geplakt.

d. Cassettevloer

Ook de cassettevloer is een antwoord op het streven naar minder dood betongewicht. Bij deze eveneens ter plaatse gestorte vloer worden er cassettes (kistjes zonder bodem) op de bekisting gezet. De cassettes worden iets uit elkaar geschoven zodat er ruimte tussen de cassettes ontstaat. Vervolgens wordt er een laag beton over de cassettes gegoten en laat men het beton verharderen. Als het beton afdoende sterk geworden is om te kunnen dragen wordt de bekisting (met de cassettes) weg gehaald en blijft een betonvloer met in twee richtingen ribben aan de onderkant over. Eigenlijk is een cassettevloer een balkenvloer. Het lichte eigen gewicht is een groot voordeel van een cassettevloer. Toch worden ze tegenwoordig niet vaak gemaakt omdat het bekisting- en wapeningswerk van een cassettevloer duur is.

Technisch blijft het een mooi vloersysteem. zeker als je zoals de Italiaanse architect/ingenieur Pier Luigi Nervi de balken de spanningslijnen in de vloer laat volgen.



De balkenpatronen van Pier Luigi Nervi, die het spanningsverloop in de vloer volgen.



Een flatgebouw in aanbouw, ter plaatse gestorte balken en kolommen met een cassettevloer tussen de balken.

e. Breedplaatvloer

Zoals hiervoor vermeld, zijn ter plaatse gestorte betonvloeren arbeidsintensief en tijdrovend. De aannemers zijn dus altijd op zoek naar goedkopere en snellere uitvoeringsmethoden. Vooral prefab biedt hier goede mogelijkheden voor. Een succesvolle methode is de breedplaatvloer, een mix van een gestorte en een geprefabriceerde betonvloer.

| Element | | Voorzieningen | |
|---------------------|--|-----------------------|--|
| standaard breedte | 3000 mm | EPS sparingen | rechthoekig |
| breedte pasplaat | max. 2800 mm | cellenbeton sparingen | rechthoekig |
| max. plaatlengte | 10,0 m | centraaldozen | aansluitopeningen voor ø16 of 19 mm |
| schilddikte | 50-60-70-80 mm | | |
| massa schil | 120-144-168-192 kg/m ² | | |
| sterkteklasse beton | C28/35; optioneel C35/45 | | |
| staalkwaliteit | FeB 500 | | |
| tralieliggers | conform NVN 6725 | | |
| milieuklasse | XC1 t/m 4, XF1 en XF3 (overig in overleg) | | |
| brandwerendheid | 60-90-120 minuten | | |



Hierbij worden vooraf in de fabriek brede platen beton van een geringe dikte, 50 tot 80 mm, gestort met daarin al de wapening nodig in de onderzijde van de uiteindelijke vloer. Hierdoor hoeft de aannemer op de bouwplaats geen onderkant van de bekisting te maken en hoeft ook de wapening niet meer op de bouwplaats in elkaar gezet (ook wel gevlochten genaamd) te worden. Tevens kan de breedplaat, omdat hij al verhard is, meteen belopen worden en kan het werk meteen verder.

Uit de breedplaat steken, uit stalen staven gemaakte, ribben waarop de bovenwapening van de vloer gelegd kan worden (meestal is dit wapening in de vorm van netten). Hierna kan een dikke laag beton op de breedplaat gestort worden en, na verharding, zal de breedplaat samen met het gestorte beton een massieve betonvloer vormen. Voordeel van een prefabvloer dus maar wel met een massieve betonvloer als eindresultaat alhoewel het patroon van de naden/ voegen van de breedplaten wel aan de onderzijde in het zicht blijft.



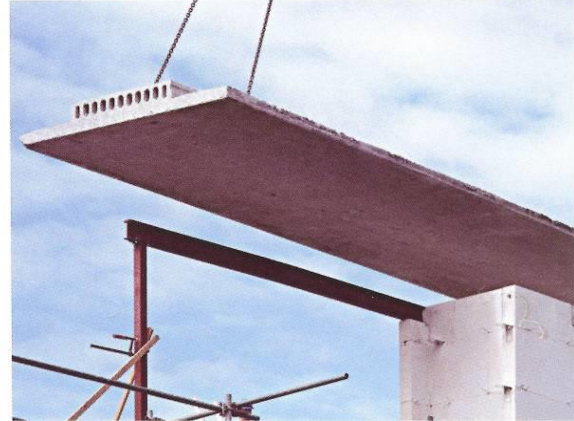
Breedplaten arriveren op het werk, met hoofdwapening in de plaat en de sparingen voor trapgaten en lichtdozen.

f. Kanaalplaatvloer

Een kanaalplaat is eigenlijk een hightech plank uit hoge sterkte beton en vol met voorspanning. Ze kunnen in de fabriek snel en goedkoop gemaakt worden. Dat is ook de voornaamste reden dat zeker 80% van de betonnen vloeren in Nederland nu uit kanaalplaten vervaardigd wordt. Het is wel altijd zaak een laagje beton; de druklaag, ter plekke over alle kanaalplaten heen te storten. Hierdoor wordt de samenhang van de vloer; geen verzameling losse planken meer, verzekerd en kunnen windkrachten die aangrijpen op de gevels via de schijf van de vloer naar de stabiliteitselementen getransporteerd worden. Ook kan een puntlast op één kanaalplaat via de druklaag deels overgedragen worden naar de buur kanaalplaten. Tot slot zorgt de druklaag ervoor dat de vloer aan de bovenkant één vlak gaat vormen, zonder naden en hogere of lagere gedeeltes.

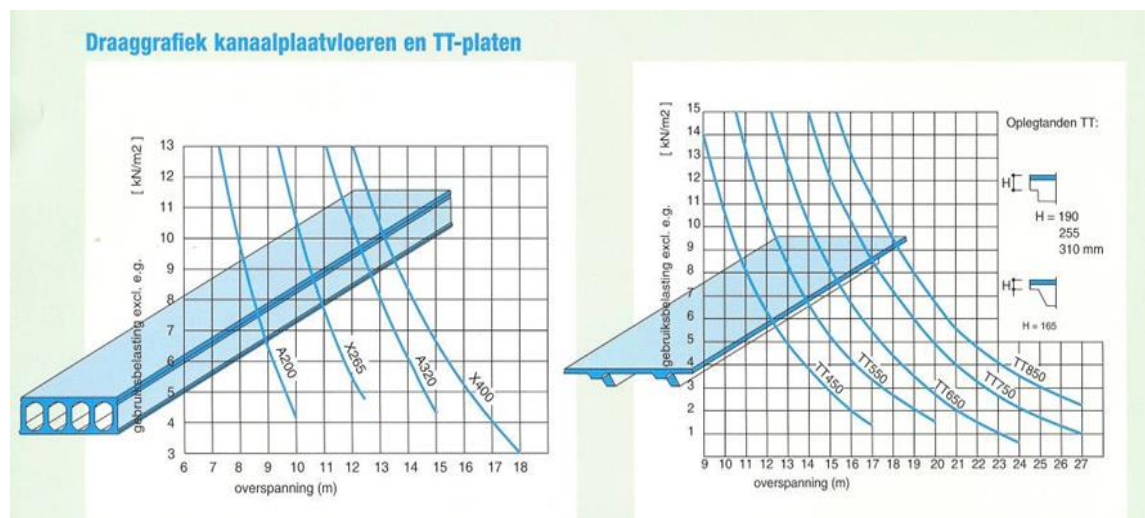
In de druklaag wordt bijna altijd een zogenaamd krimpnet gelegd, bijvoorbeeld een kruisnet uit staven rond 8 mm hart op hart 150 mm, waardoor mogelijke scheuren,

ontstaan door zettingverschillen, krimp beton bij lange vloeren, opbuigende momenten bij uitkragingen etc. fijner verdeeld worden en niet zich als één grote scheur manifesteren maar als een aantal kleinere scheurtjes.



Links een gewone kanaalplaatvloer, let op de handige (klem)haak waarmee de plaat wordt opgetild en op zijn plaats gemanoeuvreerd wordt. Rechts een speciaal soort kanaalplaat, de wingvloer; op de flappen, links en rechts kunnen de installatieonderdelen zoals leidingen, kabels en kanalen neergelegd worden waarna alles door de druklaag van beton, die bovenop de kanaal/wingplaat gestort wordt, uit het zicht wordt gehouden.

Kanaalplaten kunnen ook isolerend uitgevoerd worden door polystyreen tegen de onderkant aan te plakken. Bij de opleggingen zijn wel oplegnokken van beton nodig, die zie je op het overzicht van de kanaalplaattypes dan ook afgebeeld. Omdat kanaalplaten een gestandaardiseerd product is, zijn er tabellen en grafieken beschikbaar die het draagvermogen van de kanaalplaatvloer aangeven. Hieronder de draaggrafiek voor een kanaalplaat en voor een TT-plaat.



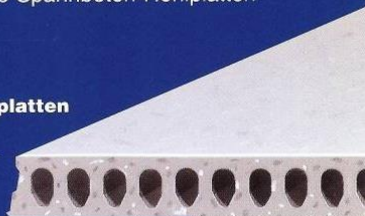
Komplettes Sortiment

Verbin empfiehlt und liefert ein komplettes Sortiment:

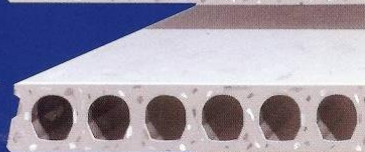
- Spannbeton-Hohlplatten
- Wärme gedämmte Spannbeton-Hohlplatten

Spannbeton-Hohlplatten

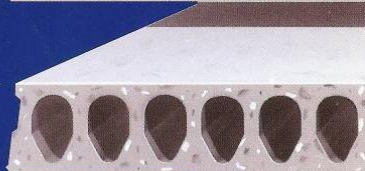
A180



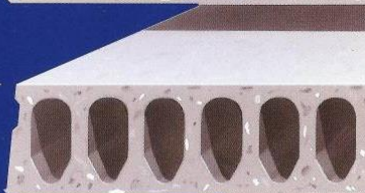
A200



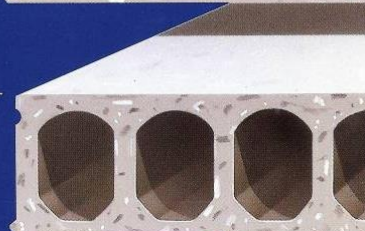
A260



A320

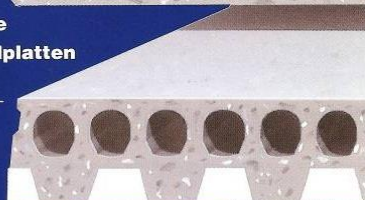


V400

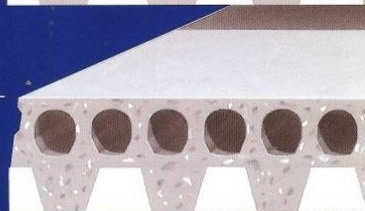


Wärme gedämmte Spannbeton-Hohlplatten

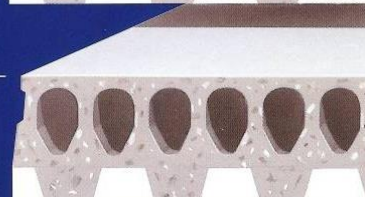
GD200



HD200



GD260



Overzicht kanaalplaattypes, let op de hoogtes.

g. Dubbel-T-liggers en andere (super)liggers

Dubbel T-liggers zijn prefab vloerelementen die zo heten omdat de vorm lijkt op twee keer de letter T tegen elkaar aan geschoven. Ze zijn duidelijk sterker dan kanaalplaten vooral omdat ze veel hoger zijn dan kanaalplaten en met de T-vorm minder dood gewicht hebben. De schil (het horizontale gedeelte van de T) is meestal maar 60 mm dik!



Kolom-balk-TT-platen

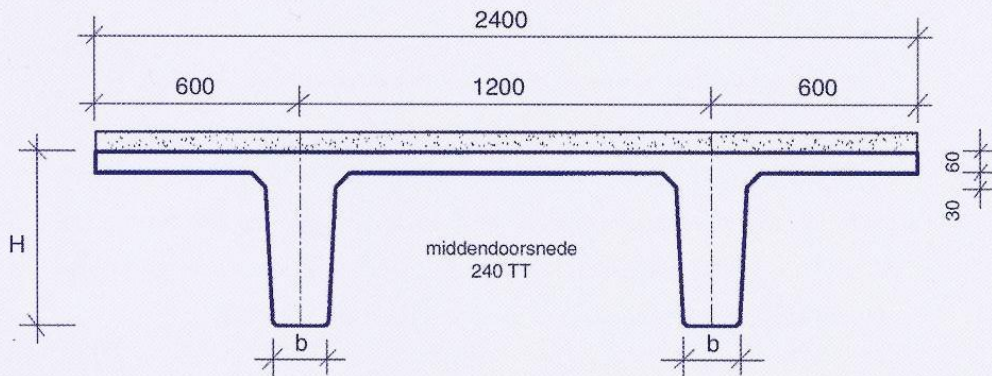


Montage TT-knikplaat

Dubbel-T-platen worden vooral gebruikt bij parkeergarages omdat dubbel-T-platen in één keer een overspanning van: 5 meter parkeervak, een rijweg van 6 meter en weer een parkeervak van 5 meter dus totaal 16 meter, kunnen overspannen. Want kolommen in parkeergarages zijn functioneel gezien lastig en kosten parkeerplaatsen. Ook van dubbel-T-platen zijn weer grafieken gemaakt waaruit het draagvermogen behorende bij een bepaalde overspanning is te halen.

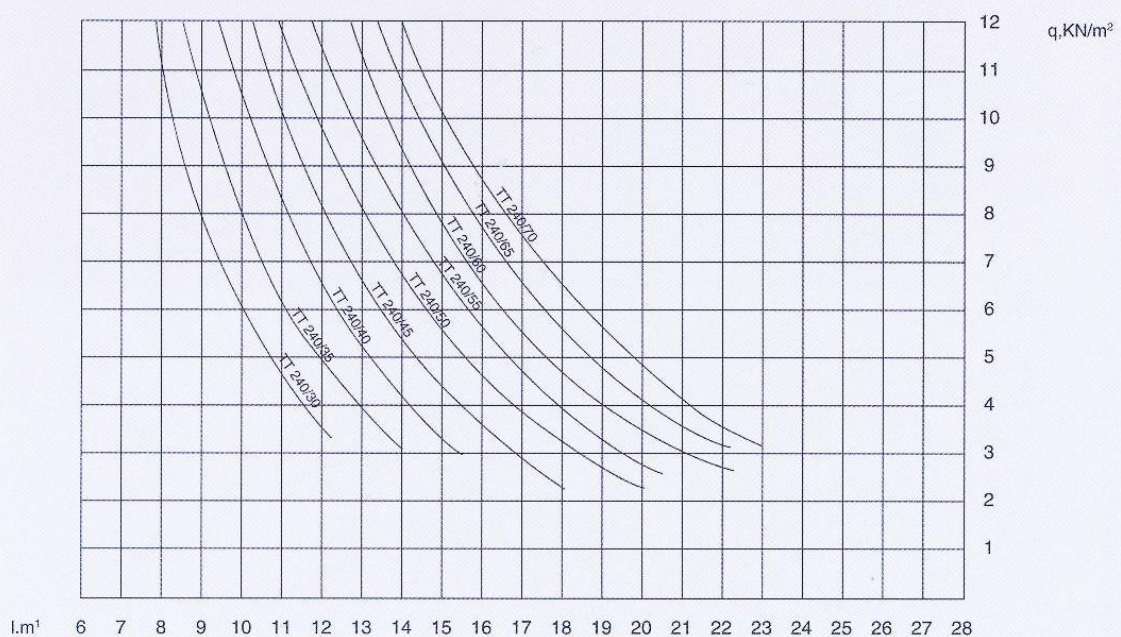
Bij een nog grotere overspanning of als er een veel hoger draagvermogen nodig is (geen auto's maar bijvoorbeeld een mensenmassa of stapels goederen) zullen ook de dubbel-T-platen niet meer voldoen. De prefab betonindustrie biedt dan nog een aantal bijzondere prefab balken aan. Dat kan variëren van I-liggers tot omgekeerde T-liggers (slechts een enkele T) of zelfs kokerliggers. Vooral in de viaducten over de snelwegen worden ze toegepast maar ook wel in gebouwen waar een grote, zwaar belaste overspanning nodig is.

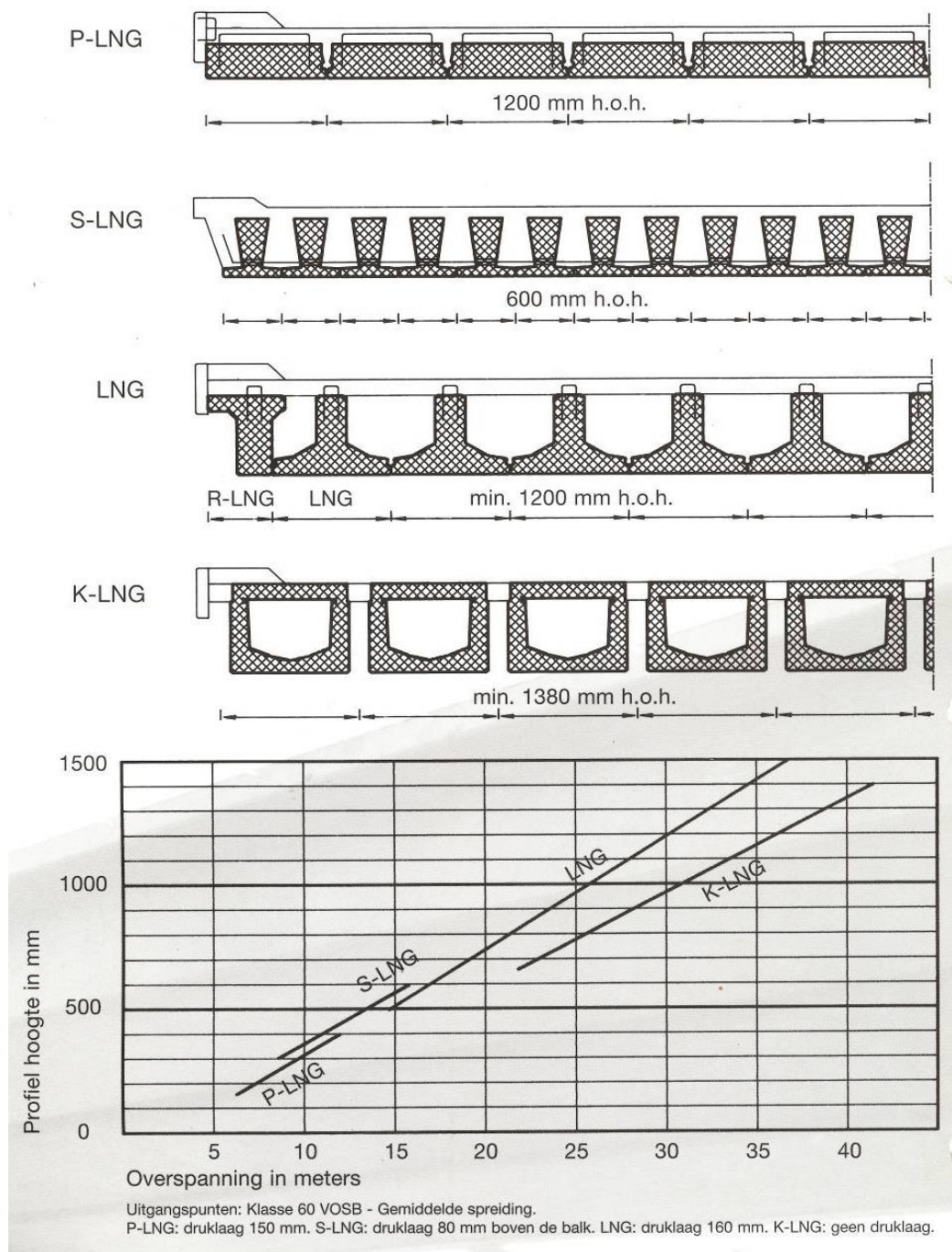
Middendoorsnede TT



| type | H mm | b mm | h mm | A midden $\times 10^2$ | I_x midden $\times 10^4$ mm ² | Wb $\times 10^3$ mm ³ mm ⁴ | W _o $\times 10^3$ mm ³ | X mm | gewicht kg/m ² |
|-----------|---------|---------|---------|------------------------------|---|---|--|---------|------------------------------|
| TT 240/30 | 300 | 190 | 60 | 2446 | 178261 | 19806 | 8489 | 210 | 250 |
| TT 240/35 | 350 | 183 | 60 | 2631 | 274330 | 25880 | 11243 | 244 | 269 |
| TT 240/40 | 400 | 177 | 60 | 2813 | 396780 | 31998 | 14376 | 276 | 287 |
| TT 240/45 | 450 | 169 | 60 | 2986 | 545001 | 38653 | 17638 | 309 | 305 |
| TT 240/50 | 500 | 163 | 60 | 3151 | 720550 | 45318 | 21131 | 341 | 322 |
| TT 240/55 | 550 | 156 | 60 | 3314 | 926657 | 52651 | 24777 | 374 | 338 |
| TT 240/60 | 600 | 150 | 60 | 3466 | 1158722 | 59728 | 28540 | 406 | 354 |
| TT 240/65 | 650 | 144 | 60 | 3610 | 1418693 | 67237 | 32317 | 439 | 369 |
| TT 240/70 | 700 | 138 | 60 | 3754 | 1711688 | 74746 | 36342 | 471 | 383 |

Belastingstabel (op basis van één uur brandwerendheid)





Draagvermogen verschillende types bijzondere vormen prefab balken voor de belasting verkeersklasse 60; zware vrachtauto's op de brug, grofweg te vergelijken met 750 kg/m² gelijkmatig verdeelde variabele belasting.

h. Ribbenvloer

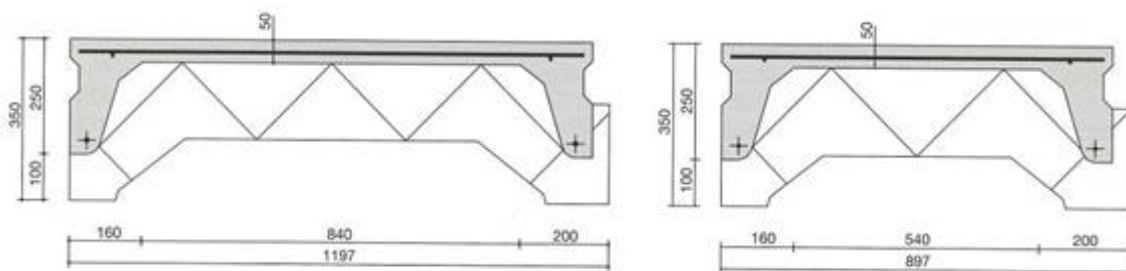
Een ribbenvloer is een prefab vloersysteem opgebouwd uit 900 of 1200 mm brede vloerplaten met aan de zijkant een rib. Deze rib doet het constructieve werk als ware hij een balk. Ribbenvloeren zijn niet zo sterk en worden dan ook meestal in de woningen- en scholen bouw toegepast. Voordeel van de (omgekeerde) U-vorm is dat de hele U-vorm met isolatie materiaal gevuld kan worden zodat een uitstekende isolatie

waarde bereikt wordt. Daarom komen vooral begane grondvloeren, met de geventileerde, en dus koude, kruipruimte eronder in aanmerking om als ribbenvloer uitgevoerd te worden. Ook hier weer het pro prefab argument: neerleggen vanaf de vrachtauto en gelijk weer kunnen verder bouwen.



Een stapeltje ribbenvloer platen ligt in de vorkheftruck.

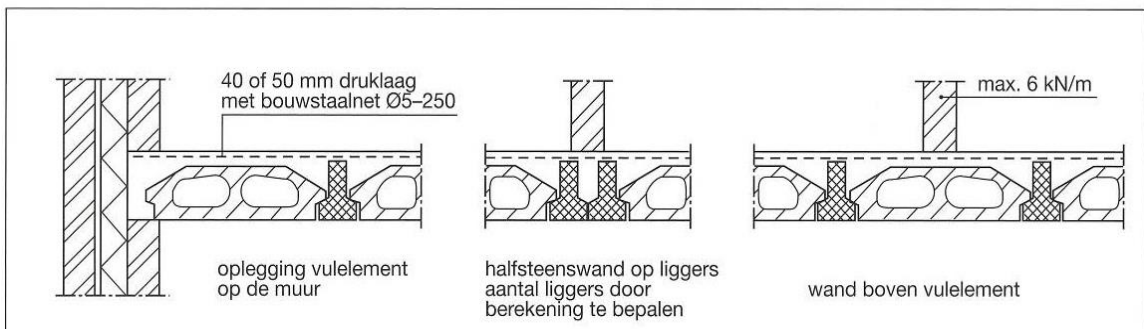
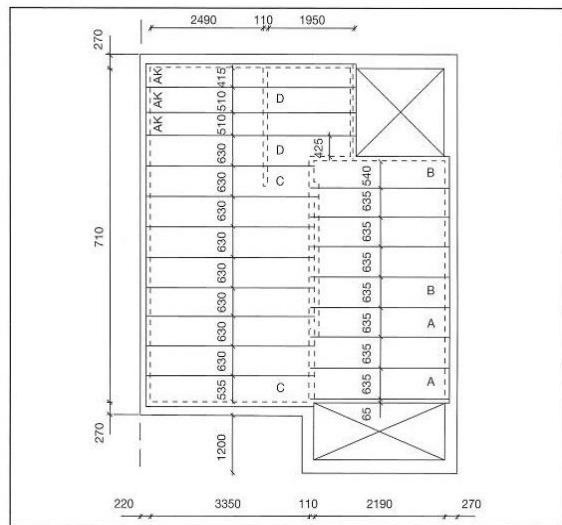
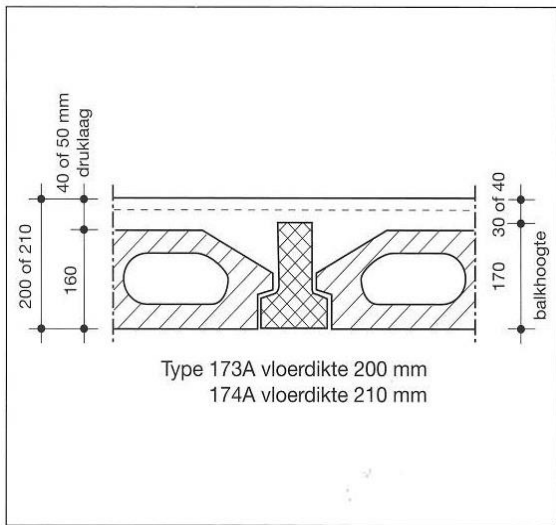
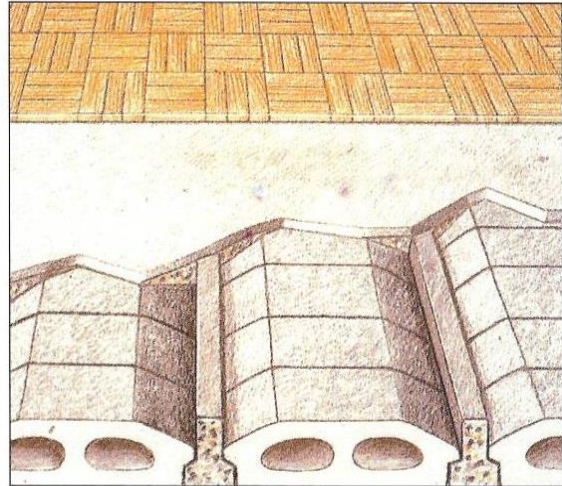
| | | | |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------|---|
| Element | | Voorzieningen | |
| breedte | 1200 of 900 mm | sparingen | ø100, ø150 en ø200 mm minimaal 100x100 mm; oplopend met veelvouden van 50 mm |
| opleghoogte | 350 mm | kruipruiksparing | 500x700 mm |
| max. plaatlengte | 7,2 m | meterkastsparring | 350x700 mm |
| kopafschuining | 3-45° | convectieputsparring | op maat |
| voegvulling | 8,3 l/m ³ | | |
| massa incl. voegvulling | 200 kg/m ² | Toebehoren | |
| Rc waarde* | 3,0-5,2 m ² K/W | EPS vulstroken | 50-100-150-200-250 mm (ongewapend) |
| sterkteklasse beton | C53/65 | EPS pasplaten | 300-400-600 mm (gewapend) |
| staalkwaliteit | FeP 1860, FeP 1770, FeB 500 | | |
| *door TNO bepaald | | | |



Enige gegevens van ribbenvloerelementen.

i. Broodjesvloer of combinatie vloer

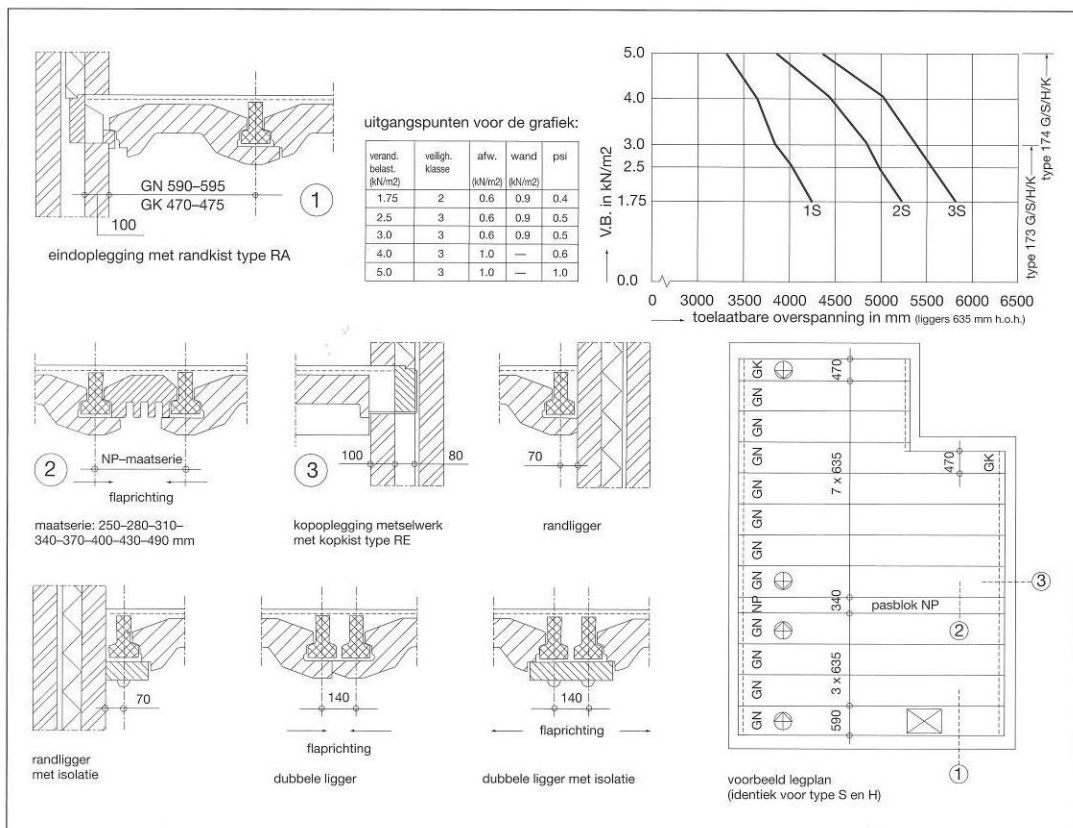
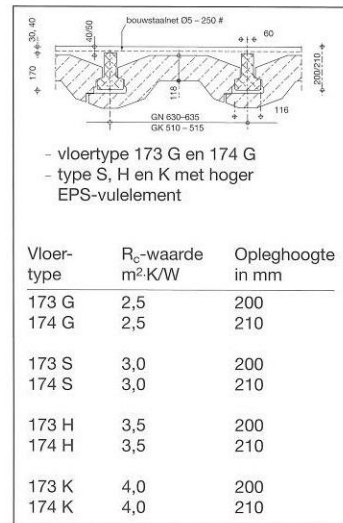
Een typische woningbouwvloer, niet sterk maar voor woningen afdoende en een leuke, goedkope systeemvloer. Bij een broodjes- of combinatievloer worden eerst kleine prefab betonnen liggertjes hart op hart zo'n 600 mm neergelegd, die van bouwmuur naar bouwmuur overspannen. Deze prefab liggertjes zijn het constructieve hart van de broodjes of combinatievloer.



Combinatievloer.

Tussen de liggertjes in worden daarna de 'broodjes' neergelegd, licht beton of polystyreen kanaalelementen. Over alles heen wordt er weer een druklaag van beton gestort die voor de constructieve samenhang en de verdeling van puntlasten zorgt. Zoals al gezegd alleen voor woningbouw geschikt vanwege het lage draagvermogen maar wel snel en eenvoudig te leggen, goedkoop en afdoende isolerend. Toch zie je in de praktijk dat meestal wordt overgeschakeld op de PS-isolatie vloer die de isolatie waarde aanzienlijk opschroeft, een feit dat tegenwoordig zwaar meetelt in de keuze van de vloer.

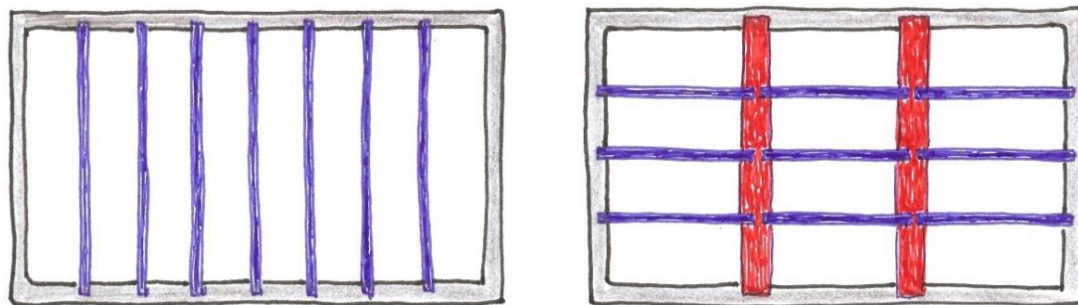
j. PS-isolatie vloer



Bij een PS-isolatie vloer zijn de licht-betonnen broodjes uit het vorige vloersysteem vervangen door een soort 'kussen' van polystyreen schuim (de PS uit de vloernaam). Daardoor loopt de isolatiewaarde aanzienlijk op. Vooral omdat de PS om de betonnen liggertjes heen loopt en daardoor de koude brug van de liggertjes voorkomen wordt. Verder is de werking van het vloersysteem gelijk aan die van de combinatievloer. Ook hier verzorgt een ter plaatse gestorte druklaag de constructieve samenhang in de vloer. Bij dit type vloersysteem, dat alleen in de woningbouw of ander licht belaste situaties kan worden toegepast, er op letten dat puntlasten of lijnlasten (muren!) op de correcte positie staan anders ponsen ze dwars door de relatief dunne druklaag en de PS kussen heen. Overigens wordt ook de PS-isolatie vloer wel broodjesvloer genoemd.

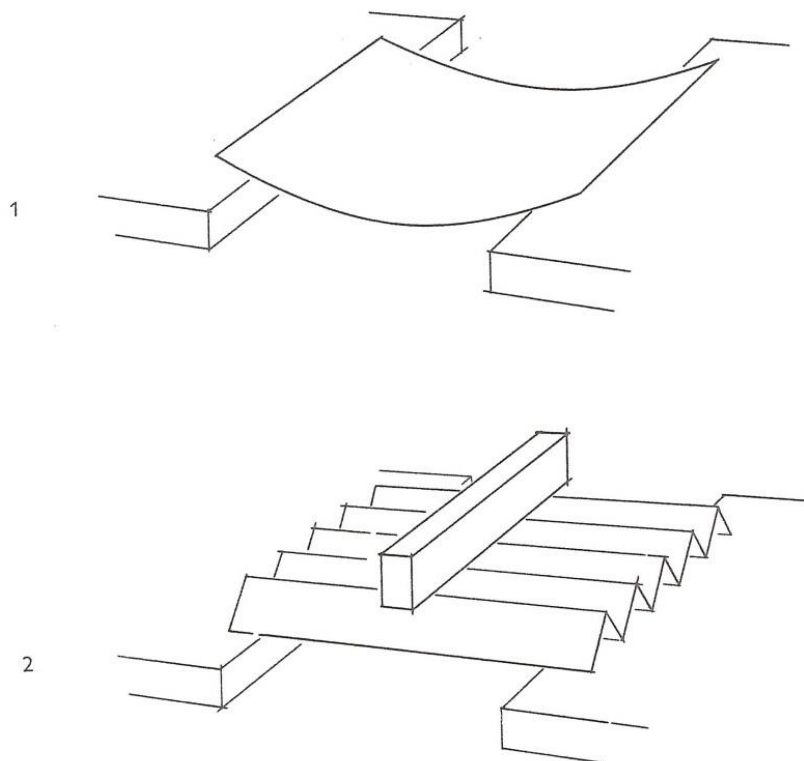
11.3 Stalen vloeren

Stalen vloeren noemen wij zo als het merendeel van de constructieve elementen van staal gemaakt is. Het merendeel dus en niet alles want er kan best een betonnen vloer op liggen of zelfs houten (secundaire) balken tussen de stalen (primaire) balken zitten. Qua balkenpatronen kan verwezen worden naar de paragrafen over houten en betonnen vloeren. Aangetekend moet worden dat bij stalen balken het soms de moeite loont om een duidelijk systeem van hoofdbalken (primaire balken) en gewone balken (secundaire balken) te maken. Of dit zo is, moet per situatie berekend worden en hangt van de overspanning en de grootte van de belasting af. Maatgevend voor de beoordeling is het kilo staal per vierkante meter dat iedere oplossing nodig heeft, dit geeft een belangrijke indicatie voor het prijsniveau van de vloer. Het zal duidelijk zijn dat de meer kilo's die je in de primaire balken stopt terug verdient moeten worden in de minder kilo's in de secundaire balken.



Twee dezelfde vloeren op een andere wijze overspannen. De eerste met één type balk, de tweede met primaire (hoofd)balken en secundaire balken.

Een overzicht van de mogelijke staal profielen dat wil zeggen de types die in de bouwhandel goed verkrijgbaar zijn is al gegeven in het hoofdstuk Bouwmaterialen bij het onderdeel Staal. In het kort herhaald, de U-balken, IPE-balken, de HE-balken (met een zwaarte/ sterkte verloop van A, B, M, HD types), de hoeklijnen (L-stalen), de rechthoekige, de vierkante, de ronde en de ellipsvormige buisprofielen, de raat liggers en, tot slot, de hoedliggers. De vloeren die op het stalen balken patroon neer gelegd moeten worden kunnen uit vrijwel alle bouwmaterialen samengesteld worden zoals houten vloeren (balken + platen/ planken), ter plaatse gestort beton, prefab betonplaten en natuurlijk stalen platen. Voor dat laatste is het slim om geen vlakke plaat te gebruiken maar een gevouwen plaat. Een gevouwen plaat heeft met het zelfde materiaalverbruik (prijs) een vele en veel hoger draagvermogen (zie afbeelding).



Het effect van het gevouwen zijn op de stijfheid in beeld gebracht als een eerst zeer slappe plaat die al onder zijn gewicht veel doorbuigt en dezelfde plaat in gevouwen toestand: vele malen sterker en stijver.

De golfhoogte van een gevouwen staalplaat bepaalt dus, tezamen met de staalplaatdikte, het draagvermogen van de golvende plaat. Nu wordt de golfplaatvorm door verschillende fabrikanten in de vlakke staalplaat gewalst. Dit kan een ronde golfvorm zijn, een hoekige of stukken vlak en dan schuin naar beneden of juist weer omhoog. De plaatdikte wordt om economische redenen zo licht mogelijk gehouden denk daarbij aan minimaal 0,50 mm tot maximaal 3 mm. In onderstaand figuur voor verschillende golfvormen het draagvermogen (eigenlijk maximaal mogelijke overspanning) voor dakplaten. Af te lezen is dat zo'n 1,60 meter tot 7,50 meter overspanning voor gevouwen staalplaten mogelijk is.

Gevouwen staalplaten zijn dus platen waarmee we een geheel stalen vloer kunnen maken. Probleem bij staalplaten als vloer is, net als bij hout dat er weinig gewicht/massa in de vloer zit, vandaar dat vrijwel altijd een laagje beton op de gevouwen staalplaat gegoten wordt. Dat geeft de gewenste massa en geeft ook meteen een vlakke bovenkant om beter op te lopen. Het aardige is dat de gevouwen staalplaat meteen als bekisting gebruikt kan worden én dat de staalplaat zelfs als wapening aan de onderzijde kan dienen. Vooral in hoogbouw wordt de zogenaamde staalplaatbetonvloer veel toegepast. De relatief lichte staalplaten zijn goed tilbaar en ook makkelijk bij te snijden of anderszins aan te passen. Het beton kan verpompt worden zodat de staalplaatbeton vloeren snel gemaakt kunnen worden en al snel meteen weer belast kunnen worden zodat de bouw snel verder kan.

3D

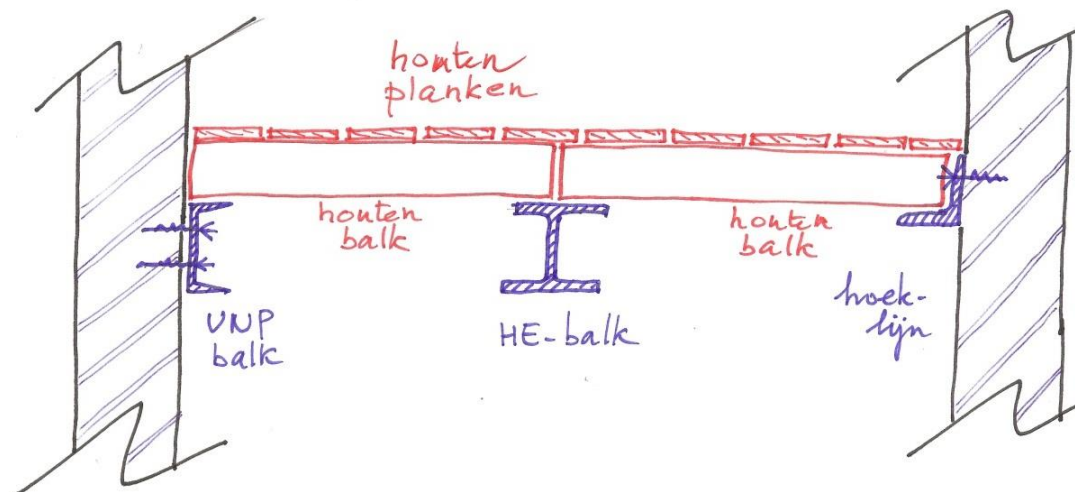
Profielplaten → Warmdak → Trapezium → Veiligheidsklasse 3 Verhoogde permanente belasting

Toelaatbare overspanningen → Uitvoering staal

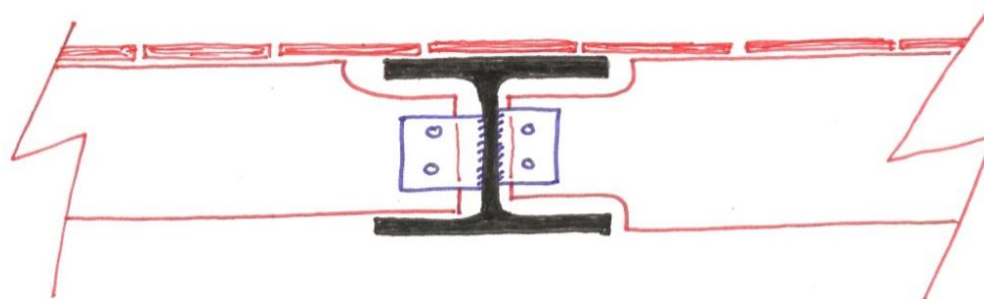
| Doorbuiging L/250 | | | Permanente belasting 1,05 kN/m ² | | | Permanente belasting 1,05 kN/m ² | | | Permanente belasting 1,05 kN/m ² | | |
|--|---------------|---------------------------------|---|-------|------|---|------|------|---|------|------|
| | | | Veranderlijke belasting 1,00 kN/m ² | | | Veranderlijke belasting 1,40 kN/m ² | | | Veranderlijke belasting 2,80 kN/m ² | | |
| Profielplaattype | Dikte (mm) | Gewicht (kg/m ²) | ▲▲ | ▲▲▲ | ▲▲▲▲ | ▲▲ | ▲▲▲ | ▲▲▲▲ | ▲▲ | ▲▲▲ | ▲▲▲▲ |
| SAB 35R/1035 40 mm oplegging | 0,70 | 6,63 | 1,62 | 1,76 | 1,83 | 1,62 | 1,68 | 1,83 | 1,41 | 1,22 | 1,32 |
| | 0,75 | 7,11 | 1,69 | 1,99 | 2,09 | 1,67 | 1,83 | 2,01 | 1,45 | 1,35 | 1,46 |
| | 0,88 | 8,34 | 1,81 | 2,41 | 2,33 | 1,77 | 2,14 | 2,20 | 1,53 | 1,58 | 1,73 |
| | 1,00 | 9,48 | 1,91 | 2,66 | 2,43 | 1,85 | 2,43 | 2,29 | 1,60 | 1,81 | 1,98 |
| SAB 40R/915 63 mm oplegging | 0,70 | 7,50 | 1,90 | 2,15 | 2,25 | 1,85 | 1,97 | 2,12 | 1,59 | 1,34 | 1,50 |
| | 0,75 | 8,04 | 1,96 | 2,29 | 2,40 | 1,89 | 2,05 | 2,22 | 1,63 | 1,44 | 1,61 |
| | 0,88 | 9,43 | 2,08 | 2,54 | 2,60 | 2,00 | 2,27 | 2,46 | 1,73 | 1,70 | 1,82 |
| | 1,00 | 10,72 | 2,19 | 2,75 | 2,71 | 2,07 | 2,45 | 2,57 | 1,80 | 1,84 | 1,98 |
| SAB 50R/1000 63 mm oplegging | 0,70 | 7,00 | 2,23 | 2,16 | 2,22 | 2,11 | 1,92 | 2,08 | 1,82 | 1,41 | 1,51 |
| | 0,75 | 7,50 | 2,29 | 2,37 | 2,54 | 2,16 | 2,10 | 2,28 | 1,86 | 1,54 | 1,66 |
| | 0,88 | 8,88 | 2,41 | 2,85 | 2,99 | 2,28 | 2,54 | 2,76 | 1,97 | 1,88 | 2,04 |
| | 1,00 | 10,00 | 2,52 | 3,23 | 3,12 | 2,38 | 2,88 | 2,94 | 2,05 | 2,15 | 2,33 |
| SAB 70R/800 63 mm oplegging | 0,70 | 8,58 | 2,93 | 3,86 | 3,64 | 2,77 | 3,49 | 3,44 | 2,48 | 2,86 | 3,07 |
| | 0,75 | 9,20 | 3,00 | 4,00 | 3,73 | 2,84 | 3,63 | 3,52 | 2,54 | 2,97 | 3,14 |
| | 0,88 | 10,79 | 3,18 | 4,31 | 3,94 | 3,00 | 3,95 | 3,72 | 2,68 | 3,26 | 3,32 |
| | 1,00 | 12,27 | 3,32 | 4,51 | 4,12 | 3,13 | 4,22 | 3,88 | 2,80 | 3,50 | 3,47 |
| SAB 85R/1120 120 mm oplegging | 1,13 | 13,86 | 3,46 | 4,71 | 4,30 | 3,26 | 4,44 | 4,05 | 2,92 | 3,74 | 3,62 |
| | 1,25 | 15,33 | 3,58 | 4,87 | 4,45 | 3,38 | 4,59 | 4,20 | 3,02 | 3,94 | 3,75 |
| | 0,70 | 7,49 | 3,02 | 3,33 | 3,58 | 2,85 | 2,96 | 3,16 | 2,47 | 2,18 | 2,31 |
| | 0,75 | 8,03 | 3,11 | 3,57 | 3,83 | 2,94 | 3,17 | 3,40 | 2,54 | 2,35 | 2,50 |
| SAB 89R/915 120 mm oplegging | 0,88 | 9,42 | 3,32 | 4,14 | 4,09 | 3,13 | 3,70 | 3,86 | 2,71 | 2,77 | 2,95 |
| | 1,00 | 10,70 | 3,49 | 4,60 | 4,31 | 3,30 | 4,11 | 4,07 | 2,85 | 3,11 | 3,32 |
| | 1,13 | 12,09 | 3,66 | 4,93 | 4,52 | 3,45 | 4,57 | 4,26 | 2,99 | 3,48 | 3,67 |
| | 1,25 | 13,40 | 3,78 | 5,10 | 4,67 | 3,57 | 4,81 | 4,41 | 3,09 | 3,79 | 3,80 |
| SAB 106R/750 120 mm oplegging | 0,70 | 7,50 | 3,27 | 3,40 | 3,65 | 3,09 | 3,01 | 3,23 | 2,67 | 2,22 | 2,35 |
| | 0,75 | 8,04 | 3,36 | 3,63 | 3,91 | 3,17 | 3,23 | 3,46 | 2,74 | 2,39 | 2,54 |
| | 0,88 | 9,43 | 3,55 | 4,20 | 4,38 | 3,35 | 3,75 | 4,04 | 2,90 | 2,81 | 2,99 |
| | 1,00 | 10,72 | 3,71 | 4,68 | 4,58 | 3,50 | 4,19 | 4,32 | 3,03 | 3,16 | 3,39 |
| SAB 110R/1000 120 mm oplegging | 1,13 | 12,11 | 3,87 | 5,17 | 4,78 | 3,65 | 4,64 | 4,50 | 3,16 | 3,52 | 3,78 |
| | 1,25 | 13,40 | 4,00 | 5,40 | 4,94 | 3,78 | 5,02 | 4,66 | 3,26 | 3,83 | 4,02 |
| | 0,70 | 9,15 | 3,89 | 4,33 | 4,67 | 3,68 | 3,72 | 4,18 | 3,15 | 2,31 | 2,59 |
| | 0,75 | 9,81 | 3,99 | 4,51 | 4,87 | 3,73 | 4,00 | 4,36 | 3,23 | 2,48 | 2,78 |
| SAB 135R/930 160 mm oplegging | 0,88 | 11,51 | 4,18 | 4,94 | 5,16 | 3,94 | 4,44 | 4,79 | 3,41 | 2,93 | 3,29 |
| | 1,00 | 13,08 | 4,36 | 5,31 | 5,39 | 4,12 | 4,77 | 5,09 | 3,56 | 3,33 | 3,75 |
| | 1,13 | 14,78 | 4,54 | 5,69 | 5,62 | 4,29 | 5,11 | 5,30 | 3,70 | 3,78 | 4,22 |
| | 1,25 | 16,34 | 4,70 | 6,01 | 5,82 | 4,44 | 5,41 | 5,49 | 3,83 | 4,15 | 4,47 |
| SAB 153R/840 160 mm oplegging | 0,70 | 8,24 | 3,67 | 3,84 | 4,16 | 3,47 | 3,39 | 3,66 | 3,00 | 2,47 | 2,65 |
| | 0,75 | 8,83 | 3,76 | 4,06 | 4,41 | 3,55 | 3,59 | 3,88 | 3,07 | 2,63 | 2,82 |
| | 0,88 | 10,36 | 3,97 | 4,50 | 4,88 | 3,75 | 3,99 | 4,33 | 3,24 | 2,94 | 3,15 |
| | 1,00 | 11,78 | 4,14 | 4,86 | 5,12 | 3,91 | 4,33 | 4,70 | 3,38 | 3,20 | 3,45 |
| SAB 158R/750 160 mm oplegging | 1,13 | 13,31 | 4,32 | 5,23 | 5,34 | 4,08 | 4,67 | 5,84 | 3,52 | 3,47 | 3,74 |
| | 1,25 | 14,72 | 4,47 | 5,55 | 5,53 | 4,22 | 4,96 | 5,21 | 3,64 | 3,70 | 4,00 |
| | 0,70 | 8,86 | 4,71 | 4,44 | 4,83 | 4,45 | 3,87 | 4,19 | 3,75 | 2,71 | 2,91 |
| | 0,75 | 9,50 | 4,83 | 4,67 | 5,08 | 4,56 | 4,07 | 4,42 | 3,87 | 2,86 | 3,08 |
| SAB 200R/750 200 mm oplegging | 0,88 | 11,14 | 4,97 | 5,82 | 6,14 | 4,69 | 5,11 | 5,56 | 4,06 | 3,65 | 3,95 |
| | 1,00 | 12,66 | 5,10 | 6,74 | 6,30 | 4,81 | 5,94 | 5,94 | 4,16 | 4,29 | 4,65 |
| | 1,13 | 14,30 | 5,31 | 7,07 | 6,56 | 5,02 | 6,45 | 6,19 | 4,34 | 4,68 | 5,08 |
| | 1,25 | 15,83 | 5,50 | 7,40 | 6,79 | 5,19 | 6,89 | 6,41 | 4,48 | 5,02 | 5,46 |
| SAB 153R/840 160 mm oplegging | 1,50 | 18,99 | 5,84 | 7,90 | 7,23 | 5,51 | 7,45 | 6,82 | 4,76 | 5,68 | 5,88 |
| | 0,70 | 9,81 | 4,96 | 4,48 | 4,86 | 4,69 | 3,92 | 4,23 | 4,05 | 2,79 | 2,98 |
| | 0,75 | 10,51 | 5,06 | 5,02 | 5,46 | 4,78 | 4,41 | 4,77 | 4,13 | 3,15 | 3,38 |
| | 0,88 | 12,33 | 5,31 | 6,28 | 6,56 | 5,01 | 5,54 | 6,03 | 4,33 | 4,00 | 4,33 |
| SAB 158R/750 160 mm oplegging | 1,00 | 14,02 | 5,52 | 7,31 | 6,82 | 5,21 | 6,45 | 6,43 | 4,50 | 4,70 | 5,10 |
| | 1,13 | 15,84 | 5,75 | 7,77 | 7,12 | 5,43 | 6,99 | 6,71 | 4,69 | 5,12 | 5,56 |
| | 1,25 | 17,52 | 5,95 | 8,04 | 7,36 | 5,62 | 7,47 | 6,94 | 4,85 | 5,48 | 5,96 |
| | 1,50 | 21,03 | 6,27 | 8,49 | 7,76 | 5,92 | 8,01 | 7,33 | 5,13 | 6,14 | 6,33 |
| SAB 158R/750 160 mm oplegging | 0,70 | 10,99 | 5,38 | 5,44 | 5,92 | 5,08 | 4,78 | 5,19 | 4,39 | 3,44 | 3,70 |
| | 0,75 | 11,77 | 5,47 | 6,00 | 6,53 | 5,16 | 5,29 | 5,75 | 4,46 | 3,85 | 4,15 |
| | 0,88 | 13,81 | 5,68 | 7,22 | 7,03 | 5,37 | 6,42 | 6,63 | 4,64 | 4,75 | 5,13 |
| | 1,00 | 15,70 | 5,87 | 7,93 | 7,26 | 5,54 | 7,29 | 6,85 | 4,79 | 5,45 | 5,90 |
| SAB 158R/750 160 mm oplegging | 1,13 | 17,74 | 6,11 | 8,27 | 7,57 | 5,77 | 7,80 | 7,14 | 4,99 | 5,89 | 6,15 |
| | 1,25 | 19,63 | 6,32 | 8,56 | 7,83 | 5,97 | 8,07 | 7,39 | 5,16 | 6,27 | 6,37 |
| | 1,50 | 23,55 | 6,67 | 9,03 | 8,26 | 6,30 | 8,53 | 7,80 | 5,45 | 6,97 | 6,74 |
| | 0,88 | 13,81 | 6,57 | 6,27 | 6,80 | 6,20 | 5,52 | 5,97 | 5,36 | 3,99 | 4,27 |
| SAB 200R/750 200 mm oplegging | 1,00 | 15,70 | 6,89 | 7,23 | 7,86 | 6,50 | 6,39 | 6,93 | 5,62 | 4,67 | 5,02 |
| | 1,13 | 17,74 | 7,20 | 8,18 | 8,91 | 6,80 | 7,26 | 7,88 | 5,88 | 5,36 | 5,77 |
| | 1,25 | 19,63 | 7,48 | 8,97 | 9,25 | 7,06 | 7,98 | 8,68 | 6,10 | 5,94 | 6,41 |
| | 1,50 | 23,55 | 7,94 | 10,31 | 9,83 | 7,50 | 9,23 | 9,28 | 6,49 | 6,97 | 7,55 |

Overzicht van de overspanningsmogelijkheden van diverse gevouwen staalplaten.

Maar ook andere bouwmaterialen kunnen met stalen balken tot een volwaardige vloer gecombineerd worden, waarvan hieronder een paar voorbeelden. De vloeren kunnen bovenop de stalen balken neergelegd worden maar ook er tussen gemonteerd worden. Er bovenop is goedkoper (minder gezaag en bevestigingen dus minder arbeidsloon, een grote component van de kosten in de bouw) maar het grote voordeel van ertussen monteren is de mindere hoogte die het geheel heeft.

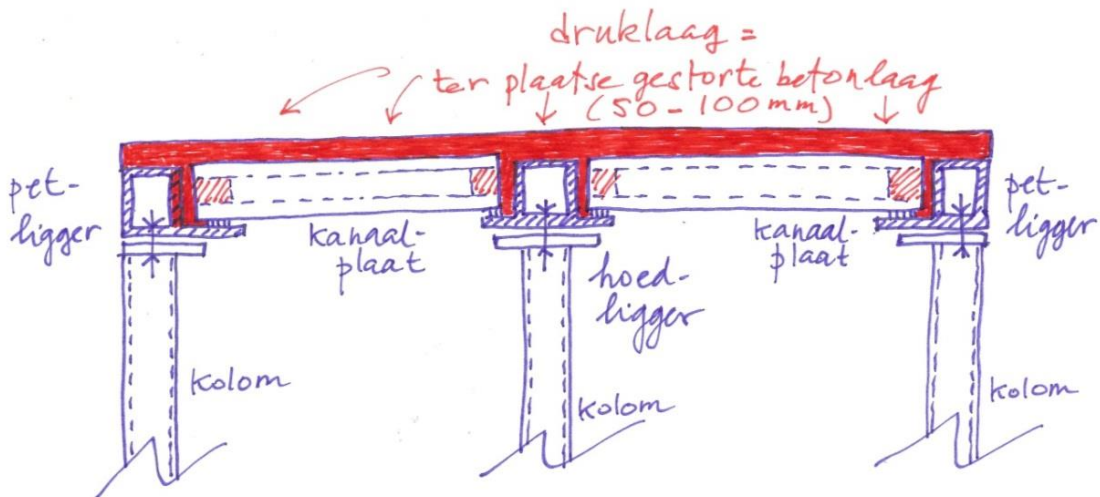


Combinatie diverse stalen balken met een houten vloer.



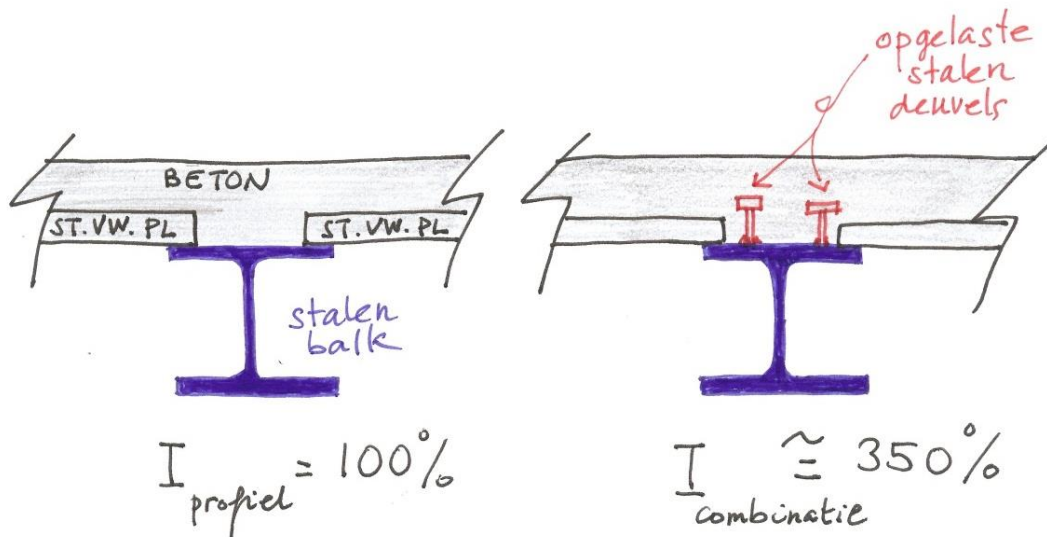
Een wat handigere manier om de houten balk op de stalen balk op te leggen; met een inkeping aan de bovenzijde kan er voor gezorgd worden dat de houten vloerplanken in één vlak doorlopen.

Natuurlijk kunnen ook betonnen vloeren, zowel ter plaatse gestorte als prefab vloeren met stalen balken gecombineerd worden. Veel toegepast is de combinatie stalen balken met kanaalplaten. We kunnen weer gewone H- of I-profielen gebruiken met de kanaalplaten er gewoon bovenop gelegd maar tegenwoordig worden vooral hoedliggers gebruikt die in de hoogte van de vloer wegvallen. Hierdoor ontstaat hoogtewinst in een gebouw. In plaats van de stapeling ligger, 300 mm hoogte, en vloer, 250 mm hoogte, is totaal 550 mm, geldt dan vloer weer 250 mm maar alleen de onderflens van de hoedligger, wel een dikke staalplaat nodig van 25 mm als balk dus totaal 275 mm. Per gebouw verdieping een winst van 550-275 is 275 mm oftewel per tien verdiepingen een gemiddelde verdiepingshoogte winst. Dat betekent één laag te verhuren of verkopen extra!

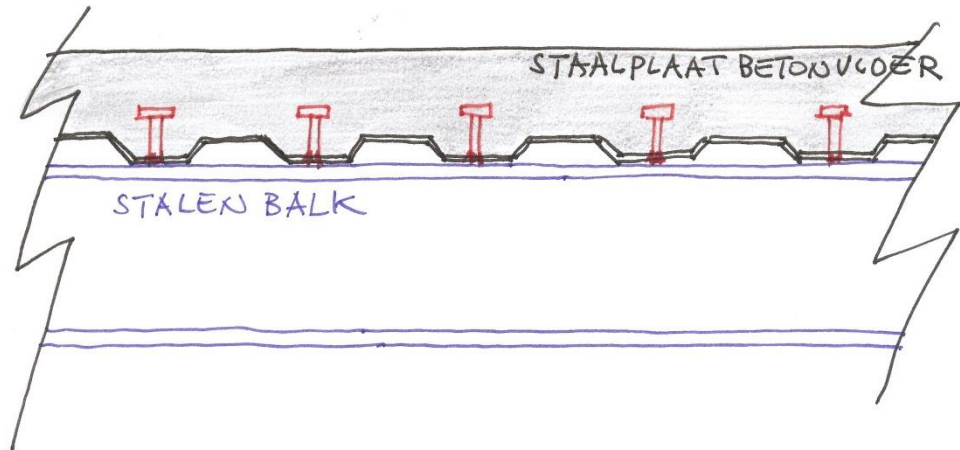


Voorbeeld combinatie betonnen vloer (in dit geval een kanaalplaatvloer met druklaag) met een staalconstructie (balken en kolommen). Hier verschijnen speciale en handige stalen balkvormen; naar hun vorm genoemd hoed- en petliggers.

Het begrip staalplaat betonvloer kan nog een extra dimensie krijgen als we er in slagen de betonlaag constructief te laten samenwerken met de stalen balken. Dit kan door deuken toe te passen die voorkomen dat de stalen balken verschuiven ten opzichte van de betonvloer en daarom kan de stijfheid van de totale hoogte (en niet de twee losse lagen) gemobiliseerd worden. Hierdoor kunnen de stalen balken een slag lichter zijn en is er dus materiaal, in dat geval staal en dus kosten te besparen.



Effect van de integratie van staal en beton door het aanbrengen van (afschuifkracht opnemende) opgelaste stalen deukvels. De winst aan sterkte en stijfheid kan zeer groot zijn.

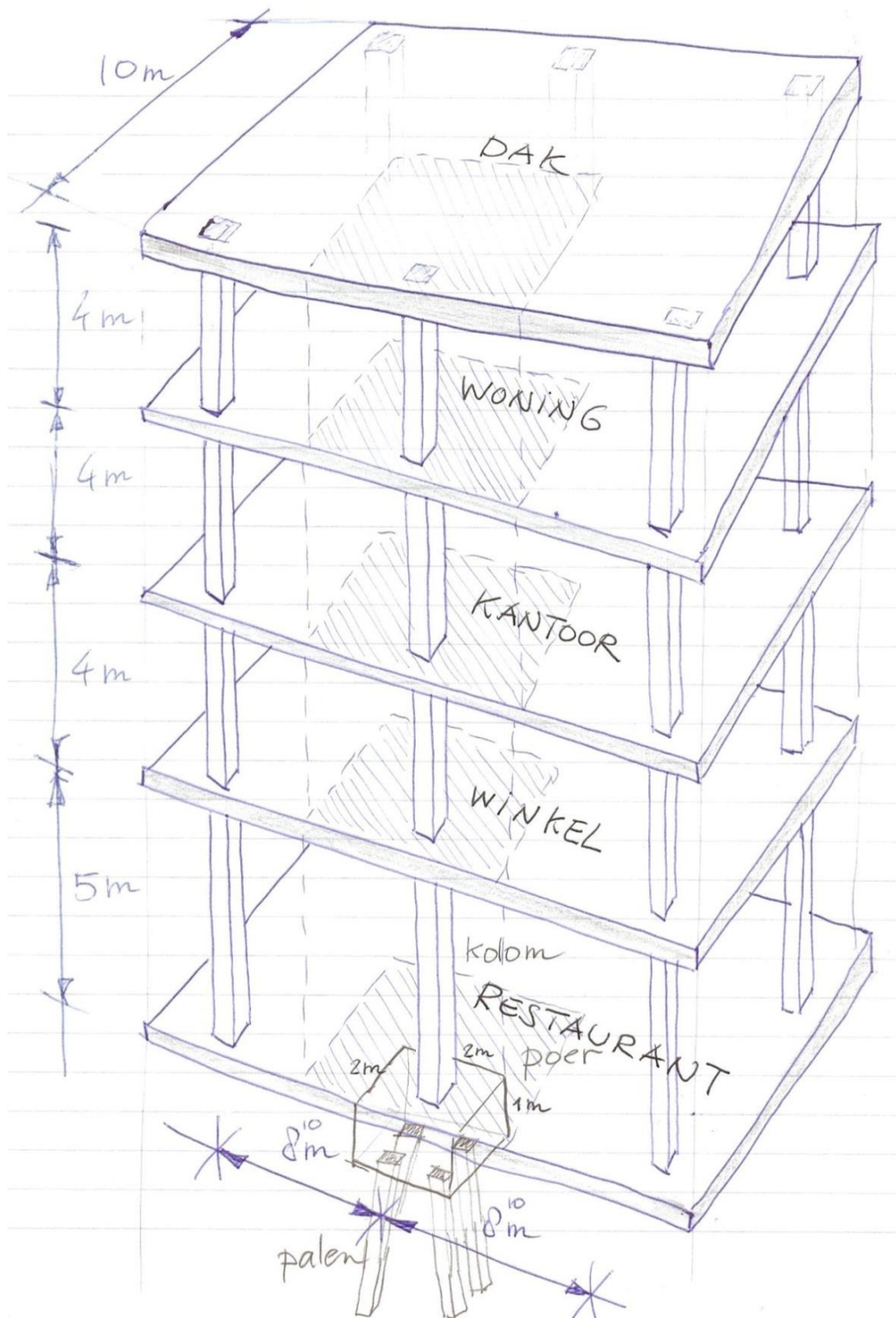


Langsdoorsnede over een staal-betonbalk.



Staalplaat betonvloer: storten van beton op geprofileerde staalplaten (Schiphol).

12 Kolommen



Voorbeeld van een flatgebouw met verschillende functies.

We gaan de kolombelasting uitrekenen en de kolom op knik dimensioneren. Hiertoe moeten we eerst uitrekenen hoeveel gewicht er per verdieping steeds op de kolom extra komt te staan. In België noemt men dit zo beeldend de Lastendaling in een Gebouw.

12.1 Gewichtsberekening voor een gebouw

De krachten 'stromen' van het dak naar de fundering.
Hoeveel kracht zit er in de onderste kolom?

| Voorbeelden | Materialen | Eigen.gewicht in kg/m ³ | Eigen gewicht in kN/m ³ |
|--|--------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Eigen gewicht van belangrijke bouwmaterialen | Water | 1000 | 10 |
| | (Naald) hout | 800 | 8 |
| | Metselwerk | 2000 | 20 |
| | Beton | 2400 | 24 |
| | Glas | 2500 | 25 |
| | Staal | 7850 | 78,5 |

Omrekening van kilo's (kg) naar kiloNewton (kN):

1 kg met $g=9,81 \text{ m/s}^2$ oftewel 1 kg is 9,81 N afgerond 10 N of 0,01 kN.
(g = zwaartekrachtversnelling).

Per vloer

Rustende belasting

- | | | | |
|---|------------------|---|--------------------------------|
| 1. <u>eigen gewicht</u> beton, 300 mm; | $0,3 \times 24$ | = | $7,2 \text{ kN} / \text{m}^2$ |
| 2. <u>afwerkvloer</u> 6 cm beton; | $0,06 \times 24$ | = | $1,5 \text{ kN} / \text{m}^2$ |
| 3. <u>vloerafwerking</u> tapijt, parket, gietvloer | | = | $0,5 \text{ kN} / \text{m}^2$ |
| 4. <u>plafond</u> gipsplaten, systeemplafond | | = | $0,5 \text{ kN} / \text{m}^2$ |
| 5. <u>installaties</u> leidingen, kabels, luchtkanalen en verlichtingsarmaturen | | = | $0,25 \text{ kN} / \text{m}^2$ |
| | | | _____ + |
| | q r.b. | = | $9,95 \text{ kN} / \text{m}^2$ |

Variabele belasting

| | | | |
|--------------------|-----------|--------------------------------|----------------------------|
| Dak | 1,0 | $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ | |
| Woonhuizen | 1,75 | $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ | |
| Kantoren | 2,5 - 3,5 | $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ | (afhankelijk type gebruik) |
| Winkels | 4 | $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ | |
| Theaters / tribune | 5,0 - 7,0 | $\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ | |

| | | |
|---------------------|----------|------------------|
| Veiligheidsfactoren | rustend | $\gamma_F = 1,2$ |
| op de belasting | variabel | $\gamma_F = 1,5$ |

Gewichtsberekening

$$A_{\text{kolom}} = 8,1 \times 5 = 40,5 \text{ m}^2$$

1. Dak

$$\text{Rustend } 1,2 \times 9,95 \times 40,5 = 484 \text{ kN}$$

$$\text{Variabel } 1,5 \times 1,00 \times 40,5 = 61 \text{ kN}$$

2. Woning

$$\text{Rustend } 1,2 \times 9,95 \times 40,5 = 484 \text{ kN}$$

$$\text{Variabel } 1,5 \times 1,75 \times 40,5 = 106 \text{ kN}$$

3. Kantoor

$$\text{Rustend } 1,2 \times 9,95 \times 40,5 = 484 \text{ kN}$$

$$\text{Variabel } 1,5 \times 3,0 \times 40,5 = 182 \text{ kN}$$

4. Winkel

$$\text{Rustend } 1,2 \times 9,95 \times 40,5 = 484 \text{ kN}$$

$$\text{Variabel } 1,5 \times 4,0 \times 40,5 = 243 \text{ kN}$$

$$\text{maximale kolomlast} = \begin{array}{r} \text{-----} \\ 484 + 243 \\ \text{-----} \end{array} + = 2528 \text{ kN}$$

5. Restaurant

$$\text{Rustend } 1,2 \times 9,95 \times 40,5 = 484 \text{ kN}$$

$$\text{Variabel } 1,5 \times 5,0 \times 40,5 = 304 \text{ kN}$$

6. Poer

$$V = 2 \times 2 \times 1 = 4 \text{ m}^3 \times 24 = 96 \text{ kN}$$

$$F \text{ op palen} = \begin{array}{r} \text{-----} \\ 96 \\ \text{-----} \end{array} + = 3414 \text{ kN}$$

We hebben nu, met bovenstaande gewichtsberekening uitgerekend dat de maximale kolomlast (met veiligheid gerekend op de belasting) 2528 kN is en dat de kracht op de palen 3414 kN is. Uitgaande van de vier getekende palen kunnen we vaststellen dat er per paal een kracht van $3414/4$ is 853 kN werkt. Het grondonderzoek zal moeten aantonen dat deze paalbelasting ook echt door de ondergrond gedragen kan worden.

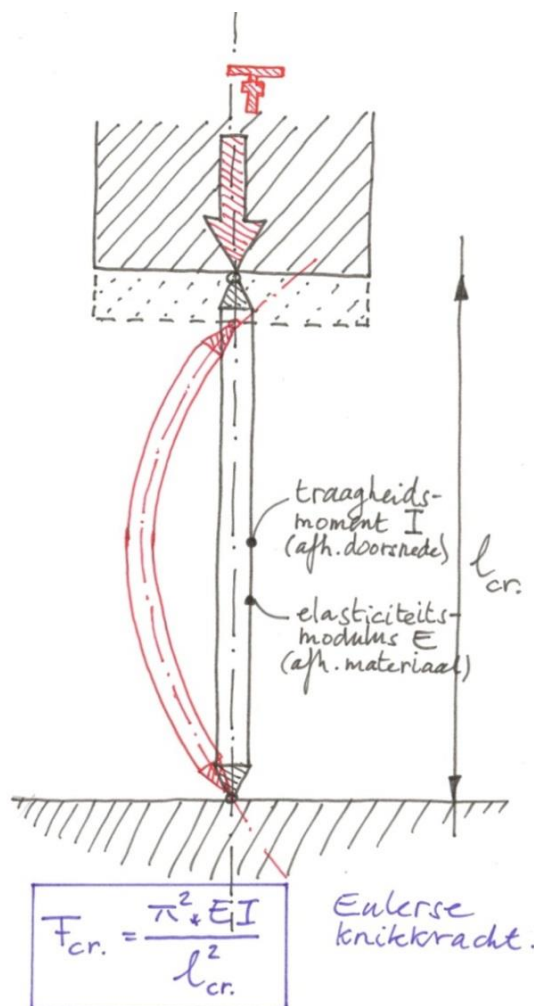
12.2 Knik bij kolommen

De gewichtsberekening hebben we ook nodig om de maximale kolomlast, een drukkracht van 2528 kN in de kolom, te controleren. Die drukkracht kan zich vervelend manifesteren als een knikgevaar voor de kolom. Knik is de enige bezwijkvorm van een constructie die plotseling optreedt.

Waarschuwt een te veel doorbuigende balk voor mogelijk bezwijken door scheuren of barsten, aan een kolom is tot zelfs vlak voor het uiteindelijke bezwijken, niets te zien: opeens knikt de kolom uit en bezwijkt de constructie meteen met fataal gevolg.

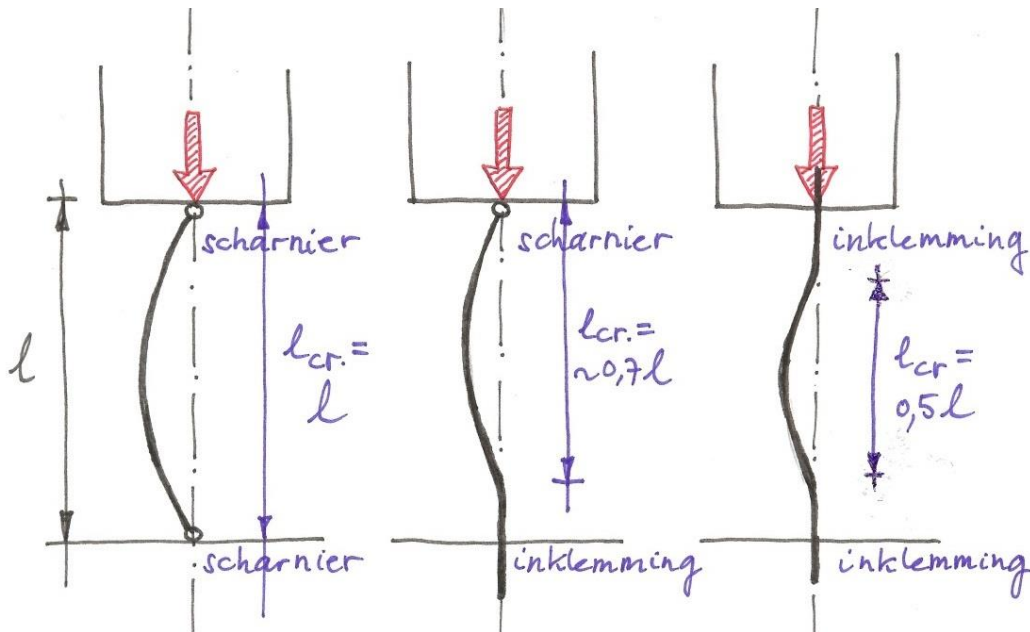
Dit uitknikken is het zijdelings weg buigen van de constructie omdat de kolom in die richting heel weinig weerstand kan bieden aan zijdelings weg buigen. Knik ontstaat omdat we nooit alles netjes precies boven op elkaar kunnen zetten. Een kleine excentriciteit is al genoeg om de kolom een klein beetje uit te buigen en dat roept knikken bij toenemende drukkracht op. Ook is een kolom nooit helemaal recht maar zal altijd een beetje bolling vertonen en ook die onvolkomenheid roept knikgevaar op. De wiskundige Euler heeft in de negentiende eeuw al afgeleid dat de kracht waarbij een kolom uitknikt afhankelijk is van drie eigenschappen:

1. het materiaal waarvan de kolom gemaakt is, de elasticiteitsmodulus E
2. de vorm van de doorsnede, het oppervlakte traagheidsmoment I
3. de lengte van de effectieve knikvorm, de kritische lengte, in het kwadraat.



De Eulerse knikkracht en de hierbij behorende bezwijkvorm.

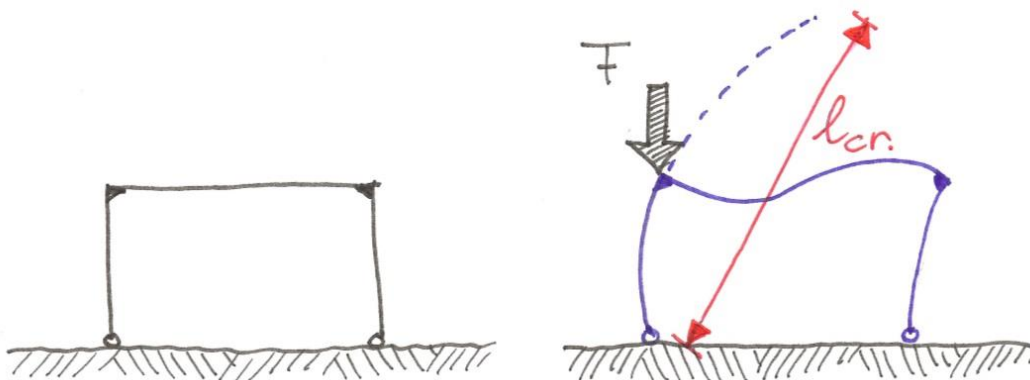
Die bijbehorende bezwijkvorm hoeft nog toelichting. De vorm waarin een kolom uitknikt, hangt af van de wijze waarop de uiteinden van de kolom zijn vastgemaakt. Dat kan zijn zoals we al geleerd hebben; een scharnier of een inklemming (een rol kan ook maar vereist andere bevestigingen om het bij de kolom behorende gebouw stabiel te laten zijn). De mate waarin een kolomuiteinde kan verdraaien, vrij bij een scharnier en niet bij een inklemming, bepaalt de effectieve ontstane kniklengte die wij de kritische kniklengte noemen.



Effectieve kniklengte drie basis knikgevallen, afhankelijk van de bevestigingssoort.

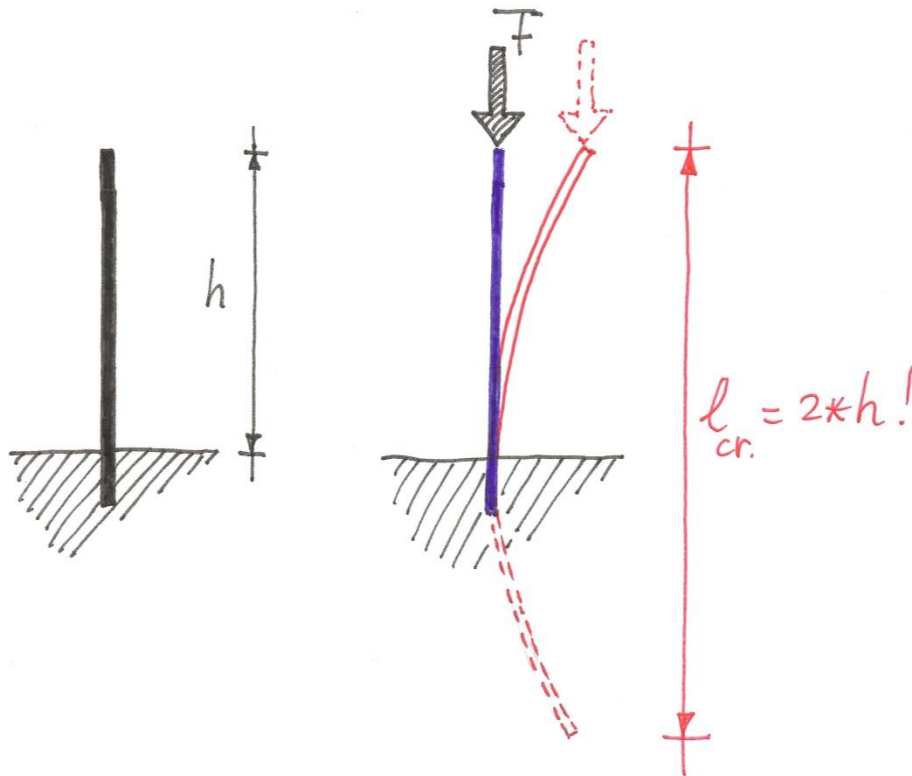
We kunnen zien dat een inklemming een belangrijke hogere knikkracht geeft te zien. Vergeleken met de twee keer scharnierbevestiging heeft de twee keer inklemmingbevestiging slechts een kritische kniklengte van $0,5 \times$ lengte l . Dit betekent ingevuld in de formule van Euler een vier keer zo grote kniklast oftewel vier keer meer drukkrachtcapaciteit voor de kolom!

Gezien die gevoeligheid moeten we met knik heel voorzichtig omgaan. Verstandige constructeurs blijven ver uit de buurt van de kolomlast waarbij een kolom kan uitknikken. In de praktijk is een factor 5 gebruikelijk. Dit ook omdat uit de hierbij afgebeelde kniklengte van een portaal (= twee kolommen verbonden door een balk) de kniklengte tot grote waarden kan oplopen!



Kniklengte portaalstijlen.

Tot slot de enkele staaf slechts aan één zijde ingeklemd. Dit is eigenlijk het statische model van ieder hoog gebouw op de wereld. Aan de onderzijde stevig ingeklemd in de fundering, bovenin vrij om te bewegen. Deze laatste vrijheid uit zich ook in de kritische kniklengte die in dit geval twee keer de hoogte is, zoals in onderstaand figuur is af te leiden.



Kniklengte ingeklemde kolom.

Controle kolom uit de gewichtsberekening.

Laten we de kolom uit onze gewichtsberekening eens controleren op knik. Uitgangspunten voor knikberekening volgens de formule van Euler.

Maximale kolomlast

De rekenwaarde (dat is de belasting vermenigvuldigd met de veiligheidsfactoren, 1,2 voor de rustende belasting en 1,5 voor de variabele belasting) is 2528 kN.

Kolomafmetingen

Kolom vierkant 300 mm in doorsnede; hieruit berekenen we het oppervlakte

traagheidsmoment: $I = \frac{1}{12} \times b \times h^3 = 675 \times 10^6 \text{ mm}^4$

Materiaal

Beton met een elasticiteitsmodulus van 25.000 N/mm².

Kniklengte

Altijd lastig bij beton. Hier zal de kolom aan de onderkant wel goed vast zitten in de funderingspoer. We rekenen dus met een inklemming. Bovenin aan de vloer zal de

vloer relatief makkelijk kunnen verdraaien; reken daarom daar een scharnier. Hieruit volgt dat de te rekenen kniklengte 0,7 maal de lengte van de kolom zal zijn oftewel $0,7 \times 5$ meter is 3,5 meter.

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_{cr}^2}$$

$$l_{cr} = 0,7 \cdot 5 \text{ m} = 3,5 \text{ m}$$

Nu is het het handigst om alle waardes in de formule in te vullen in het N-mm-s-stelsel; alles dus in Newton, millimeter en seconde. Je krijgt het antwoord dan in Newton en je maakt geen vervelende vergissingen in de grootte van de in te vullen waardes. Dit moet ingevuld worden in de formule van Euler:

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{l_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 25000 \cdot 675 \times 10^6}{2500^2} = 13,6 \times 10^6 \text{ N} = 13600 \text{ kN}$$

Vergeleken met de rekenwaarde van de kolomlast die we in de gewichtsberekening hebben afgeleid een waarde van $13600 / 2528 = 5,38$ keer zo groot. Afdoende veilig dus gezien alle onzekerheden. De kolom is dus veilig gedimensioneerd.

Toch de nieuwsgierige vraag bij welke kolomafmetingen de kolom nog maar net zou voldoen. Dan moet je in de formule van Euler $F_{cr} = 2528 \times 10^3$ invullen en de I als onbekende beschouwen.

$$I = \frac{F_{cr} \cdot l_{cr}^2}{\pi^2 \cdot E} = \frac{2528 \times 10^3 \cdot 3500^2}{\pi^2 \cdot 25000} = 105 \times 10^6$$

Bij een vierkante kolom geeft dit een afmeting van 197 mm. Een kolom van 200×200 mm zou dus maar krap aan veilig zijn. Maar als we beseffen dat de kolom nooit helemaal recht zal staan, dat een elektricien er een gat doorheen kan boren voor een kabel, dat er karretjes misschien tegen aan kunnen rijden etc. etc. dan is het verstandig bij de 300×300 kolom te blijven!

13 Stabiliteit

We gaan ons nu bezighouden met het ontwerpen van een constructief gezien gezonde hal; een laag gebouw dus. De hoofdconstructie van de hal wordt opgebouwd uit alleen balken en kolommen. Hier tegen aan worden de gevels en het dak bevestigd. Het grootste probleem dat we moeten oplossen is de stabiliteit; hoe zorgen we ervoor dat bij een stevige storm de hal niet als een kaartenhuis in elkaar stort? Eigenlijk is Instabiliteit het bezwijken van de hoofdconstructie ten gevolge van horizontale belasting. Als een hoofdconstructie in staat is om (afdoend) horizontale krachten op te nemen, is de constructie automatisch stabiel. Waar kunnen die horizontale krachten vandaan kan komen?

Ten eerste natuurlijk de **windbelasting**. Ten gevolge van de ongelijke opwarming door de zon van het aardoppervlak ontstaan er luchtdrukverschillen in de atmosfeer en de lucht van de atmosfeer gaat zich daar door verplaatsen van hoge drukgebieden naar lage drukgebieden. De beweging noemen we de wind en, als het luchtdrukverschil groot is, een storm. De lucht die tijdens een storm zich verplaatst botst tegen ons gebouw op en geeft een horizontale druk (aan de voorkant) of trek (aan de achterkant). Deze druk geeft een bij storm behoorlijk grote horizontale kracht op het gebouw.

Ten tweede de **excentriciteiten** in het gebouw doordat alles niet recht boven elkaar gezet wordt of precies loodrecht gebouwd kan worden. Dat is geen falen van de aannemer, dat is nu eenmaal onvermijdelijk. Kolommen staan altijd enigszins uit het lood en willen daar alleen al door omvallen en balken liggen niet altijd precies boven op de kolom maar er net naast en geven door de excentriciteit een 'omval'-kracht. Onderschat dit niet! In de Normen staat dat we van het totale gebouwgewicht 5% als horizontale kracht op het gebouw moeten zetten om dit effect van niet perfect bouwen veilig te kunnen verwerken.

Ten derde **aardbevingen**. In Nederland gelukkig niet aan de orde op een klein schokje ten gevolge van aardgaswinning na maar in het buitenland des te gevaarlijker. Het bijzondere van een aardbeving is dat de ondergrond opeens (vooral) horizontaal gaat bewegen. Een gebouw is groot en zwaar en opeens wordt de ondergrond/ de fundering weggeschoven. Dit levert grote krachten en buiging in de constructie op, die opgenomen moeten kunnen worden. We kunnen hier aan rekenen door afhankelijk van het aardbevingsrisico een bepaald gedeelte van het gebouw gewicht als horizontaal aangrijpende, gelijkmatig over de hoogte verdeelde belasting te zetten. In notoire aardbevingsgebieden zoals Japan, Haïti en California kan dat tot 60% van het gebouwgewicht oplopen!

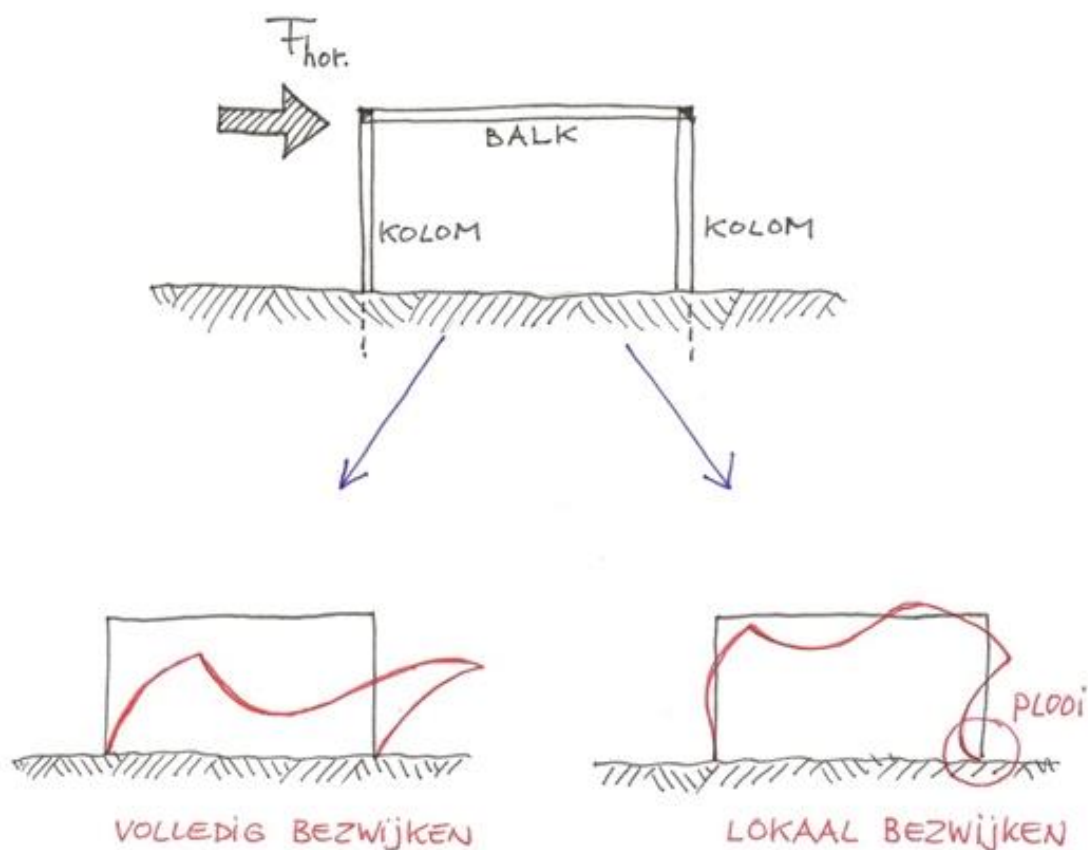
Ten vierde **aanrijdingen of botsingen**. Het zal niet de eerste keer zijn dat een vrachtauto of een bus door een ongelukkig uitgevoerde parkeerbeweging of door verlies van de macht van het stuur tegen een gebouw aan botst. Als dit door de locatie van een gebouw kan gebeuren moet de hoofdconstructie van het gebouw de door de botsing veroorzaakte horizontale krachten op kunnen nemen.

Als vijfde en laatste oorzaak voor het oproepen van horizontale belastingen moeten **explosies** genoemd worden. Ontstaan ten gevolge van een gasexplosie of een bom (terroristische aanslag) kunnen er grote horizontale belastingen op een gebouw

uitgeoefend worden. Hoe raar het misschien ook klinkt, je kunt een gebouw hierop uitrekenen. Alles zal wel heel zwaar en stevig moeten zijn maar het kan.

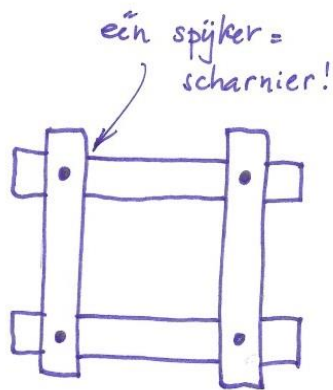
Hoe en waarom kan een constructie bezwijken op instabiliteit?

Wat kan er allemaal misgaan bij instabiliteit? Ten eerste kan alles omvallen, waarbij vormverlies kan optreden; instorten dus en ten tweede de vorm blijft behouden maar een onderdeel bezwijkt waardoor het geheel omvalt of kantelt. Ook kan er lokaal iets misgaan. Een balk of kolom kan knikken waardoor alles zijn samenhang verliest of een onderdeel kan plooiën en daardoor zijn vorm en stabiliteit aantastten. Als een gebouw bezwijkt, is dat omdat het niet meer in staat is zijn vorm overeind te houden. Er ontstaat een **mechanisme** en het gebouw zakt in elkaar.

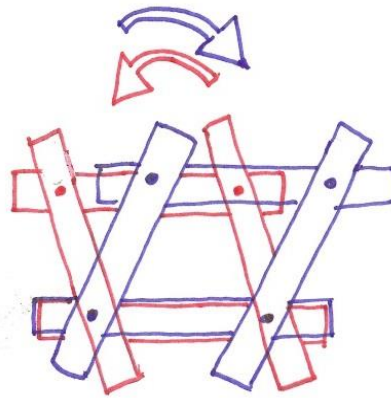


Ontstaan van een mechanisme. Links bezwijkt het portaal volledig: alle elementen bezwijken, rechts bezwijkt het zwakste gedeelte, in dit geval plooi onderin de kolom bij de fundering.

Hoe kan een mechanisme ontstaan? Daarvoor is de aanwezigheid van een aantal scharnieren in de constructieverbindingen noodzakelijk. Het voorbeeld, hieronder afgebeeld, van 4 houten latten met slechts één spijker per verbinding (dus een scharnier) aan elkaar bevestigd illustreert dat het beste.

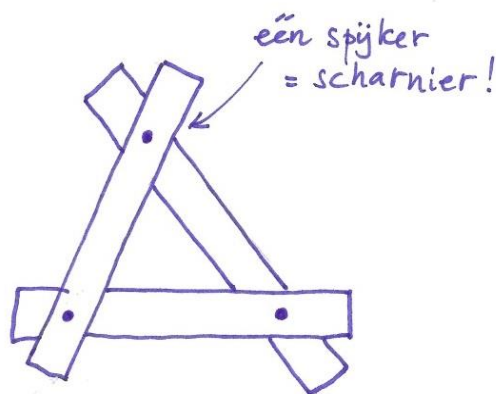


recht hoek/
vierkant



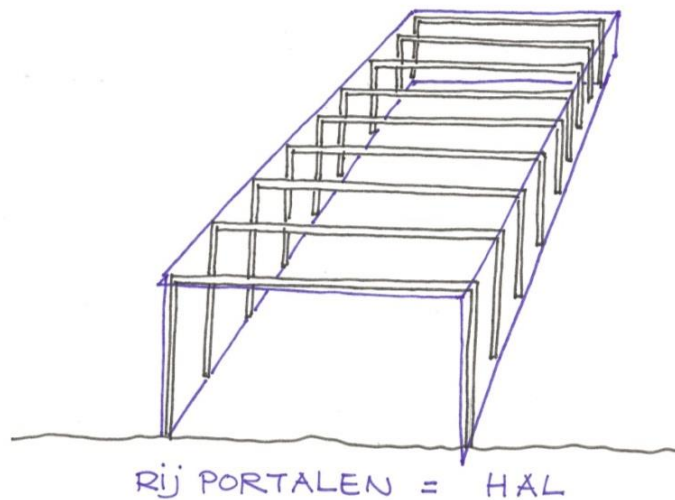
bewegelijk; niet
stabiel!

Het vierkant van 4 aan elkaar gespijkerde latten is niet stabiel. Bij de kleinste kracht erop uitgeoefend, beweegt het alle kanten op. Een rechthoek of vierkant is niet stabiel! Nemen we echter 3 houten latten die we met één spijker verbinden (dus een scharnier) dan kunnen we krachten uitoefenen op de aan elkaar gespijkerde 3 latten zonder dat er vervorming optreedt. De driehoek is stabiel!

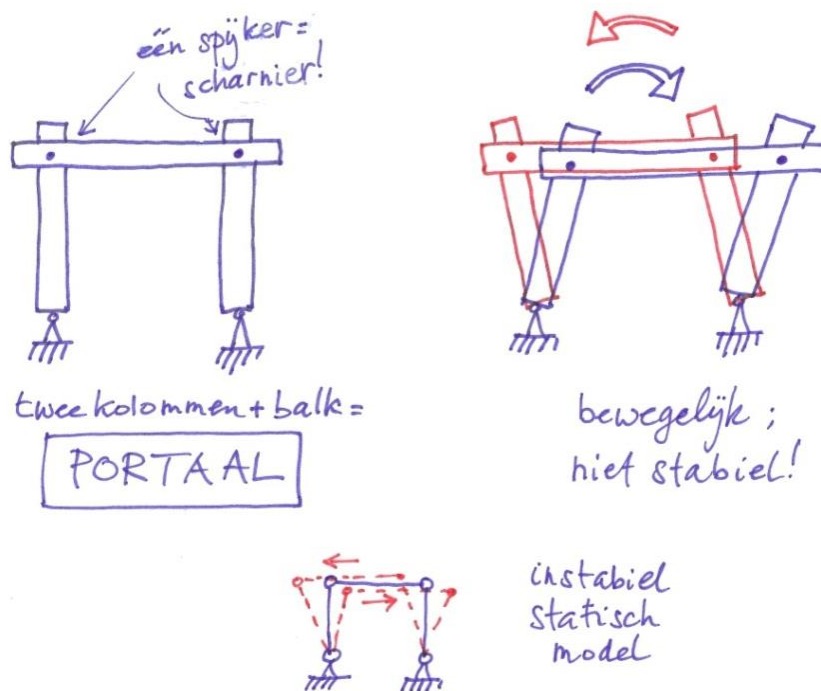


driehoek
onbewegelijk; stabiel!

Dit is een zeer belangrijke les: *elke constructie die opgebouwd is uit driehoeken is automatisch stabiel!!!* Laten we nu kijken naar de meest elementaire constructie die we kunnen maken; een portaal of twee kolommen met daarop een balk. Zetten we een aantal portalen achter elkaar dan ontstaat als vanzelf het eerste echte gebouw; een hal, die we compleet kunnen maken door er een dak op te leggen en gevels tegen aan te bevestigen.

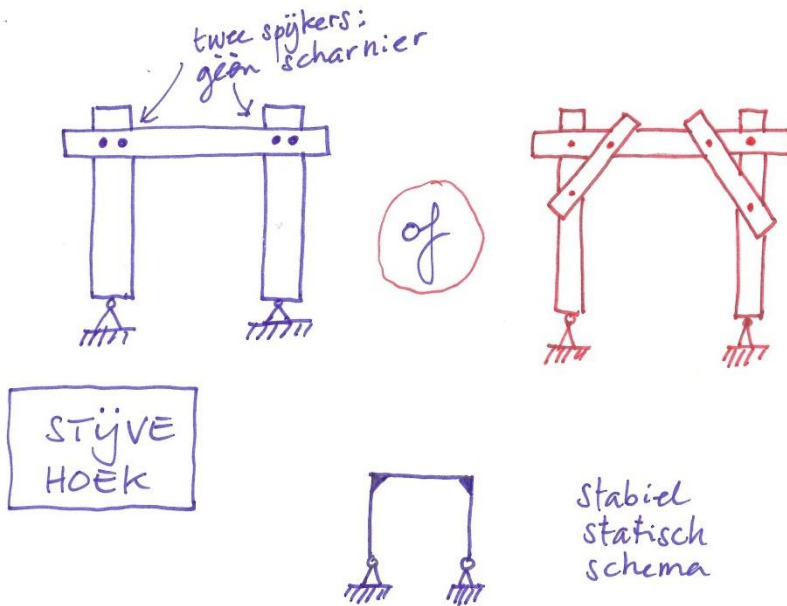


Verbinden we de kolommen en de balk met één spijker dan ontstaat ter plekke van de verbinding een scharnier en krijgen we weer een mechanisme; een instabiele constructie.



Hoe kunnen we dit verbeteren? Door de constructie uit driehoeken te maken zoals we net geleerd hebben maar dat zou het functioneren van het portaal, de hal aantasten; je kunt er niet meer doorheen lopen. Maar we kunnen ook de verbinding zelf aanpakken door er voor te zorgen dat er geen scharnier kan ontstaan. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren door twee spijkers door de latten te slaan. Automatisch is dan verdraaiing geblokkeerd en functioneert de verbinding als (niet zo sterke) inklemming. Een andere manier om dat te bereiken is een latje over de hoek aan te brengen. Ook dan wordt de verbinding geen scharnier maar een inklemming. Beide oplossingen noemen we ook wel 'een stijve hoek'.

Door de stijve hoek is het portaal weer stabiel geworden!



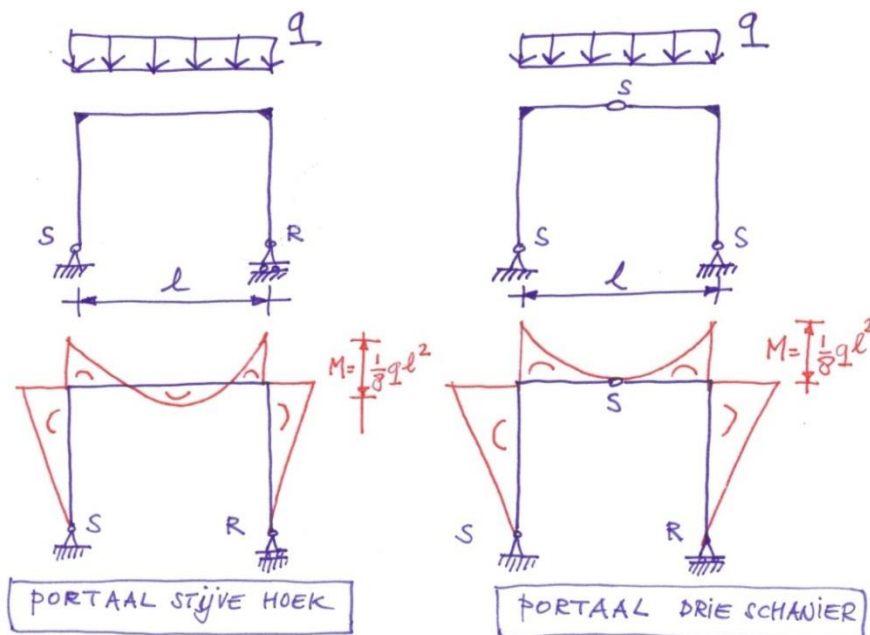
Twee methoden om een portaal stabiel te krijgen:

met een versterkte verbinding tussen kolom en balk die ook een buigend moment kan opnemen en

door de verbinding tot een driehoek te maken door een extra staaf toe te voegen.

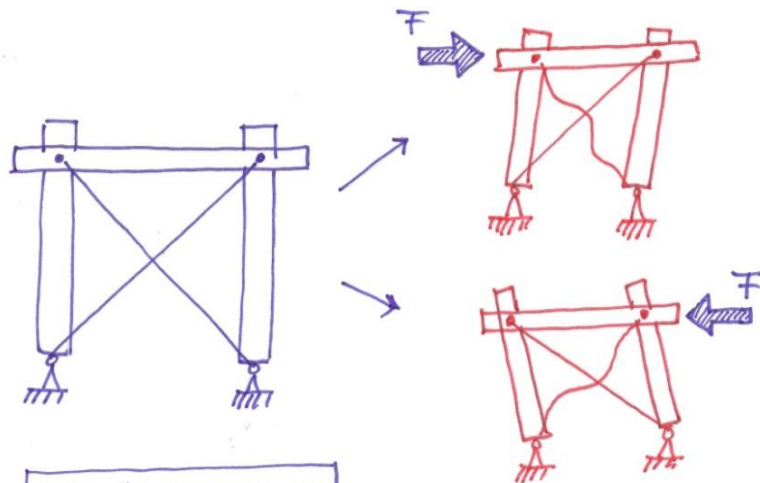
Er is nog een verrassende manier om een stabiel portaal te maken: het zogenaamde **driescharnierspant**. Hierbij is er een extra scharnier in het midden van de balk van het portaal aangebracht (en natuurlijk de twee stijve hoeken!).

Dit ziet er een beetje raar uit, een extra scharnier en nog wel in het midden van de balk. Maar het geheel is stabiel en als je nadenkt over montage van het portaal zul je inzien dat het soms handig is om twee losse delen aan te voeren op de bouwplaats en ter plekke alleen het scharnier te verbinden om een functionerend portaal te krijgen. Dit in tegenstelling tussen een portaal met stijve hoeken. Juist die stijve hoeken vragen veel montagewerk en tijdelijke ondersteuning op de bouwplaats.



De buigende momentenlijnen voor het stijve hoek-portaal en het drie scharnierspant.

Let erop dat het driescharnierspant veel hogere buigende momenten bij gelijke belastingen krijgt te verwerken!

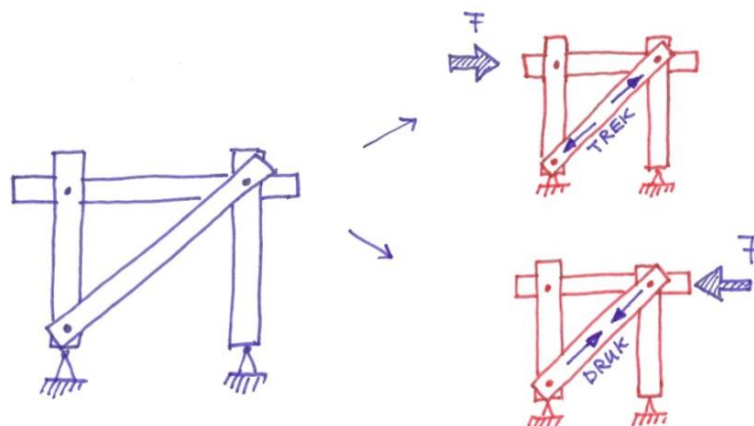


KRUISVERBAND

met kabels die alleen trek kunnen opnemen.

Zijn er nog meer mogelijkheden om een portaal, gemaakt uit alleen kolommen en balken stabiel te krijgen? Ja, natuurlijk door er driehoeken van te maken zoals we aan het begin van dit hoofdstuk hebben geleerd. Dat kan op twee manieren; ten eerste met een kruisverband van twee diagonalen en ten tweede in de meest pure (driehoek-) vorm: één diagonaal of zoals we dat meestal noemen, een schoor.

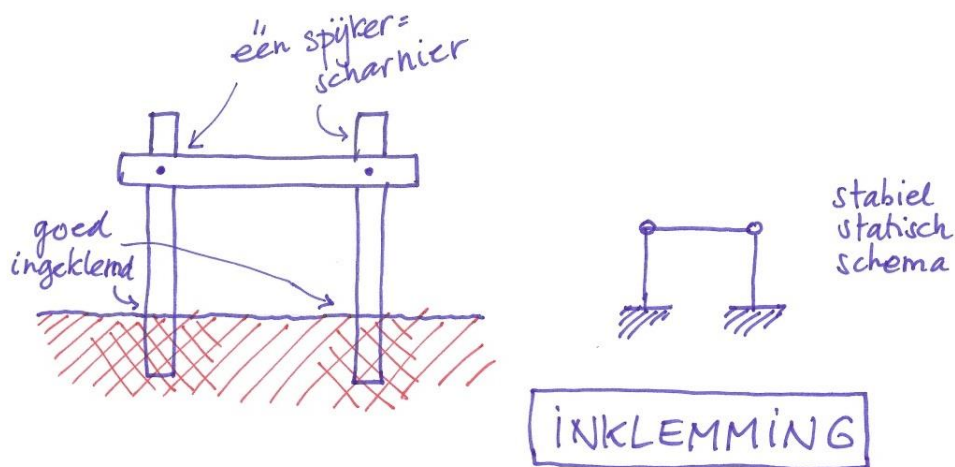
Aangezien de wind van links of van rechts kan komen, verandert het teken van de kracht (trek = + en druk = -) in de desbetreffende diagonalen of schoor. In de tekeningetjes kun je zien hoe dat werkt. Een kruisverband kunnen we uit kabels vervaardigen. Er is immers altijd één die onder trek komt te staan (de andere kabel waar eigenlijk druk in zou moeten ontstaan, kan dit niet aan en bungelt er slap bij). Bij een schoor komt er zowel druk als trek in (afhankelijk van de windrichting) daardoor moet de schoor stevig zijn om uitknikken onder druk te vermijden. Besef wel dat het aanbrenge van kruizen weliswaar constructief heel goed werkt maar functioneel, voor het gebruik van de hal bijvoorbeeld een ramp is. De kruizen blokkeren de doorgang vandaar dat we bijna altijd de kruizen in de gevels en de tussenmuren of scheidingswanden aanbrenge.



SCHOOR

trek of druk diagonaal

Na de stijve hoek en het kruisverband of de schoor is er een derde methode om ons portaal stabiel te krijgen en dat is alle kolommen in de fundering inklemmen.



Door alle kolommen in te klemmen is het gebouw stabiel. De windbelasting wordt nu namelijk door buiging van de in de fundering ingeklemde kolommen opgenomen. Hiervoor is het noodzakelijk een zo groot mogelijk aantal kolommen goed in te klemmen daar dan de relatief grote windkrachten goed verspreid kunnen worden en per kolom maar een geringe bijdrage aan de buiging van de kolom geven.

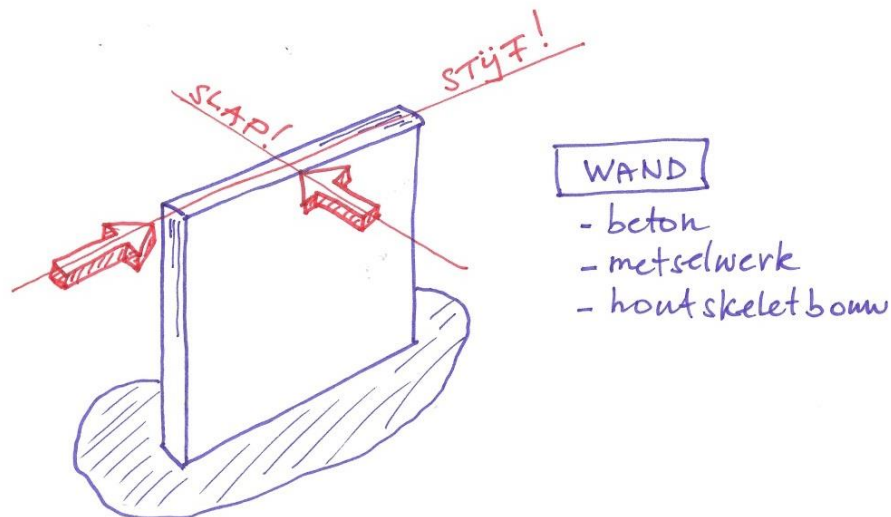
Resumerend hebben we drie constructieve mogelijkheden om een rij achter elkaar staande portalen (portaal = twee kolommen en een balk eroverheen) stabiel te maken:

1. stijve hoeken maken in de verbinding kolom-balk.
2. driehoeken maken; het kruisverband of de schoor.
3. elke kolom inklemmen in de fundering.

Natuurlijk kunnen deze drie methoden om een rij portalen (=een hal) stabiel te maken met elkaar gecombineerd worden. De windkrachten worden dan verdeeld en de constructie is in totaliteit lichter in gewicht maar bewerkelijker in uitvoering.

Verder is er nog een mogelijkheid om de rij portalen, de hal, stabiel te krijgen maar daarvoor moet een nieuw constructie-element worden ingevoerd: de wand of muur vervaardigd uit metselwerk, beton of houten elementen, de zogenaamde *houtskeletbouw*. *Houtskeletbouw* is de methode waarbij uit houten balken en multiplexplaten stevige panelen worden gemaakt die als wand, dak of vloer aan elkaar gezet worden tot een gebouw. Vooral de huizenbouw in Noord Amerika wordt op deze manier gemaakt. Vanwege de grote mate van prefabricage in de werkplaats of fabriek is de montage op de bouwplaats snel te doen en schieten de huizen binnen een paar dagen uit de grond.

Besef heel goed dat een wand slechts in zijn vlak stijf en sterk is. Daar loodrecht op kan hij makkelijk bewegen en dus weinig windkracht opnemen.

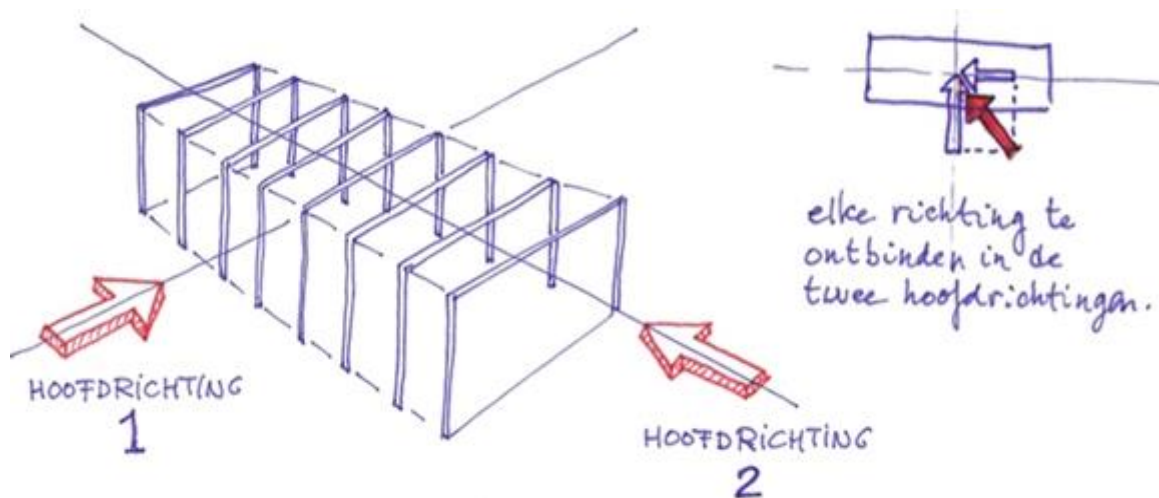


Stabiliteit laagbouwgebouwen

We hebben het hier over laagbouwgebouwen en dat zijn eigenlijk alle gebouwen met maximaal twee, soms drie verdiepingen. Daarboven zijn het, je raadt het al, hoogbouwgebouwen en daarbij moet er voor de stabiliteit (= opname capaciteit horizontale krachten) serieuzere maatregelen genomen worden. Voor laagbouwgebouwen zijn hiervoor drie mogelijkheden om een rij portalen, ons eerste primitieve gebouw, een hal, stabiel te krijgen. Dat waren:

1. stijve hoeken maken,
2. kruizen aanbrengen en
3. kolommen inklemmen.

Maar hoeveel stabiliteitselementen moeten we aanbrengen en waar? Voor een correcte analyse hiervan is het belangrijk te beseffen dat elk gebouw van alle kanten door de wind belast kan worden. Betekent dat ook dat we alle windrichtingen moeten nagaan? Nee, voor elk gebouw zijn de hoofdrichtingen vast te leggen en dat zijn de *langsrichting* en de *dwarsrichting*.

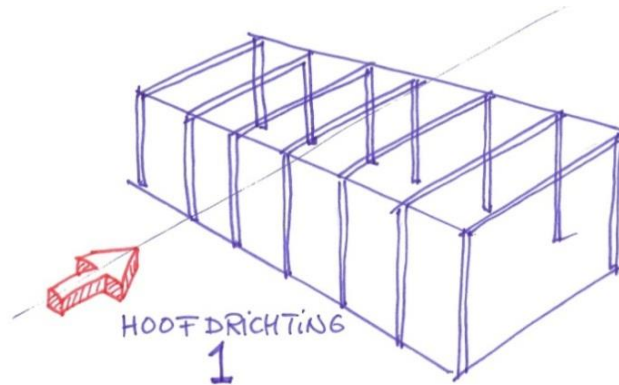


De twee hoofdrichtingen: **1** de dwars- en **2** de langsrichting van een gebouw.

Als je in deze twee hoofdrichtingen de opnamecapaciteit voor horizontale krachten hebt gecontroleerd, is het gebouw stabiel voor alle richtingen. De verklaring hiervoor is dat iedere kracht uit wat voor richting dan ook in de twee hoofdrichtingen ontbonden/verdeeld kan worden. De twee hoofdrichtingen: de langs- en de dwarsrichting van ieder gebouw.

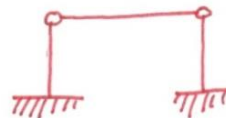
Analyse hoofdrichting 1; stabiliteit in dwarsrichting

De langsgevel (tevens de grootste/ langste gevel) wordt door de wind belast. Of eigenlijk moeten we zeggen langsgevels want de ene langsgevel wordt door de wind op winddruk belast en de andere op trek door de windzuiging. Het nog los staande stelsel van portalen moet deze horizontale krachten kunnen opnemen en niet omvallen (= onstabiel zijn). Natuurlijk wordt de hal compleet gemaakt door de gevels en het dak tegen of op de portalen aan te brengen maar dit is een dermate slappe constructie (losse platen) dat deze niet zonder versterkende maatregelen de stabiliteit kunnen verzorgen.



DRIE MOGELIJKHEDEN;

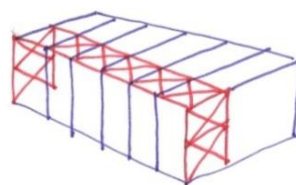
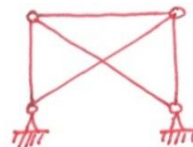
① INKLEMMING



② STIJVE HOEK



③ AFKRUIZEN
; WINDVERBAND
of WINDBOK



Welke mogelijkheden hebben we in deze hoofdrichting om het losse stelsel van portalen te 'stabiliseren'? Dat zijn er drie, waarbij we gebruik maken van de aanwezigheid van de portalen die in langsrichting belast gaan worden door de windkrachten.

Ten eerste kunnen we de kolommen inklemmen, zoveel al maar mogelijk is om de windkrachten zoveel mogelijk te verspreiden want de kolommen zullen door buiging de horizontale krachten moeten opnemen.

Ten tweede kunnen we de portalen in hun vlak sterk en stijf genoeg maken door de verbinding tussen balk en kolom constructief goed te verbinden: de stijve hoek, eigenlijk de verbinding blijft bij belasting een rechte (90 graden) hoek.

Ten derde kunnen we weer driehoeken maken, de meest materiaal economische oplossing. Maar waar moeten we die driehoeken, de windkruizen plaatsen? Voor de beschouwde hoofdrichting; de dwarsrichting, moeten de windkruizen in de gevels daar loodrecht op staan. Zodoende worden de windkruizen in hun sterke richting belast. De gevels zijn nu sterk genoeg maar het dak nog niet. Daarom moeten we in het dakvlak een liggend windkruis of eigenlijk kruizen naast elkaar aanbrengen. Deze kruizen naast elkaar noemen we een (liggend) vakwerk.

Analyse hoofdrichting 2; stabiliteit in langsrichting

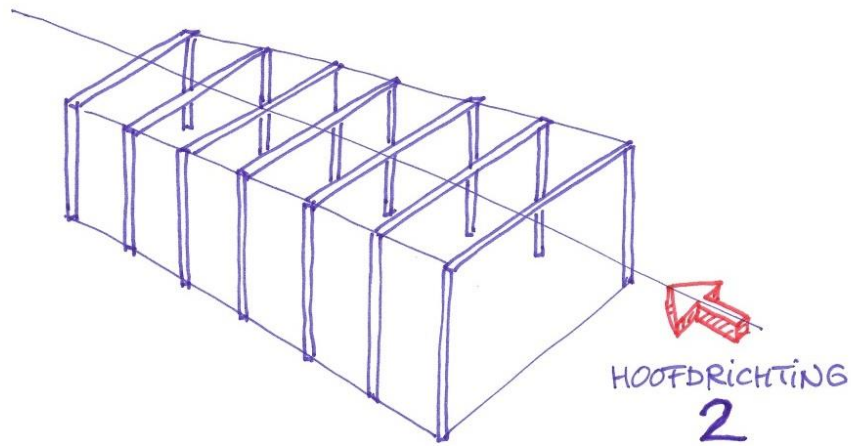
Nu gaan we de stabiliteit in de richting loodrecht op de vorige richting bekijken, in de langsrichting. Nu valt op dat de portalen door de windkrachten loodrecht op hun vlak belast worden. Omvallen kan nu wel heel eenvoudig voor de portalen. Dit is ook tijdens de montage van een hal de meest kritieke richting waarvoor afdoende tijdelijke steunconstructies moeten worden aangebracht.

We hebben dan ook de volgende mogelijkheden over.

Ten eerste de kolommen inklemmen: wederom zoveel mogelijk kolommen om de horizontale krachten zoveel mogelijk te verspreiden.

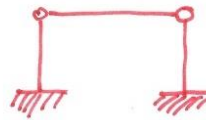
Ten tweede afkruisen: ook hier moeten de windkruizen in de gevels loodrecht op de beschouwde richting geplaatst worden. Ook het dak moet weer door een (liggend) vakwerk afdoende sterk en stijf gemaakt worden om de krachten ten gevolge van de wind op te kunnen nemen en door te geven aan de windkruizen in de gevelvlakken.

Een derde mogelijkheid, zoals bij de vorige hoofdrichting, de portalen van een stijve hoek te voorzien werkt niet omdat de portalen loodrecht op hun vlak belast, hier geen sterkte aan kunnen ontleneren in deze hoofdrichting. Je zou kunnen overwegen om in het dakvlak horizontale koppelbalken tussen de portalen aan te brengen zodat er een rij portalen in de langsgevels ontstaat maar dit gebeurt in werkelijkheid zelden omdat afkruisen of inklemmen kolommen veel minder materiaal vergt en veel sneller te monteren is.

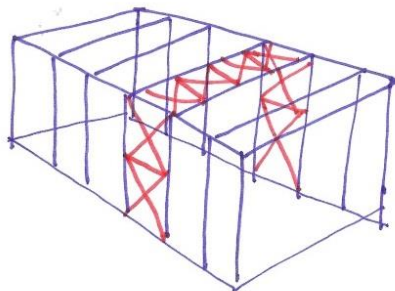
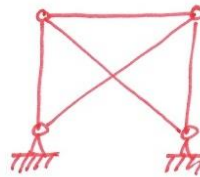


TWEE MOGELIJKHEDEN ;

① INKLEMMING



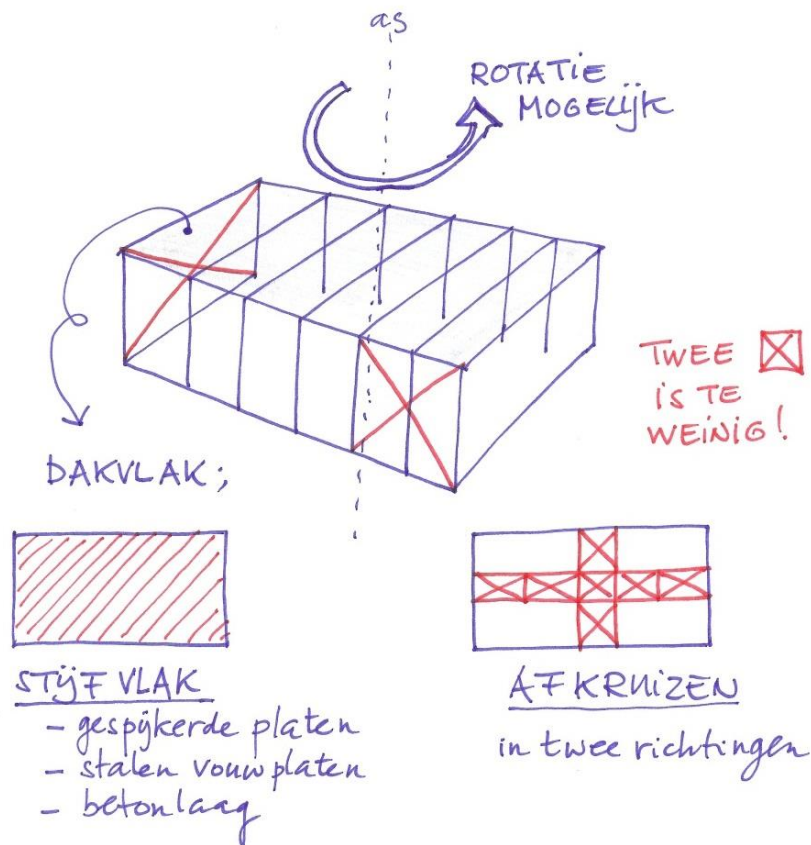
② AFKRUIZEN
WINDVERBAND
OF WINDBOK



Andere aspecten betreffende stabiliteit laagbouwen

We hebben nu geleerd dat als we in de twee hoofdrichtingen stabiliteitsvoorzieningen aanbrengen we het gebouw in zijn geheel stabiel hebben gemaakt. Toch ligt er nog een gevaar op de loer dat de stabiliteit van het gebouw in gevaar kan brengen. Dat is rotatie instabiliteit. Dat kan bijvoorbeeld ontstaan als we super zuinig willen zijn (geen cent te veel) met onze constructievoorzieningen.

Als we bijvoorbeeld redeneren; één windkruis in hoofdrichting 1 en één windkruis in hoofdrichting 2 dan hebben we op papier een stabiel gebouw. In werkelijkheid is dat niet zo want het gebouw kan nog roteren om het punt waar de werklijnen (de sterke richting) van de twee windkruizen elkaar snijden!



Wel kunnen we op iets ander bezuinigen: het verstijven van het dakvlak. We hebben geleerd dat dit door twee liggende vakwerken in het dakvlak verzorgd moet worden. Maar vaak blijkt het mogelijk de stijfheid van het dakvlak in zijn vlak zelf (dus niet loodrecht erop!) te mobiliseren. Hierbij moet er wel voor gezorgd worden dat deze stijfheid zich ook kan ontwikkelen.

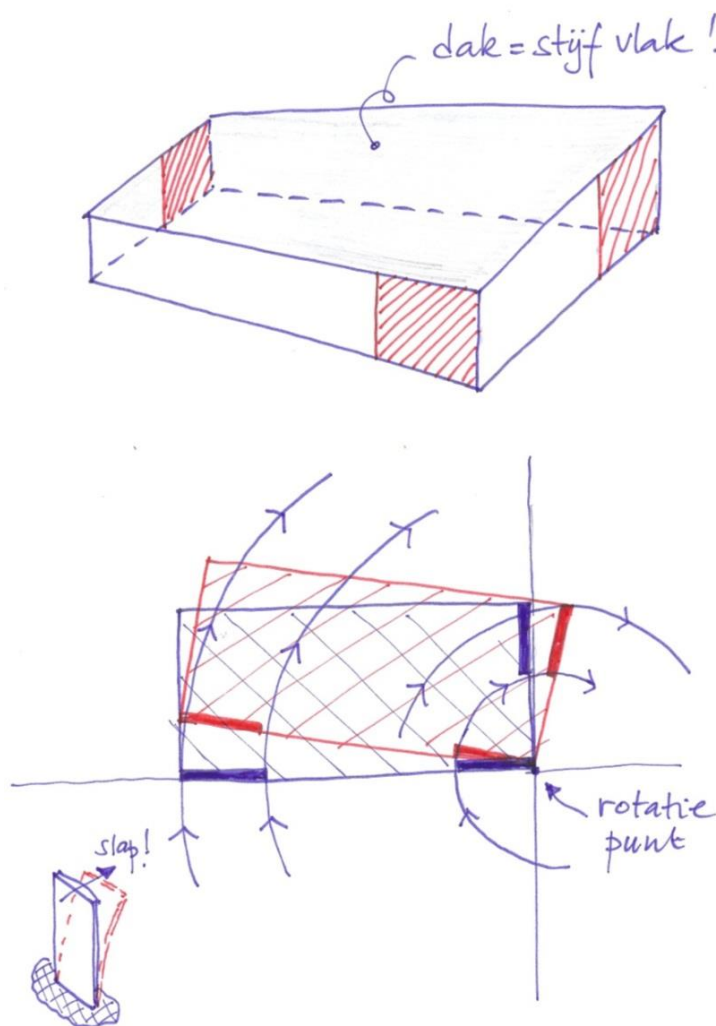
Bij een houten dak moeten de op de balken van het dak gespijkte multiplex platen met een afdoend aantal spijkers vastgezet worden (ten behoeve van overdracht schuifkracht). Ook moeten de platen in twee lagen op elkaar worden aangebracht, met *verspringende naden*, om verschuiven van de (zwakkere) naden te vermijden. Bij daken van stalen vouwplaten gemaakt, moeten de relatief dunne staalplaten met veel verbindingsmiddelen aan de stalen balken van het dak bevestigd worden, wederom om de schuifkrachten tussen dakplaten en dakbalken ten gevolge van de horizontale windkrachten te kunnen overbrengen. Bij betonnen daken is de stijfheid in het vlak van het dak automatisch door het beton verzorgd. Het beton ligt als een grote massieve schijf op het dak. Wel moet er afdoende wapening in zitten om de samenhang bij scheuren ten gevolge van overschrijding van de treksterkte in beton door de wind of andere belastingen te kunnen blijven garanderen.

Inzake het vermijden van rotatie instabiliteit is het essentieel aan de volgende algemeen geldende eis te voldoen:

Een gebouw is pas stabiel als er minimaal drie schijven / vlakken sterk en stijf genoeg zijn en de werklijnen van deze schijven / vlakken niet door één punt gaan.

Eén belangrijke opmerking: drie is weliswaar het minimum (en niet door één punt!) maar voor een redelijk groot gebouw betekent dit wel dat deze drie stabiliteits-elementen, waarvan er misschien maar één in een hoofdrichting werkzaam is, alle horizontale krachten van de wind krijgen te verwerken. Dat betekent veel materiaal in een stabiliteits-element; een niet zo economische oplossing. Beter is het daarom bij een groter gebouw een aantal stabiliteits-elementen aan te brengen. Zo wordt de totale horizontale kracht beter verdeeld, en met minder materiaal gebouwd kan worden. Tevens kan er ook zonder directe problemen iets aan de stabiliteit veranderd worden, een element verwijderen of verplaatsen.

ELK GEBOUW IS MET MINIMAAL DRIE SCHIJVEN/VLAKKEN STABIEL TE MAKEN; MITS ZE NIET DOOR EÉN PUNT GAAN.

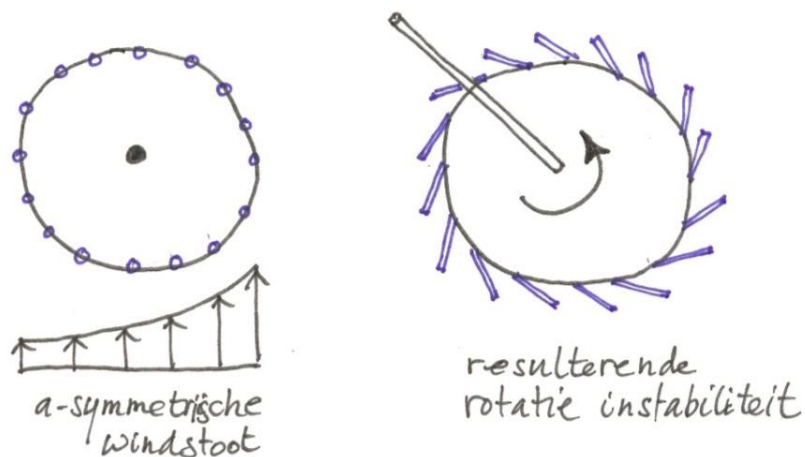
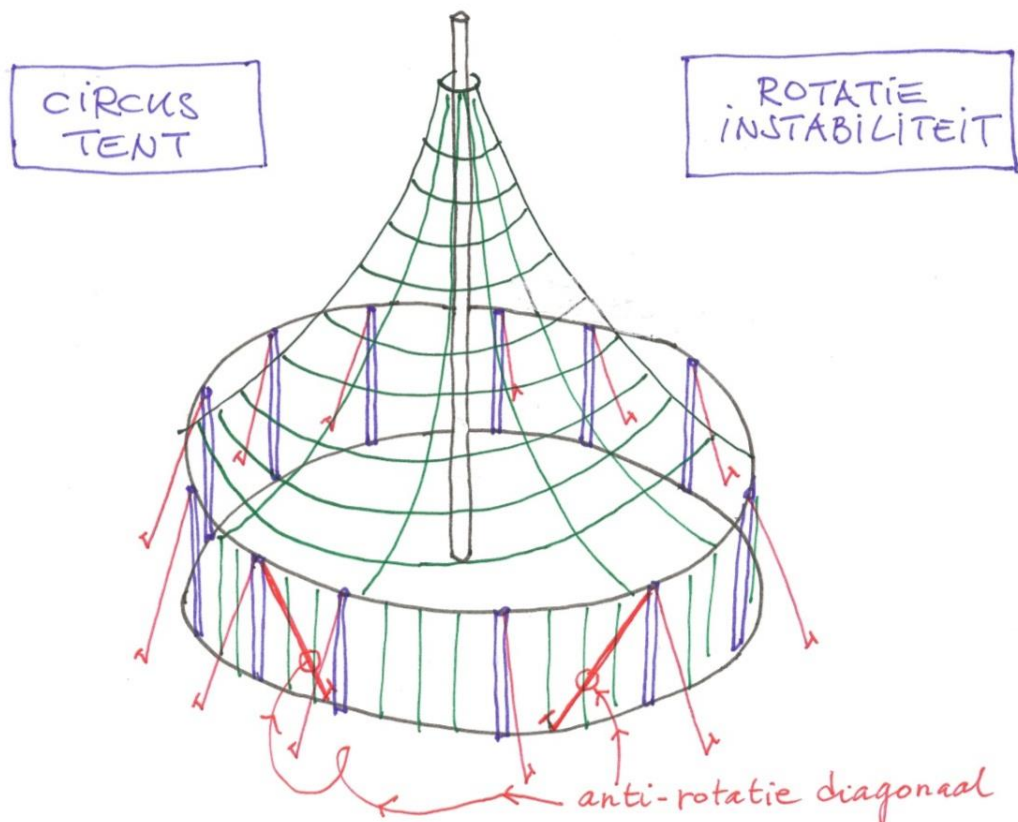


Een goed, dat wil zeggen stabiel gebouw; de drie stabiliteitsvoorzieningen gaan niet door één punt.

Een gebouw met drie stabiliteitsvoorzieningen dat niet rotatiestabiel is, want de drie stabiliteitsvoorzieningen gaan door één punt: het rotatiepunt of -centrum.

Een bekend of beter gezegd berucht voorbeeld van desastreuze rotatie instabiliteit is de circustentinstorting. Hierbij wordt verwezen naar de fatale instorting van grote tenten tijdens plotseling optredende stormen meestal in de zomer bij onweersbuien. In het verleden zijn hier veel mensen bij omgekomen. Wat gebeurde er? Ten gevolge van de asymmetrische, op de tent aangrijpende windstoten, gingen deze tenten roteren en storten in, bovenop de zich in de tent bevindende mensen.

Bij ieder rond gebouw moet extra op deze rotatie instabiliteit gelet worden, aangezien ronde gebouwen daar extra gevoelig voor zijn. Hoe lossen we dit zo simpel mogelijk op? Door zowel voor de linksom- als de rechtsom draaiende instabiliteit een diagonale kabel aan te brengen die de rotatie beweging opvangt (zie figuur circustent).



Bijlage 1: Sterkte-eigenschappen constructiematerialen

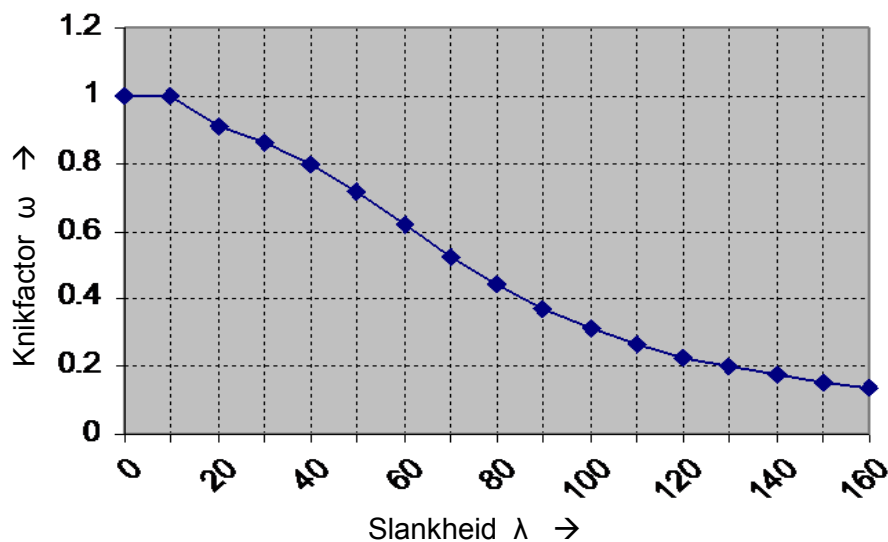
Een constructie(element) dient op sterkte te worden gecontroleerd.

Hiervoor gelden de volgende randvoorwaarden volgens de elasticiteitstheorie:

| | | |
|----------------------------|---|--|
| Trekspanning: | $\sigma_t = \frac{N_d}{A} \leq f_{t;d}$ | Hierin is: |
| Drukspanning: | $\sigma_c = \frac{N_d}{A} \leq \omega f_{c;d}$ | N_d = rekenwaarde van de normaalkracht |
| Buigspanning: | $\sigma_m = \frac{M_d}{W} \leq f_{m;d}$ | M_d = rekenwaarde van het moment |
| Schuifspanning: | $\tau = \frac{V_d \cdot S}{b \cdot I} \leq f_{v;d}$ | V_d = rekenwaarde van de dwarskracht |
| In rechthoekige doorsnede: | $\tau_{\max} = 1,5 \times \frac{V_d}{A} \leq f_{v;d}$ | A = oppervlakte doorsnede |
| | | ω = reductie- of knikfactor |
| | | W = weerstandsmoment ($W = I/z$) |
| | | I = Statisch moment |
| | | I = Kwadratisch oppervlakte moment |
| | | z = afstand zwaartepunt van de doorsnede tot de uiterste vezel waarin de spanning wordt berekend |

Omdat staven zelden kaarsrecht zijn, moet rekening worden gehouden met knik. Voor staal en hout is knik en initiële kromming verwerkt in de reductie- of knikfactor ω . De knikfactor ω kan globaal worden bepaald met onderstaande benaderingsgrafiek, waarin de ω is afgezet tegen de λ (slankheid). De slankheid wordt bepaald met de formule:

$$\lambda = \frac{l_c}{i} \quad \text{met} \quad i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (\text{i = traagheidsstraal})$$



De treksterkte is afhankelijk van het materiaal en de sterkteklasse. In de volgende tabellen zijn enkele rekenwaarden voor de sterkte en de elasticiteitsmodulus samengevat.

De tabellen en bovenstaande grafiek zijn ontleend aan het collegedictaat *Draagconstructies Basis* van ir. J.M. Gerrits (september 2007).

Hout

| rekenwaarden in N/mm ² | gezaagd hout populierenhout en naaldhout | | | gelamineerd hout met homogene opbouw | | |
|---|---|------|-------|---|-------|-------|
| | symbool | C18 | C24 | symbool | GL24h | GL28h |
| buigsterkterichting | $f_{m;0;d}$ | 10 | 14 | $f_{gl;m;0;d}$ | 14 | 16 |
| treksterkte // vezelrichting | $f_{t;0;d}$ | 6 | 8 | $f_{gl;t;0;d}$ | 10 | 11 |
| Treksterkte \perp vezelrichting | $f_{t;90;d}$ | 0.3 | 0.3 | $f_{gl;t;90;d}$ | 0.2 | 0.3 |
| druksterkte // vezelrichting | $f_{c;0;d}$ | 10 | 12 | $f_{gl;c;0;d}$ | 14 | 15 |
| druksterkte \perp vezelrichting | $f_{c;90;d}$ | 1.3 | 1.5 | $f_{gl;c;90;d}$ | 1.6 | 1.7 |
| schuifsterkte | $f_{v;0;d}$ | 1.2 | 1.5 | $f_{gl;v;0;d}$ | 1.6 | 1.9 |
| elasticiteitsmodus in de bruikbaarheidsgrenstoestand | $E_{0;ser;rep}$ | 9000 | 11000 | $E_{gl;0;ser;rep}$ | 11600 | 12600 |
| elasticiteitsmodus in de uiterste grenstoestand | $E_{0;u;rep}$ | 6000 | 7400 | $E_{gl;0;u;rep}$ | 9400 | 10200 |
| Elasticiteitsmodus \perp vezelrichting | $E_{90;ser;rep}$ | 300 | 370 | $E_{gl;90;ser;rep}$ | 390 | 420 |
| afschuivingsmodulus | $G_{ser;rep}$ | 560 | 690 | $G_{gl;ser;rep}$ | 720 | 780 |

Staal

| constructiestaal - rekenwaarden in N/mm ² | | | |
|--|-------------------|-------------------------------|-------|
| kwaliteit | E_{rep} | $f_{m;d} = f_{t;d} = f_{c;d}$ | t_d |
| S235 | 210×10^3 | 235 | 134 |
| S275 | | 275 | 157 |
| S355 | | 355 | 202 |

Let er op dat voor constructiestaal de elasticiteitsmodulus E onafhankelijk is van de sterkteklasse!

Beton

| beton - rekenwaarden in N/mm | | | | | |
|------------------------------|----------------------|-----------|---|--|-------|
| kwaliteit | $f'_{c;d} = f_{m;d}$ | $f_{t;d}$ | $f_{v;d}$ zonder dwars- wapening | $f_{v;d}$ met dwars- wapening | E_d |
| C12/15 | 9 | 0.9 | 0.54 | 1.8 | 26000 |
| C20/25 | 15 | 1.15 | 0.69 | 3.0 | 28500 |
| C28/35 | 21 | 1.4 | 0.84 | 4.2 | 31000 |
| C35/45 | 27 | 1.65 | 0.99 | 5.4 | 33500 |
| C45/55 | 33 | 1.9 | 1.14 | 6.6 | 36000 |
| C53/65 | 39 | 2.15 | 1.29 | 7.8 | 38500 |

De weergegeven elasticiteitsmodulus E_d geldt voor ongescheurd beton. Bij gescheurd beton dient een gereduceerde elasticiteitsmodulus te worden toegepast. Voor ontwerp-berekeningen nemen we:


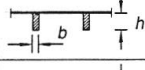
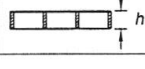

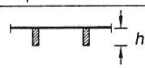
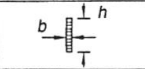
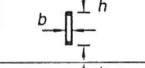
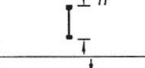
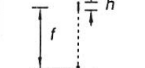
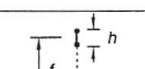
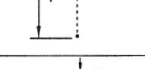

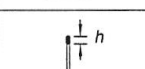
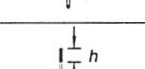


$$E_d = 10.000 \text{ N/mm}^2.$$

Bijlage 2: Vergeet-mij-nietjes









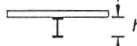



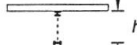
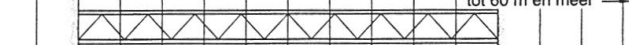


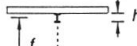

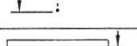
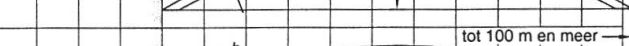



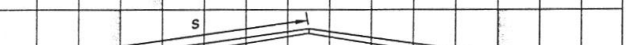
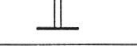
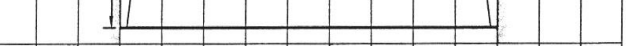

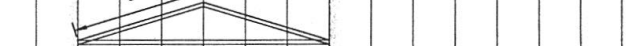
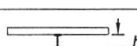
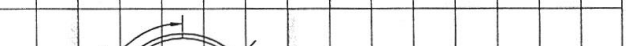


| Schema | Momentenlijn | Doorbuiging en hoekverdraaiing |
|-----------|--|--|
| <p>A0</p> | <p>$\frac{1}{4} Fl$</p> | <p>$\frac{1}{16} \frac{Fl^2}{EI}$ $\frac{1}{48} \frac{Fl^3}{EI}$</p> |
| <p>A1</p> | <p>$\frac{1}{8} ql^2$</p> | <p>$\frac{1}{24} \frac{ql^3}{EI}$ $\frac{5}{384} \frac{ql^4}{EI}$</p> |
| <p>A2</p> | <p>$\frac{9}{128} ql^2$</p> | <p>$\frac{1}{48} \frac{ql^3}{EI}$ $\frac{2}{384} \frac{ql^4}{EI}$</p> |
| <p>A3</p> | <p>$\frac{1}{24} ql^2$</p> | <p>$\frac{1}{384} \frac{ql^4}{EI}$</p> |
| <p>B1</p> | <p>K</p> | <p>$w = \frac{1}{2} \frac{Kl^2}{EI}$ $\phi = \frac{Kl}{EI}$</p> |
| <p>B2</p> | <p>Fl</p> | <p>$w = \frac{1}{3} \frac{Fl^3}{EI}$ $\phi = \frac{1}{2} \frac{Fl^2}{EI}$</p> |
| <p>B3</p> | <p>$\frac{1}{2} ql^2$</p> | <p>$w = \frac{1}{8} \frac{ql^4}{EI}$ $\phi = \frac{1}{6} \frac{ql^3}{EI}$</p> |
| <p>C1</p> | <p>K</p> | <p>$\phi_A = \frac{1}{6} \frac{Kl}{EI}$ $w_M = \frac{1}{16} \frac{Kl^2}{EI}$ $\phi_B = \frac{1}{3} \frac{Kl}{EI}$</p> |
| <p>C2</p> | <p>K</p> | <p>$\frac{1}{8} \frac{Kl^2}{EI}$ $\frac{1}{2} \frac{Kl}{EI}$</p> |
| <p>C3</p> | <p>$\frac{1}{2} K$</p> | <p>$w_M = \frac{1}{32} \frac{Kl^2}{EI}$ $\frac{1}{4} \frac{Kl}{EI}$</p> |

Bijlage 4: Schattingsregels overspanningsconstructies



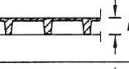

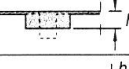

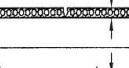

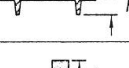

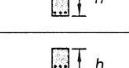

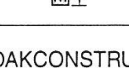

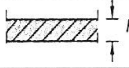









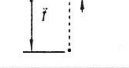

Schattingsregels overspanningsconstructies in hout

| benaming | doorsnede | h | opmerking | gangbaar overspanningsgebied | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|---------------------------------------|--|------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | l = 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| VLOERCONSTRUCTIES | | | | | | | | | | | | | | | |
| planken en triplexplaten |  | $\frac{1}{25} - \frac{1}{30} l$ | | < - 0,8 m | | | | | | | | | | | |
| balken, gezaagd |  | $\frac{1}{15} - \frac{1}{20} l$ | $b \approx \frac{1}{3} \text{ à } \frac{1}{4} l$ | | | | | | | | | | | | |
| ribpanelen |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{25} l$ | | | | | | | | | | | | | |
| DAKCONSTRUCTIES | | | | | | | | | | | | | | | |
| planken en triplexplaten |  | $\frac{1}{30} - \frac{1}{35} l$ | platte daken | < - 1,0 m | | | | | | | | | | | |
| | | | hellende daken | < - 1,5 m | | | | | | | | | | | |
| balken, gezaagd |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{30} l$ | | | | | | | | | | | | | |
| gelamineerde liggers |  | $\frac{1}{17} - \frac{1}{20} l$ | $b \approx \frac{1}{6} - \frac{1}{8} h$ | | | | | | | | | | | | |
| doos- of kokerliggers |  | $\frac{1}{12} - \frac{1}{15} l$ | $b \approx \frac{1}{6} - \frac{1}{8} h$ | | | | | | | | | | | | |
| vakwerkliggers |  | $\frac{1}{12} - \frac{1}{16} l$ | | | | | | | | | | | | | |
| vollewandbogen |  | $\frac{1}{40} - \frac{1}{50} l$ | $f > \approx \frac{1}{8} l$ $b \approx \frac{1}{6} h$ | tot 60 m en meer | | | | | | | | | | | |
| vakwerkbogen |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{25} l$ | $f > \approx \frac{1}{8} l$ | tot 80 m en meer | | | | | | | | | | | |
| kniespanten |  | $\frac{1}{15} - \frac{1}{20} s$ | $b \approx \frac{1}{6} h$ | | | | | | | | | | | | |
| driehoekspanten |  | $\frac{1}{15} - \frac{1}{20} s$ | $f \approx \frac{1}{4} l$ $b \approx \frac{1}{6} h$ | | | | | | | | | | | | |
| hoge bogen |  | $\approx \frac{1}{20} s$ | $b \approx \frac{1}{6} h$ | | | | | | | | | | | | |
| vouwdaken |  | $\frac{1}{12} - \frac{1}{16} l$ | | | | | | | | | | | | | |
| zadeldak |  | $f \approx \frac{1}{40} \text{ opp.}$ | $d \approx 80 - 100 \text{ mm}$ | | | | | | | | | | | | |
| koepeldaken |  | | netwerk van staven | tot 100 m en meer | | | | | | | | | | | |

Schattingsregels overspanningsconstructies in staal

| benaming | doorsnede | h | opmerking | gangbaar overspanningsgebied | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------------|---------------------------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | l = 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
| VLOERCONSTRUCTIES | | | | | | | | | | | | | | | | |
| staalplaat-betonvloeren |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{25} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| (staalplaat-) betonvloeren met I- balken |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{25} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| (staalplaat-) betonvloeren met vakwerkligger |  | $\approx \frac{1}{15} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| DAKCONSTRUCTIES | | | | | | | | | | | | | | | | |
| geprofileerde staalplaat |  | $\frac{1}{50} - \frac{1}{60} l$ | dikte plaat 0,75 à 1,25 mm |  | | | | | | | | | | | | |
| warmgewalste met I- balken |  | $\frac{1}{30} - \frac{1}{35} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| raat- en plaatliggers |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{30} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| vakwerkliggers |  | $\frac{1}{10} - \frac{1}{15} l$ | |  tot 60 m en meer | | | | | | | | | | | | |
| ruimtelijke vakwerkliggers |  | $\frac{1}{12} - \frac{1}{16} l$ | |  tot 60 m en meer | | | | | | | | | | | | |
| vollewandbogen |  | $\frac{1}{60} - \frac{1}{80} l$ | $f > \approx \frac{1}{8} l$ |  tot 80 m en meer | | | | | | | | | | | | |
| vakwerkbogen |  | $\frac{1}{30} - \frac{1}{40} l$ | $f > \approx \frac{1}{8} l$ |  tot 100 m en meer | | | | | | | | | | | | |
| kniespanten |  | $\frac{1}{30} s$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| driehoekspanten |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{25} s$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| hoge bogen |  | $\approx \frac{1}{30} s$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| koepeldaken |  | | netwerk van staven |  tot 100 m en meer | | | | | | | | | | | | |
| kabelconstructies |  | | zeeg $f \approx \frac{1}{20} l$ |  tot 100 m en meer | | | | | | | | | | | | |
| ruimtevakwerken |  | $\approx \frac{1}{25} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |

Schattingsregels overspanningsconstructies in beton

| benaming | doorsnede | h | opmerking | gangbaar overspanningsgebied | | | | | | | | | | | | |
|--|---|---------------------------------|------------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| | | | | l = 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 |
| VLOERCONSTRUCTIES | | | | | | | | | | | | | | | | |
| vlakkeplaatvloeren |  | $\frac{1}{25} - \frac{1}{30} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| ribben - en cassettevloeren |  | $\frac{1}{20} - \frac{1}{25} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| balkenvloeren |  | $\frac{1}{10} - \frac{1}{20} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| kanaalplaatvloeren |  | $\frac{1}{35} - \frac{1}{40} l$ | b = 1200 mm |  | | | | | | | | | | | | |
| TT - plaatvloeren |  | $\approx \frac{1}{25} l$ | b = 2400 mm |  | | | | | | | | | | | | |
| gewapende balken ter plaatse gestort |  | $\frac{1}{10} - \frac{1}{12} l$ | b ≈ 1/2 h |  | | | | | | | | | | | | |
| voorgespannen - balken ter plaatse gestort |  | $\frac{1}{15} - \frac{1}{20} l$ | b ≈ 1/2 h |  | | | | | | | | | | | | |
| DAKCONSTRUCTIES | | | | | | | | | | | | | | | | |
| cellenbeton dakplaten |  | $\approx \frac{1}{30} l$ | b = 600 mm |  | | | | | | | | | | | | |
| voorgespannen rechthoekige balken |  | $\approx \frac{1}{20} l$ | b ≈ 1/3 h |  | | | | | | | | | | | | |
| voorgespannen I - balken |  | $\frac{1}{15} - \frac{1}{20} l$ | b ≈ 2/7 h |  | | | | | | | | | | | | |
| vouwdaken |  | $\frac{1}{8} - \frac{1}{15} l$ | |  | | | | | | | | | | | | |
| boogspanten |  | $\frac{1}{30} - \frac{1}{40} l$ | f ≈ 1/6 l b ≈ 1/3 h |  | | | | | | | | | | | | |
| koepelschalen |  | f ≈ 1/4 à 1/8 l | d ≥ 80 mm |  | | | | | | | | | | | | |

Bron: A. te Boveldt, *Jellema Hogere Bouwkunde deel 7, Bouwmethodiek*, 1999, p.227-229.