Dictaat
Draagconstructies II



Prof. Ir. Rob Nijsse

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

Delft, maart 2012

Inhoud

1 Vakwerken en Vierendeel-liggers 5
1.1 Het vakwerk 6
1.2 Overzicht soorten vakwerken 9
1.3 Driehoeksligger 14
1.4 Ruimtevakwerk 14
1.5 Dimensioneringsberekening van een vakwerk 15
1.6 De Vierendeel-ligger 20
1.7 Berekening vakwerk en Vierendeel-ligger 24
2 Bogen & Kabels 30
2.1 Bogen 30
2.2 Kabels 37
2.3 Trek- en Drukringsystemen 45
3 Temperatuurbeweging, Dilataties 50
4 Brandwerendheidseisen hoofddraagconstructie 52
5 Groeiende Overspanning 54
5.1 Balken 55
5.2 Onderspannen liggers 56
5.3 Recht verlopende vakwerken 57
5.4 Schuin verlopende vakwerken 57
5.5 Tui-constructies 58
5.6 Hangconstructies 60
6 Groeiende Hoogte 67
6.1 Horizontale krachten 67
6.2 Opname horizontale krachten 68
6.3 De groeiende hoogbouw 70
6.4 Maatgevende criteria voor hoogbouw 72
6.5 Trillingsgevoeligheid en eigenfrequentie 74
6.6 Het tweede-orde effect 79
6.7 De zwaartekracht en het verticaal transport 80
6.8 Overzicht Hoogbouw Strategieën 83
7 Schalen 95
7.1 Vouwschalen 96
7.2 Enkel gekromde, translatieschalen 99
7.3 Dubbel gekromde, translatieschalen 100
7.4 Rotatieschalen 106

7.5 Regelvlakken 107
7.6 Wiskundige formules van schalen 113
8 Tenten 116
9 Funderingen 126
9.1 Onderzoek op de beoogde bouwlocatie 126
9.2 Hoofdtypes fundering 129
9.3 Fundering op staal 130
9.4 Hoofdtypes paalfundering 131
9.5 Houten palen 131
9.6 Betonnen prefabpalen 132
9.7 Schroefpalen 134
9.8 Buispalen 137
9.9 Bouwputten 139

Voorwoord

Dit collegedictaat is bedoeld voor de studenten van het vak Bk4043 in het tweede jaar van de opleiding Architectuur. Het sluit aan op hetgeen in het eerste jaar aan draagconstructie-onderwijs is gegeven bij het vak Bk1043. Mede op basis van de kennis die daarin is overgedragen, gaan we verder in het mooie vak van de Constructieleer. Nadat Bk4042 is afgerond, heeft de student basiskennis van alles wat essentieel is bij het ontwerpen van een gebouw voor wat betreft het, door de Romeinse architect-theoreticus Vitruvius genoemde aspect *Firmitas* (Stevigheid). Dit college vormt ook de basis voor de oefening Bk4043 en voor het verdere onderwijs op deze Faculteit.

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.
In het eerstejaars vak Bk1043 zijn constructievormen opgebouwd uit staven als balken en kolommen behandeld. In dit tweedejaars vak Bk4042 passeren alle meer bijzondere verschijningsvormen van constructies de revue. Behandeld worden Vakwerken, Vierendeelliggers, Bogen, Getuide constructies, Hangconstructies, Schalen en Tenten. Met deze elementen worden twee experimenten uitgevoerd: een gebouw met een Groeiende (vrije) Overspanning en een gebouw met een Groeiende Hoogte. De meeste optimale constructievorm wordt bij de bijbehorende hoogte of overspanning afgeleid.
Ook worden twee belangrijke invloeden op de constructie van een gebouw besproken: de invloed van Temperatuurstijging en -daling en de Brandwerendheid. Afgesloten wordt met een essentieel onderdeel van iedere draagconstructie, de Fundering. Want zonder goede fundering is elk gebouw, hoe mooi en stevig het ook mag zijn, waardeloos.

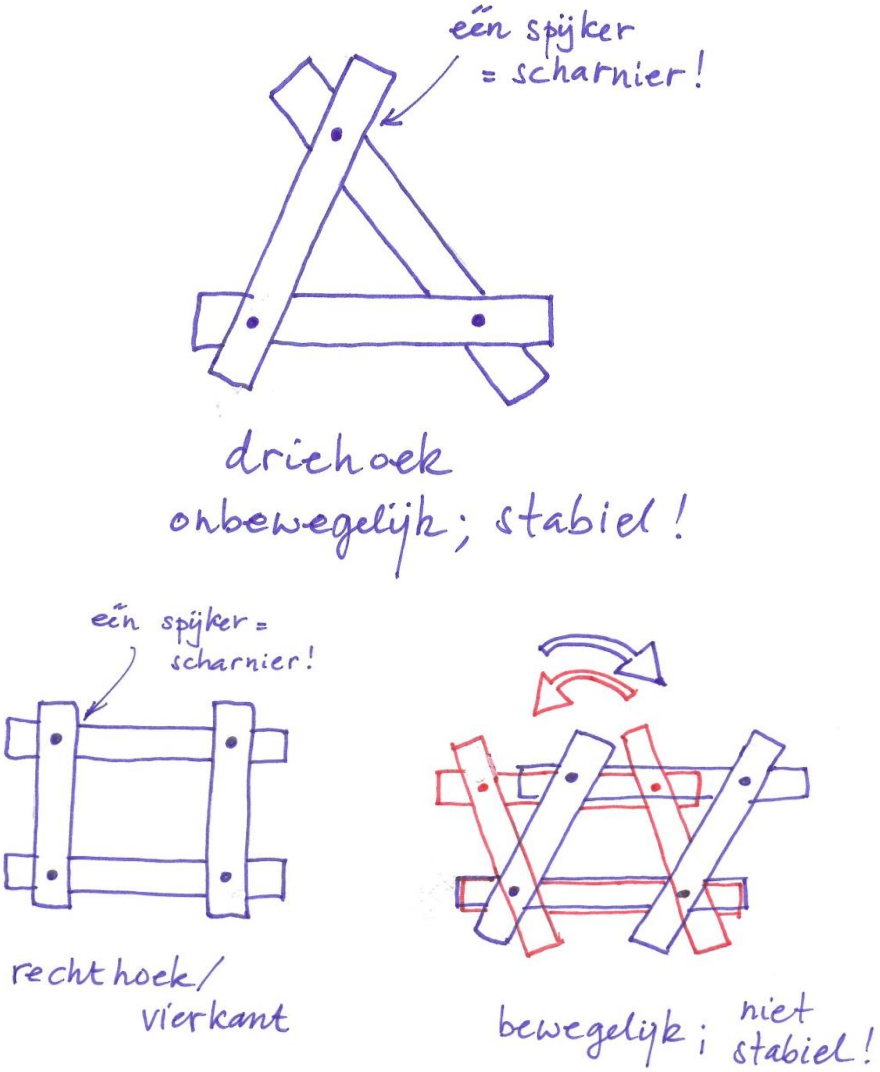
Prof. Ir. Rob Nijsse

Technische Universiteit Delft
Februari 2012

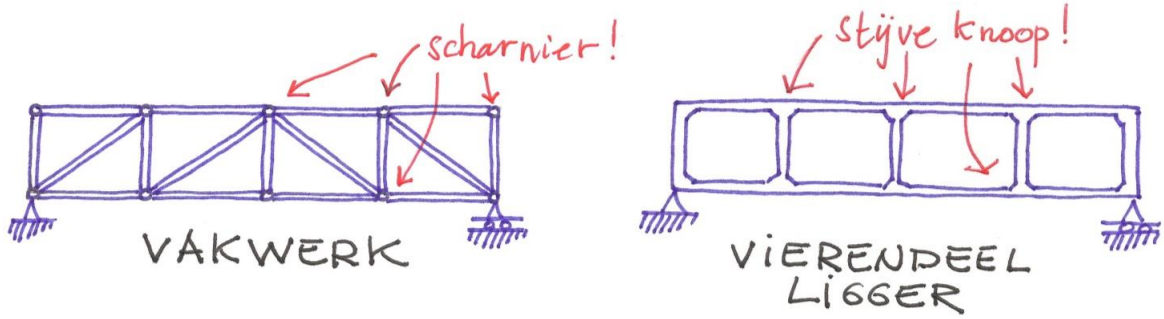
Omslagfoto: *Kunstwerk in park in Lissabon. Water spuit uit een betonnen plaatdak. De zwaartekracht trekt de waterstralen naar beneden zodat het water een mooie boog vormt. Alle bogen naast elkaar vormen een boogschaal: een gebouw van water.*

1 Vakwerken en Vierendeel-liggers

In het eerste jaar hebben we geleerd dat driehoeken uit zich zelf stabiel zijn en rechthoeken zeker niet stabiel, ten minste als we alle verbindingen als scharnier beschouwen (de ene spijker…) en niet als stijve hoek (met meer spijkers per verbinding).

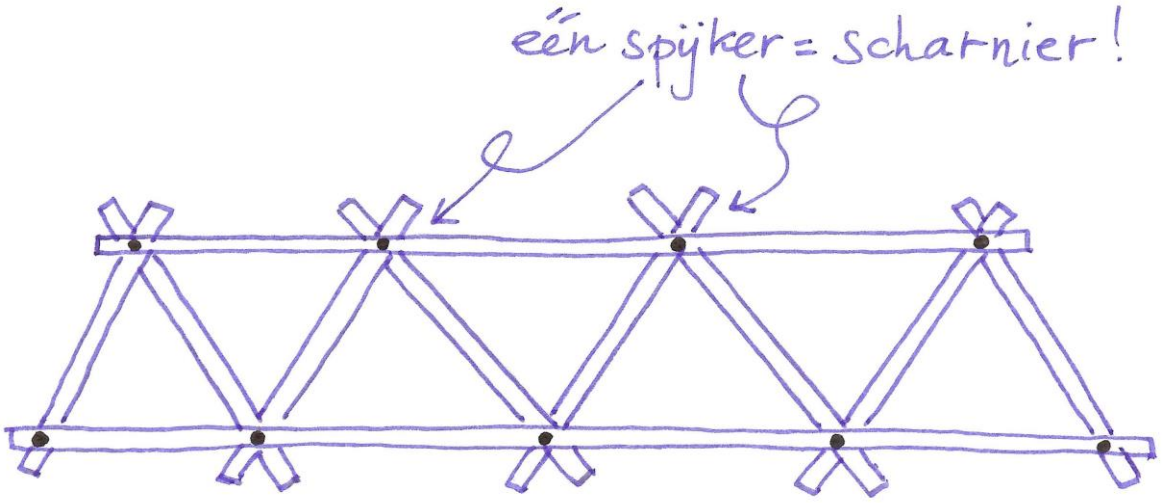


Eigenlijk staan beide figuren; de driehoek en de rechthoek model voor de component waaruit de twee onderwerpen van dit hoofstuk zijn samengesteld. De driehoek voor het vakwerk: sterk, stijf maar met (soms) vervelende schuine lijnen (de diagonalen). En de rechthoek voor de Vierendeel-ligger: slap, bewegelijk maar zonder schuine lijnen.



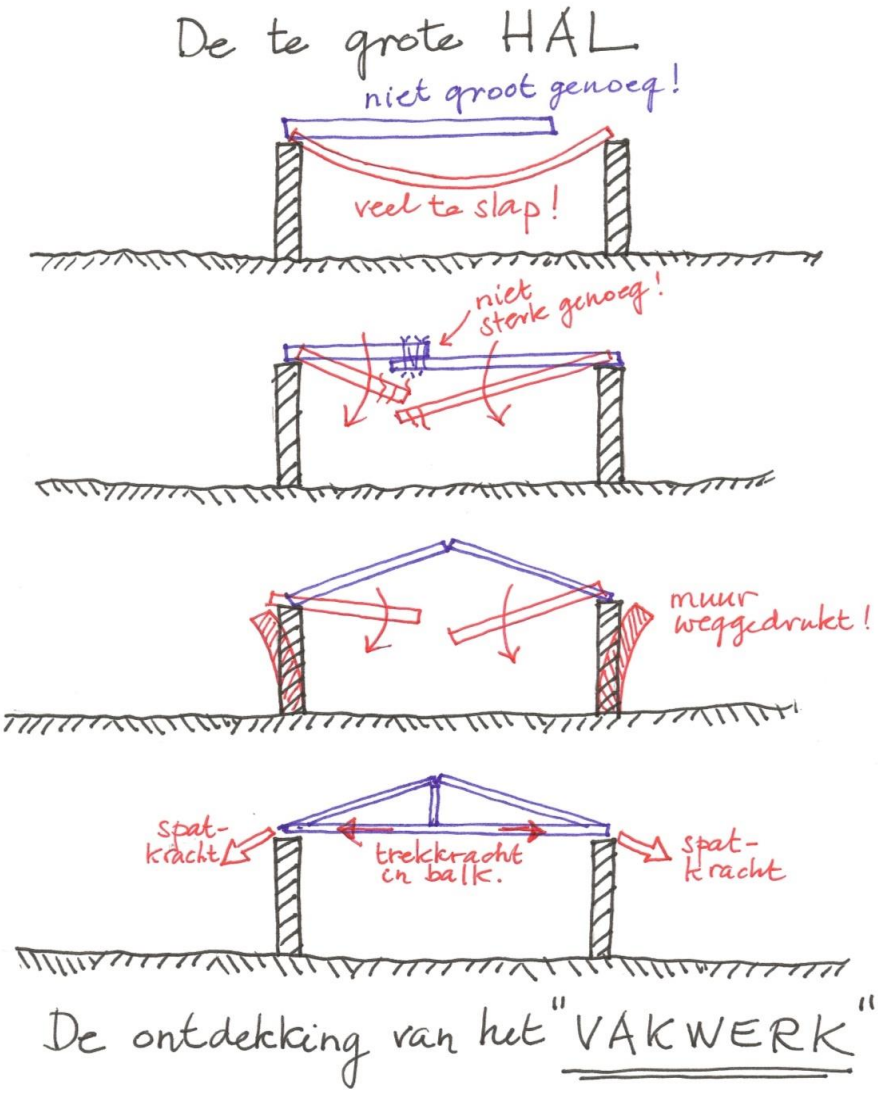
Let ook goed op de uitvoering van de knopen van deze twee constructievormen, bij een vakwerk kunnen dat scharnieren zijn, een driehoek is immers stabiel met een scharnier-verbinding. In een vakwerk kunnen de knopen dus licht gedetailleerd worden. Bij een Vierndeel-ligger daarintegen moeten de knopen (buig)stijf uitgevoerd worden anders werkt het schema totaal niet. Denk aan de rechthoek-figuur dat alle kanten op kan bewegen.

1.1 Het vakwerk

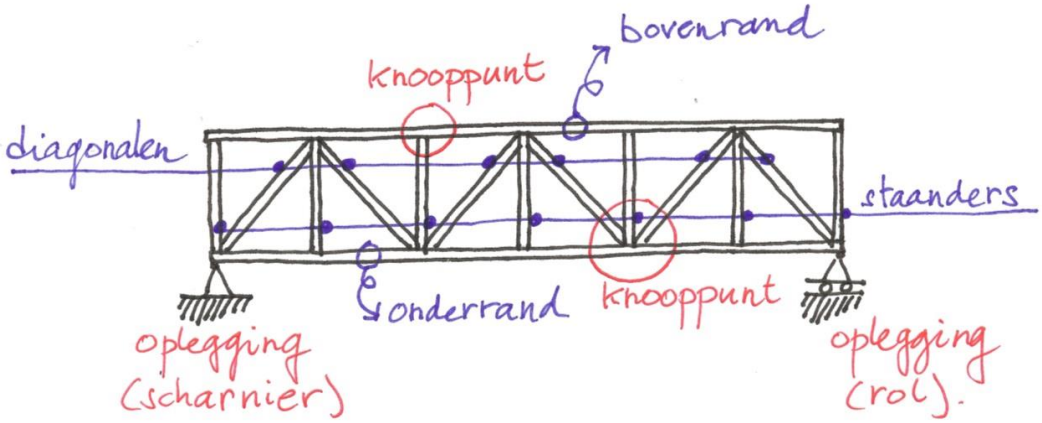


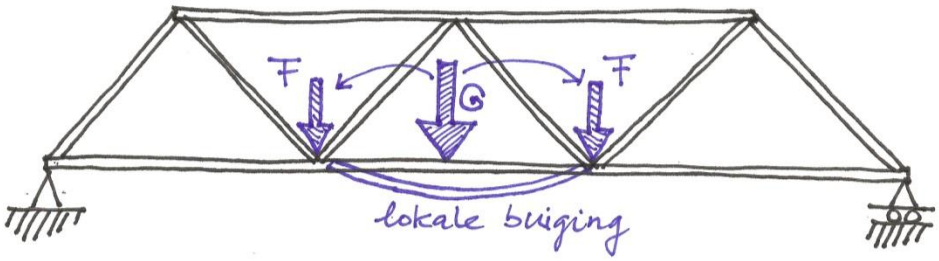
Hier zien we een mooi voorbeeld hoe door allemaal driehoeken aan elkaar te verbinden er een sterke en stijve constructie ontstaat: een vakwerk. Met twee lange planken en acht korte planken plus negen spijkers is dit vakwerk in elkaar te zetten. Weinig materiaal maar wel veel draagvermogen. Vrijwel net zo veel als een massieve balk met dezelfde hoogte!
Elke constructie die opgebouwd is uit driehoeken is dus automatisch stabiel waarmee we dit keer ook sterk en stijf genoeg bedoelen. Is er ergens ook maar een vierkant of rechthoek te zien dan is de constructie meteen niet meer stabiel.

Hoe zal het eerste vakwerk ontstaan zijn? Het is niet meer te bewijzen maar waarschijnlijk is het als volgt gegaan. De overdekte markt- / vergaderhallen moesten, zoals altijd bij beschaafde mensen, steeds groter en imposanter worden. Toen er geen bomen te vinden waren die lang genoeg waren of die dik (sterk) genoeg waren om de grote overspanning te overbruggen kwam iemand op het idee om twee te korte bomen scheef tegen elkaar aan te zetten. Dit werkte wel even maar de horizontale krachten (de spatkrachten) die opgeroepen werden duwde de muren van de hal uit elkaar en het dak kwam naar beneden. Toen dit verschijnsel opgetreden was kwam er iemand met de suggestie om de te slappe boomstam te combineren met de twee scheef geplaatste boomstammen en zo ontstond het eerste vakwerk waarbij de onderste balk als 'trekband' voor de opname van de door scheefstand opgeroepen horizontale krachten opgenomen kunnen worden. Op de muren werkt dus alleen een verticaal gerichte kracht die een muur goed kan opnemen. Dit principe van een vakwerk is waarschijnlijk het eerst door de Romeinen in de eerste eeuw na Christus toegepast die hiermee hun grote basilica's (overdekte markt / vergaderruimte) bouwden. In Trier is een nog redelijk gaaf exemplaar te zien die later als kerk behouden is gebleven. Alle later gebouwde kerken borduren op dit Romeinse basilica's-idee voort.

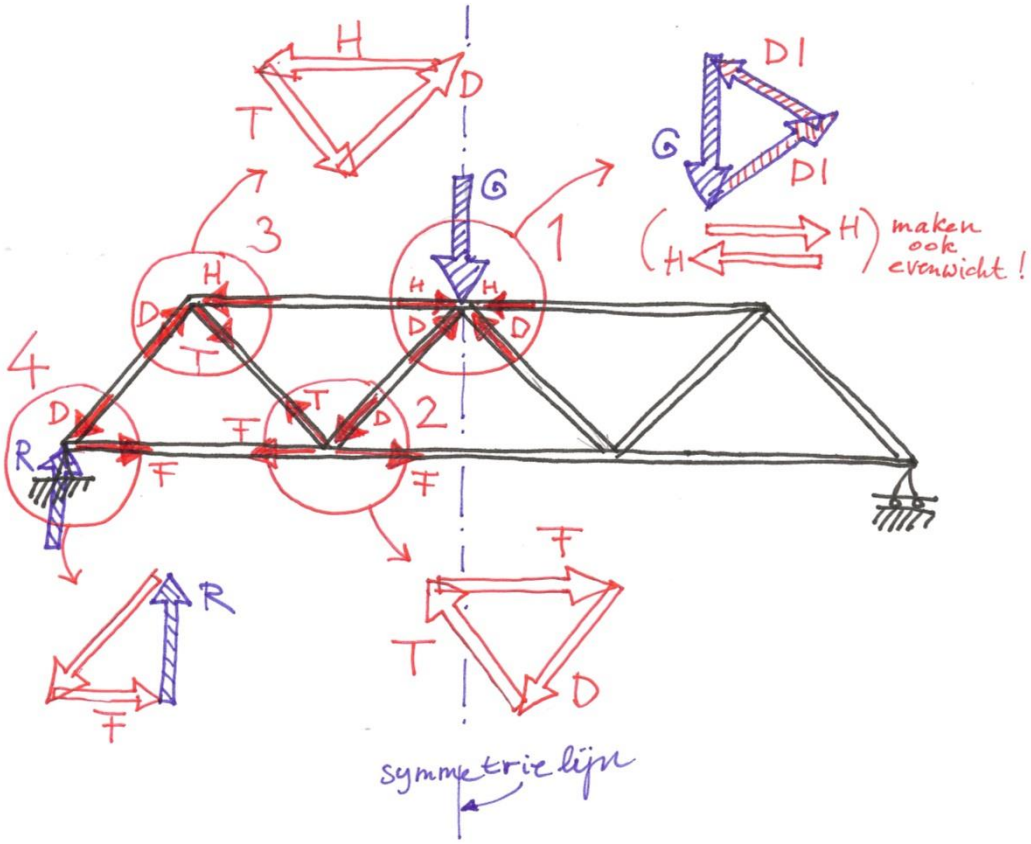


Het voorbeeld met de te grote hal laat ook zien dat de krachten die op een vakwerkdak worden uitgeoefend, zoals het eigen gewicht, de sneeuw en de wind niet door buiging zoals bij een balk worden overgebracht. Maar door staafkrachten in de lengteas van iedere staaf waaruit het vakwerk is opgebouwd. Dus belangrijk om te onthouden: een vakwerk kan alleen krachten in de lengteas van de elementen overbrengen! Deze kracht kan druk of trek zijn maar is dus nooit buiging. De staven in een vakwerk hebben ook een specifieke naam afhankelijk van hun positie. In het bijgaande figuur staan zij vermeld: de onder- en de bovenrand, de diagonalen en de staanders.

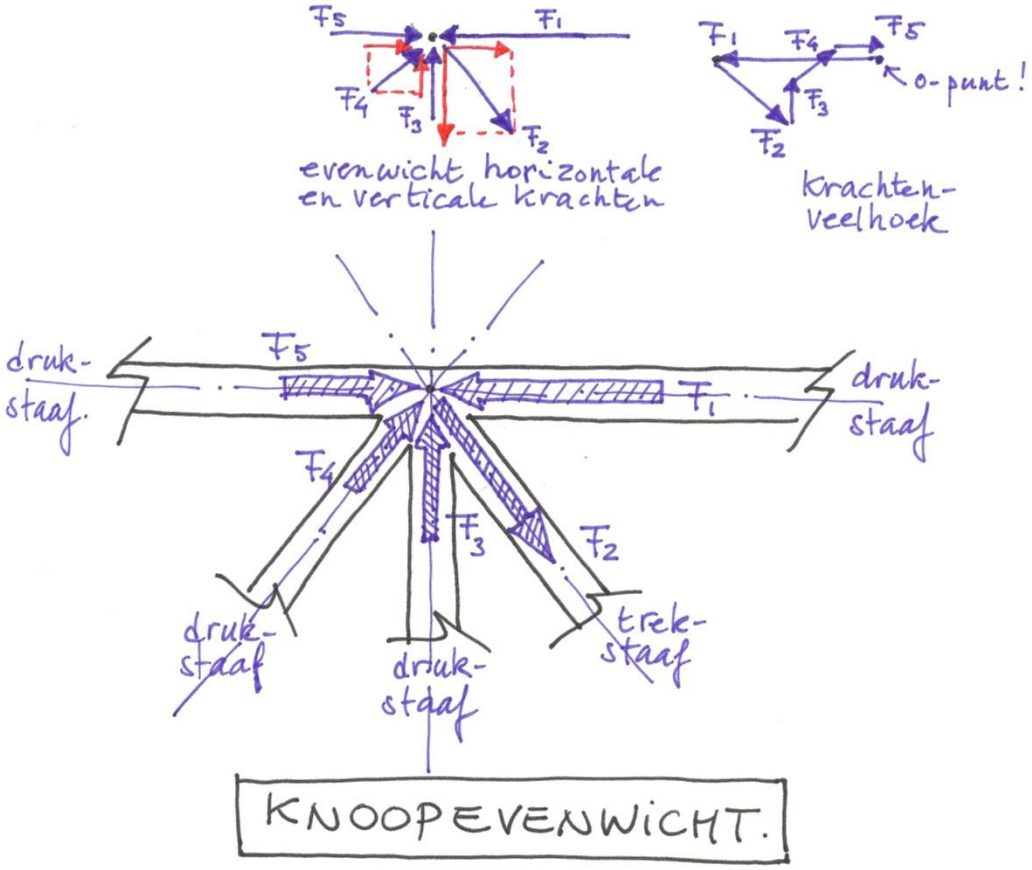




Nog een illustratie van het feit dat in een vakwerk alleen staafkrachten werken. Als er een zwaar voorwerp bijvoorbeeld een trein over een brug rijdt, kunnen we het grote, geconcentreerd aangrijpende gewicht van de trein verdelen (via lokale buiging, trouwens!) naar de twee knooppunten links en rechts. Daar kunnen we deze kracht steeds per knooppunt ontbinden in trek- en drukkrachten in de staven.



In bovenstaand figuur is te zien hoe een uitwendige belasting; in dit geval een groot gewicht G in het midden van de bovenrand in staafkrachten ontbonden kan worden met behulp van het krachtenevenwicht dat er in ieder knooppunt moet gelden. In het knooppunt waar G aangrijpt, nemen de twee diagonalen het gewicht G op, zie de bijbehorende driehoek die in evenwicht is. Nu er daar evenwicht is verplaatsen wij onze aandacht richting oplegging (het uiteindelijke eindpunt) naar het volgende knooppunt in het vakwerk waar de door G opgeroepen diagonaalkracht D moet worden doorgeven naar de andere staven van het vakwerk. Ook daar is weer een krachtenevenwicht-driehoek te tekenen. Zo gaan we door tot dat de door het gewicht G opgeroepen staafkrachten in het vakwerk uiteindelijk evenwicht maken met de oplegreactie R bij het contact met de ondergrond / fundering / rest van de constructie etc. Nog een opmerking: wat in het figuur is getekend, geldt voor de linkerkant van het vakwerk. Op grond van symmetrie geldt voor de rechterhelft precies hetzelfde; dit is alleen niet getekend.

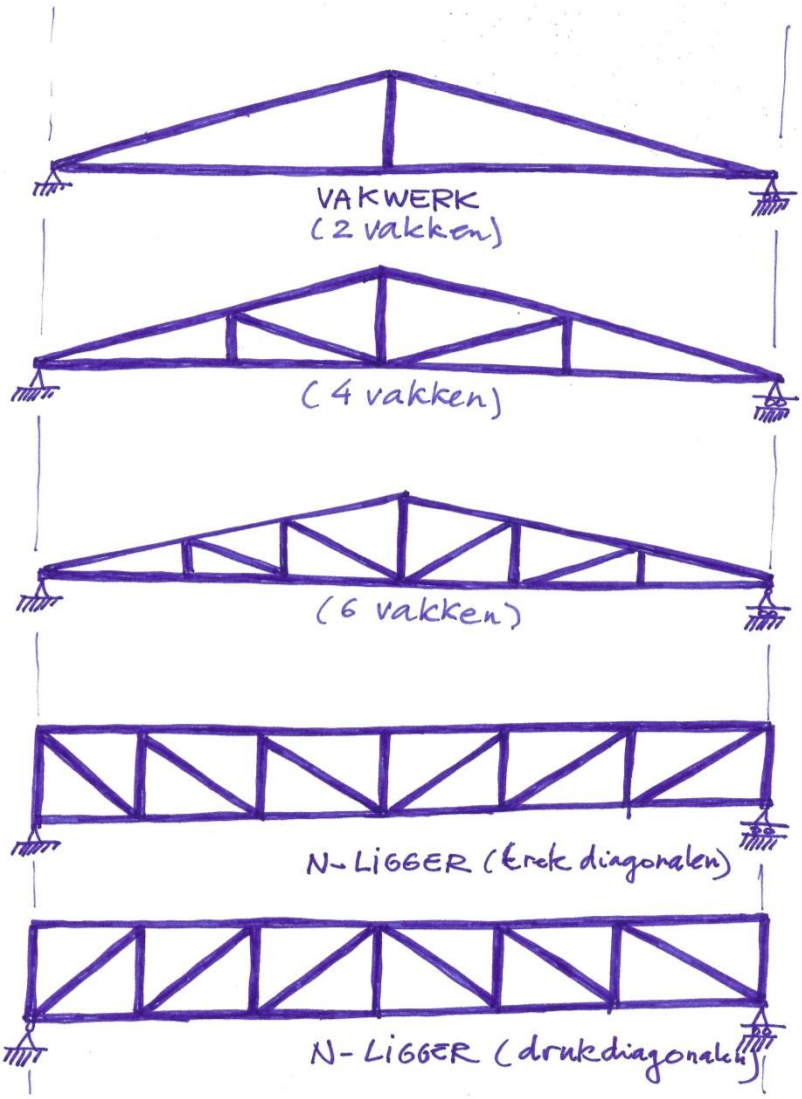


Hierboven is te zien dat het evenwicht van een knoop van een vakwerk uit alle staafkrachten die er op werken is samengesteld. In de twee figuurtjes erboven getekend zijn twee manieren afgebeeld.
Links het evenwicht door iedere staafkracht in een horizontale en een verticale component te ontbinden. Hiervoor moet gelden dat alle verticale componenten bij elkaar opgeteld nul moeten zijn (= evenwicht). Het zelfde geldt voor de horizontale componenten.
Rechts het evenwicht door alle krachten met de klok rondgaand achter elkaar te tekenen. Bij evenwicht zijn het begin- en het eindpunt hetzelfde.

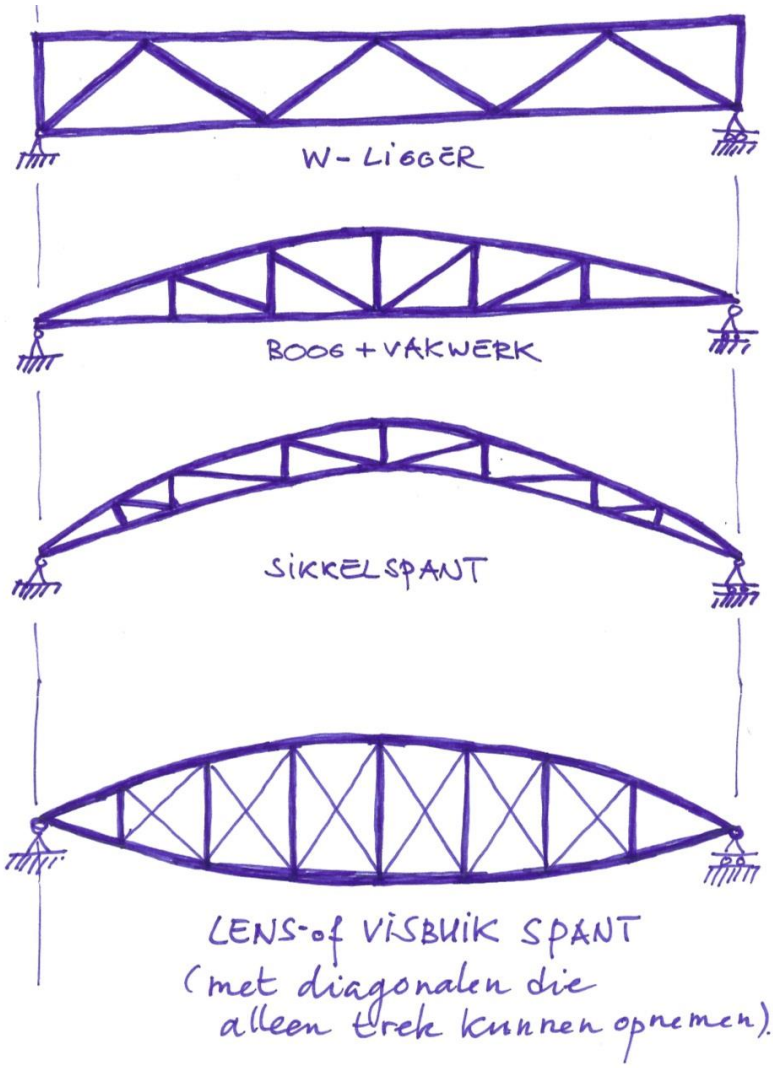
1.2 Overzicht soorten vakwerken

Er zijn een heleboel mogelijke vormen van vakwerken, eigenlijk oneindig veel. Toch is er een aantal hoofdvormen te herkennen. We beginnen met het meest simpele spant, want zo noemen we een vakwerk ook wel eens, bestaande uit twee driehoeken of twee vakken. Hierin zijn de afzonderlijke staven nogal lang zodat bij drukkrachten in de staven knikproblemen kunnen optreden. Daarom beginnen we het aantal driehoeken te verdubbelen (zodat het symmetrisch gebeurt: een essentiële voorwaarde voor een gezond vakwerk) met eerst vier vakken daarna zes vakken etc. etc.
De volgende hoofdvariant is het vakwerk met een rechte bovenkant maar wel opgebouwd uit driehoeken dus met diagonalen. Zo ontstaat de zogenaamde N-ligger, een heel rationeel vakwerk dat je dan ook vaak in industriële toepassingen ziet. De diagonalen in een N-ligger kunnen stijgende (omhoog gaande) of dalende (naar beneden gaande) diagonalen hebben. Bij dalende diagonalen heerst er een trekkracht in de diagonalen. Dit kun je eenvoudig inzien door je voor te stellen dat er in het midden heel hard aan het vakwerk naar beneden (zwaartekracht-richting) getrokken wordt. De dalende diagonalen moeten dan langer worden

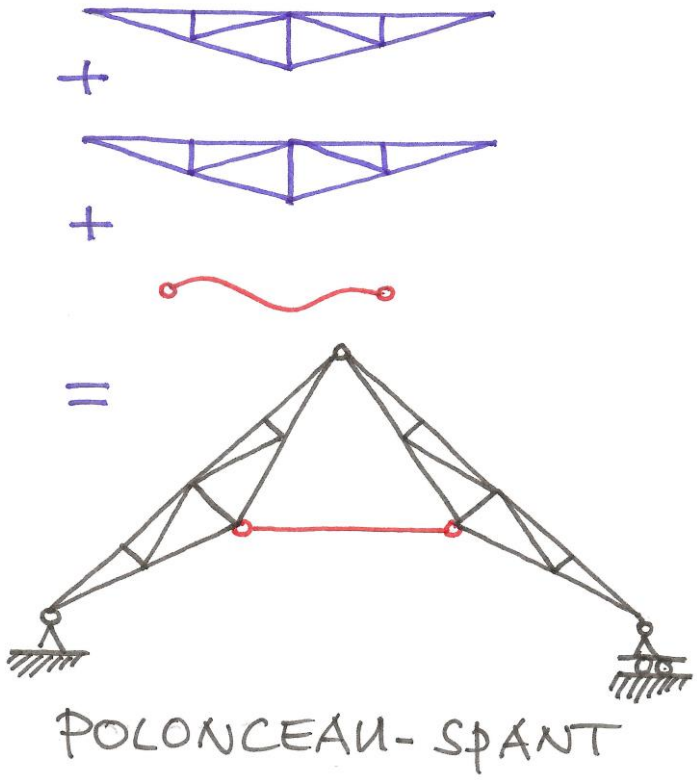
en staan dus onder trek. Voor rijzende diagonalen geldt het omgekeerde. Hier moeten de diagonalen korter worden en staan dus onder druk. Drukkrachten leiden tot knikgevaar en dat betekent dikke staven vergeleken met trekstaven waarbij tot de uiterste grens voor de trekkracht van het materiaal gegaan kan worden. In theorie zou zelfs voor een trekstaaf een kabel gebruikt kunnen worden. Maar dat mag je alleen toepassen als je zeker weet dat er nooit drukkrachten in de diagonalen kan ontstaan. Denk bijvoorbeeld aan opwaartse windkrachten die opeens het hele krachtenspel overhoop kunnen gooien.



Als we met ons hoofdindeling vakwerken verder gaan, komen we op de W-ligger, een visueel rustig en daarom voor architecten aantrekkelijk spant. Maar besef wel dat hier het teken van de kracht in de diagonaal steeds van teken wisselt. Denk aan het verhaal bij de N-ligger. Dat betekent voor de W-ligger dat de diagonalen altijd redelijk forse profielen zullen zijn om knikgevaar te vermijden.
Het volgende type spant is de combinatie van een boog met de driehoek structuur van vakwerken. Als we de onderregel van het vakwerk als de trekstang van de boog zien dan combineren we in dit type spant de positieve effecten van twee constructie types; het vakwerk zelf en de boog. Een zeer effectieve combinatie, vanuit de constructie geredeneerd, en het is daarom dat vrijwel alle grote spoorbruggen uit de 19de eeuw uit dit type vakwerk vervaardigd werden.



Waarom dus geen twee bogen en de onderrand ook als boog uitgevoerd? Inderdaad is dit zogeheten sikkelspant qua materiaal-economie een zeer effectief spant met, helaas, een groot nadeel: de treinen (of auto's) kunnen moeilijk over de onderregel rijden! Dit spanttype werd veel toegepast in grote stationshallen. Men hield toen echter nog geen rekening met opwaartse windbelasting, waardoor slanke trekstaven in drukstaven veranderden en uitknikten. Vrijwel alle sikkelspanten zijn inmiddels verdwenen.
De meest effectieve vorm qua materiaal gebruik is de lens- of visbuikligger. Deze spantvorm heeft in het midden van de overspanning een veel grote hoogte dan het sikkelspant en biedt daardoor veel meer weerstand tegen buiging (vergelijk een gedrongen ligger versus een slanke ligger). Door de diagonalen dubbel uit te voeren, dus zowel rijzende als dalende diagonalen aan te brengen, kun je altijd kabels als diagonalen toepassen. Immers, onder druk valt de kabel gewoon uit, maar de kabel (in het zelfde vak!) in de andere richting komt automatisch onder trek en functioneert prima. Deze effectieve vakwerkvorm wordt voor grote overspanningen ook nu veel gebruikt.
Tot slot nog twee bijzondere typen vakwerken: het Polonceau-spant en het Ardant-spant. Allebei afkomstig uit Frankrijk waar zij het eerst werden toegepast. Het Polonceau-spant is in de 19de en begin 20ste eeuw zeer veel toegepast. Het is dan ook een economisch spant-type. Er is met weinig materiaal een grote overspanning te maken die ook nog uit losse onderdelen samen te stellen is. Eigenlijk bestaat het Polonceau-spant uit twee, schuin tegen elkaar geplaatste onderspannen liggers of vakwerken, verbonden door een trekstang.

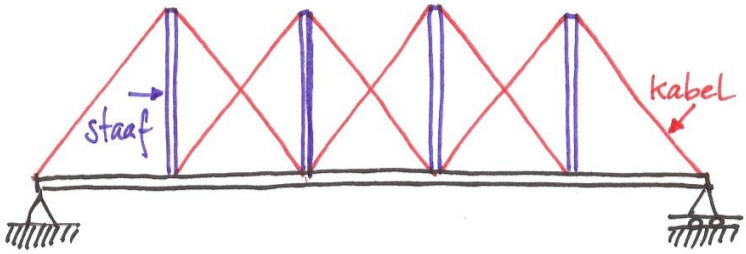


Als we de trekstang niet aanbrengen, zouden de beide spanthelften wegzakken (spatten), maar nu houdt de trekstang ze bij elkaar. De keuze voor korte drukstaven (knik!) en lange trekstaven geven een goed doordachte, relatief goedkope en stijve constructie, die het succes van het Polonceau-spant verklaart.
Het volgende bijzondere spanttype is het Ardant-spant. Eigenlijk de combinatie van een boog en een vakwerk. De boog is de onderrand en het vakwerk 'staat' daar bovenop. Ook dit is weer een economisch aantrekkelijk type met weinig materiaalgebruik. Alleen de ronde vorm van de boog is moeilijk te maken en dus duur.



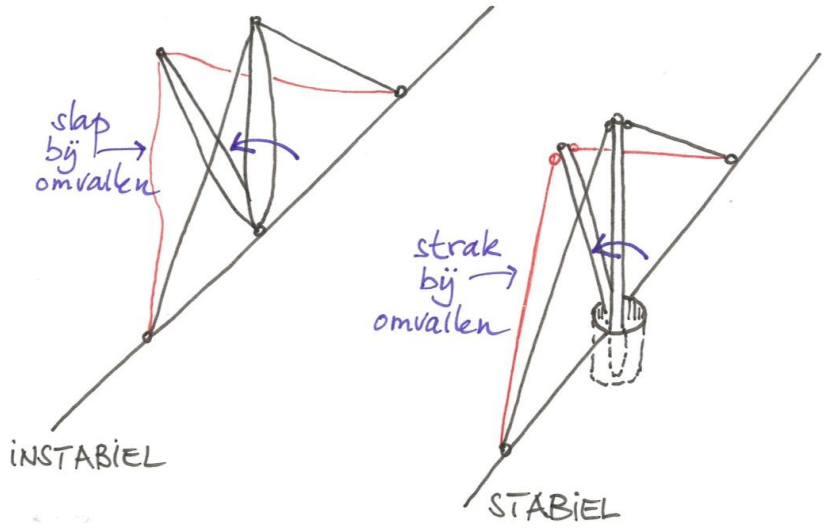
Het Ardant-spant in de overkapping van een overdekte binnenplaats van de school P6/13 "Les Marronniers" in Anderlecht (1902).

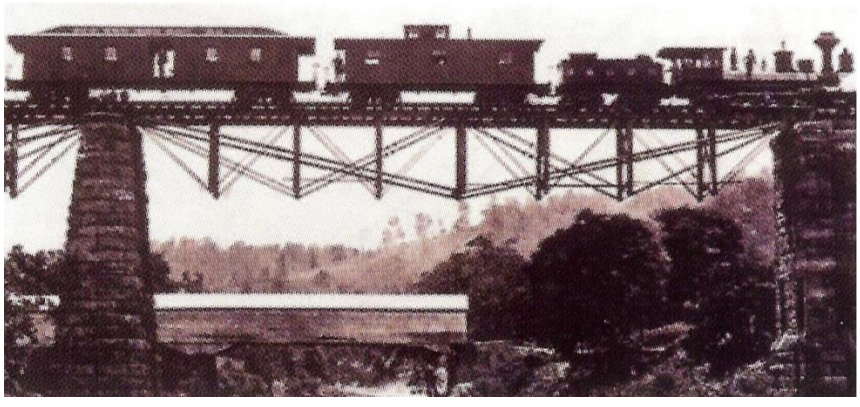
Tot slot het meest merkwaardige lid van de vakwerkfamilie, het Fink-vakwerk, genoemd naar een Amerikaans ingenieur. Deze vond dit type vakwerk uit ten tijden van de spoorwegaanleg in de USA in de tweede helft van de 19de eeuw. Een heel eenvoudig te standaardiseren vakwerk met allemaal dezelfde componenten, goed te vervoeren en eenvoudig in elkaar te zetten. Helaas niet economisch, dat is wel duidelijk als je naar de merkwaardige vorm kijkt. Toch werkt het wel en het kan soms een leuke architectonische verrassing betekenen. In London is een tiental jaren geleden een grote brug van dit type: de Royal Victoria Dock Footbridge in het te renoveren havengebied de Docklands neergezet.



FINK VAKWERK

Je zou je kunnen afvragen waarom de staande driehoeken niet omvallen; ze zijn immers niet stabiel. Maar daar is een truc op: je moet ervoor zorgen dat het onderste punt van de staaf duidelijk onder het onderste punt van de kabels zit. Wil de staaf nu omvallen; instabiel worden, dan zullen de kabels uitgerekt worden en dus de 'omval'beweging stoppen.



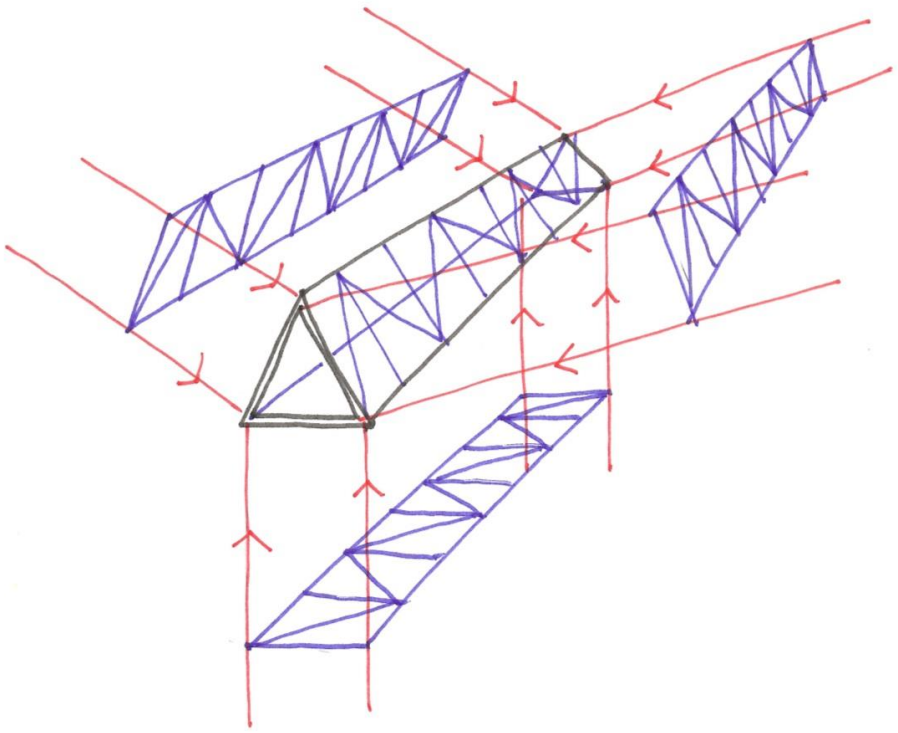


Northern Virginia Railway bridge, een echt Fink vakwerktype, rond 1875.

1.3 Driehoeksligger

Een probleem van vakwerken is dat ze twee dimensionaal zijn, een plat vlak. Daarom zullen ze al snel omvallen oftewel instabiel worden. Dit noemen wij het uitknikken of kippen van het vakwerk. Bij een dak of vloer dat door het vakwerk gedragen wordt is dit voor de bovenrand (!) eenvoudig op te lossen door het dak of vloervlak goed vast te zetten. De bovenrand kan dan loodrecht op het vlak van het vakwerk niet meer weg. De onderrand blijft een probleem want deze kan nog wel horizontaal weg. Gelukkig is de onderrand meestal op trek belast (denk aan de buigligger) zodat knik- of kipgevaar afwezig is. Soms kan er wel druk in de onderrand komen bijvoorbeeld bij een vakwerkligger over meerdere steunpunten (= druk in de onderrand in de omgeving van de steunpunten). Dit kan wel een serieus probleem geven.

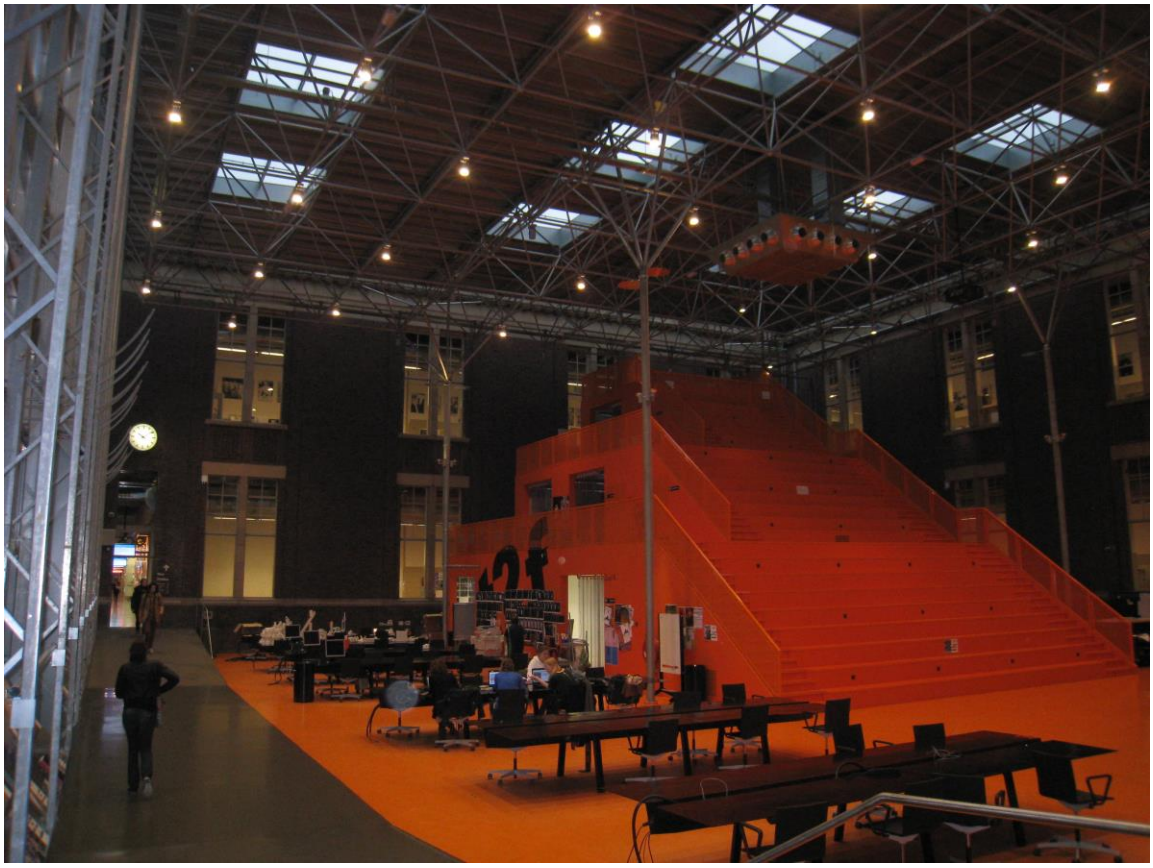
Een manier om dit fenomeen van uitknikken te voor komen en tevens een zeer sterke ligger te maken is de driehoeksligger. De driehoeksligger is op elke snelweg om de 500 meter te bewonderen als de ligger die de snelweg overbrugt zonder tussen steunpeuten en waar alle borden aanhangen. Eigenlijk zijn het drie vakwerken die schuin tegen elkaar aangezet worden en zo een stabiele 'koker'vormen en dus ook eenvoudig de wringing ten gevolge van de windbelasting op de soms grote borden kunnen verwerken.



1.4 Ruimtevakwerk

Zoals hiervoor al werd vermeld, zijn vakwerken tweedimensionale constructies. Om een ruimte te overspannen, zullen we ze naast elkaar moeten leggen en krijgen we eigenlijk hetzelfde als bij balken de keuze van de hart-op-hart afstand, het 'balken'-patroon, secundaire en primaire vakwerken etc etc. We kunnen echter ook een balkenrooster maken met vakwerken: vakwerken in twee onderling loodrechte richtingen de ruimte overspannend. Net als bij balken is er dan geen overspanningsvoordeel maar alleen een belasting voordeel. Ieder vakwerk in een balkenrooster-uitvoering draagt de helft van wat de vakwerken bij een enkele overspanningsrichting zouden dragen. Een dergelijke structuur van een balkenrooster

noemen we een ruimtevakwerk. Dit is een in de jaren 1960 tot 1990 veel toegepaste constructiemethode met vele industriële varianten (vooral de knoopverbindingen waar vele staven van een ruimtevakwerk bij elkaar komen) zoals de het Duitse Mero-systeem of het Nederlands Octatube-systeem. Deze ruimtevakwerken geven het minste materiaalverbruik te zien maar ze bevatten veel staven met, vervelend, heel veel verbindingen en dat gaf weer veel arbeidskosten. Ook de montage is niet eenvoudig: pas als de laatste staaf gemonteerd is, draagt alles goed en kunnen de tijdelijke ondersteuningen verwijderd worden. Tegenwoordig worden ze niet veel meer toegepast. Misschien dat met de optimalisatie reken-programma's en de computergestuurde vervaardiging en montage nieuw leven in deze materiaal-economische constructie geblazen kan worden. Een leuke toepassing van een ruimtevakwerk is te zien in de serres van het Bouwkundegebouw aan de Julianalaan in Delft.



Het ruimtevakwerk over de serres Julianalaan, driehoeksliggers in twee richtingen.

1.5 Dimensioneringsberekening van een vakwerk

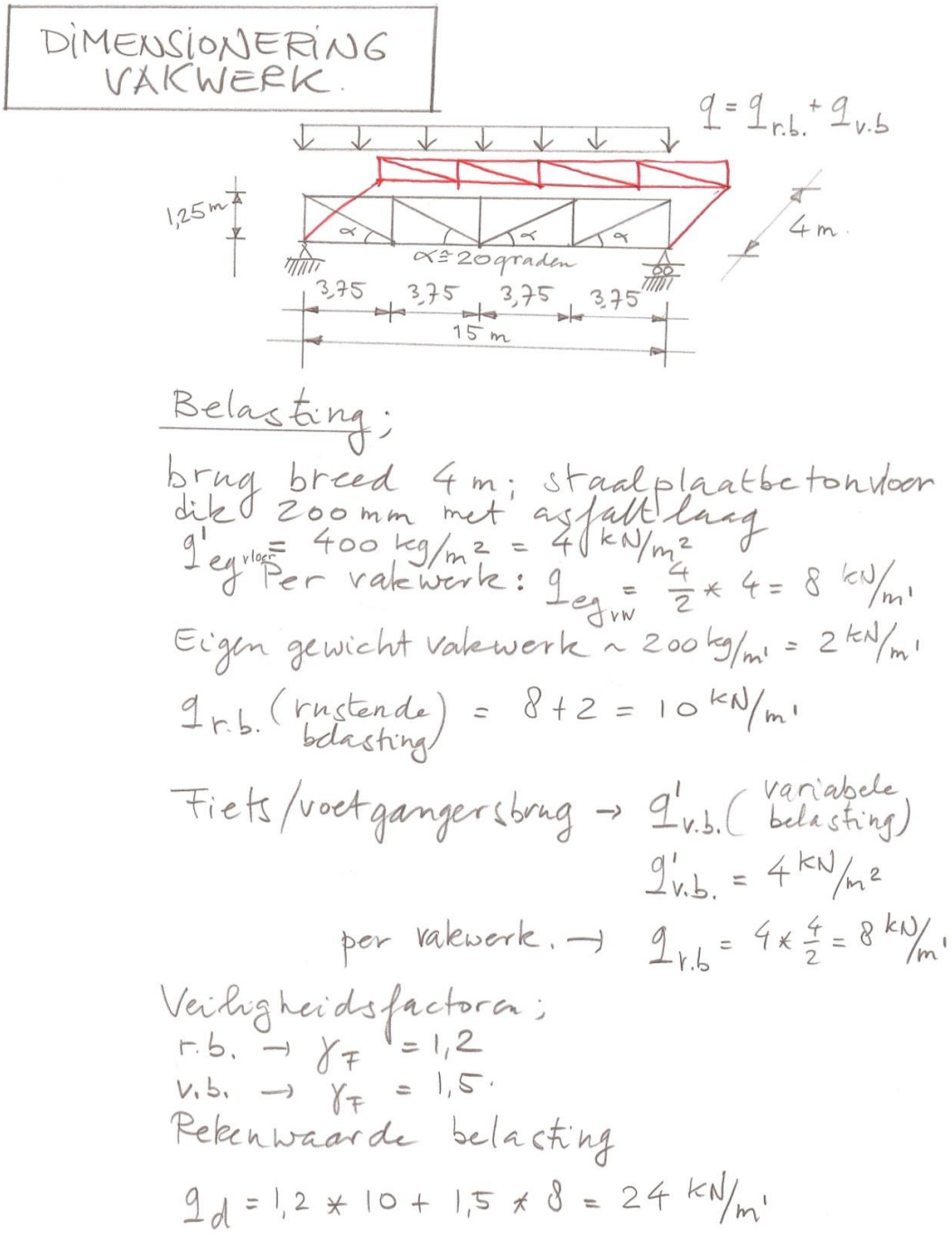
We kunnen een vakwerk snel uit rekenen door gebruik te maken van een paar speciale regeltjes die gelden voor een constructie opgebouwd uit driehoeken.

Ten eerste de dimensies van de onder-en de bovenrand. Bij één-veldsoverspanning zal er in de onderrand trek ontstaan en in de bovenrand druk. Denk maar aan een balk op buiging belast; de onderkant van de balk wordt uit elkaar getrokken en de bovenkant van de balk in elkaar gedrukt. In het midden van de overspanning waar de buiging (= het buigende moment M) het grootsts is, zal de kracht in de boven- en onderrand ook het grootst zijn en vanweg het horizontale evenwicht van krachten moet de drukkracht in de bovenrand net zo groot zijn als de trekkracht in de onderrand! We noemen deze kracht F_{staaf}. Het inwendige moment is dan (F_{staaf}) x h (= hoogte vakwerk) en dat moet gelijk zijn aan het uitwendige

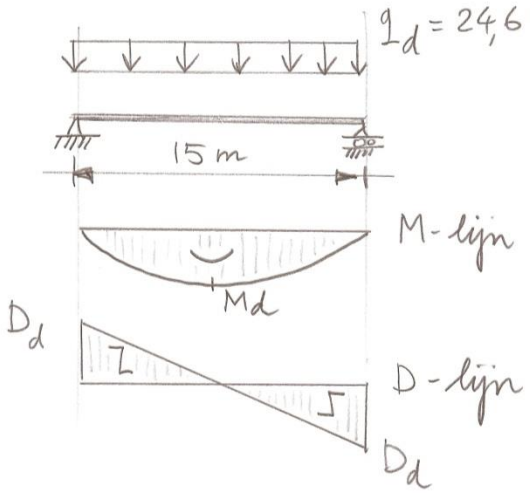
moment bij een q-belasting, zoals jullie ongetwijfeld weten 1/8 x q x l^2. Zo kunnen we de grootte van F_{staaf} berekenen en zit in de onderrand een trekkracht en in de bovenrand een drukkracht. We moeten controleren of de toelaatbare trekspanning in de onderrand niet overschreden wordt en voor de op druk belaste bovenrand moeten we controleren of deze staaf niet uit kan knikken (= maatgevend bij drukbelasting).

Ten tweede de benodigde maat van de diagonalen. Daartoe maken we een doorsnede vlak naast de oplegging; daar is immers de dwarskracht het grootsts en die bepaalt de dimensie van de diagonalen. De dwarskracht die in het sysyteem werkt moet worden opgenomen door de verticale ontbondenne van de kracht in de diagonaal. Dat is de enige mogelijke verticale kracht in de doorsnede; de krachten in de onder- en bovenrand werken enkel horizontaal.

In het onderstane rekenvoorbeeld is dit een keer voor jullie voorgedaan.



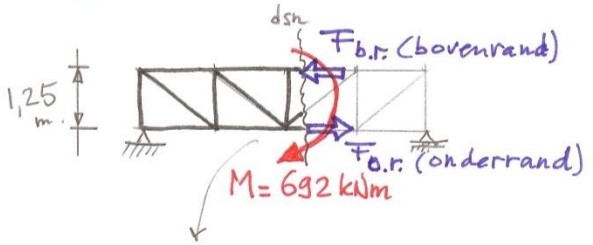
Dimensionering onder- en bovenrand / diagonalen



$$M_d = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2$$
$$M_d = \frac{1}{8} * 24{,}6 * 15^2$$
$$M_d = 692 \text{ kNm}.$$

$$D_d = \frac{1}{2} \cdot q_d \cdot l$$
$$D_d = \frac{1}{2} * 24{,}6 * 15$$
$$D_d = 185 \text{ kN}$$

① Evenwicht doorsnede in midden



In midden buigend moment maximaal; dwarskracht ~ nul dus diagonaalkracht in midden te verwaarlozen.

evenwicht hor. krachten;
$F_{b.r.} = F_{o.r.}$ (in grootte: $F_{b.r.}$ = druk; −, $F_{o.r.}$ = trek; +)

Momenten evenwicht

Minwendig = Muitwendig

$$M_{inw.} = F_{b.r.} (= F_{o.r.}) * 1{,}25$$
$$M_{uitw} = \frac{1}{8} q l^2 = 692 \text{ kNm}.$$

$$F_{b.r.} * 1{,}25 = 692 \Rightarrow F_{b.r} = 461 \text{ kN (druk)}$$
$$\Rightarrow F_{o.r.} = 461 \text{ kN (trek)}.$$

Dimensionering onderrand.

Op trek dimensioneren is makkelijk, je hoeft slechts de maximaal toelaatbare trekspanning te respecteren. Voor gewoon constructie staal 235 N/mm²

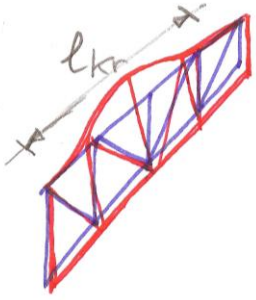
$$A_{benodigd} = \frac{461 * 10^3 [N]}{235 [N/mm^2]} = 1962 \, mm^2.$$

Bijvoorbeeld HE 200A ($A = 2233 \, mm^2$)
of ☐ 45 mm (massief ; $2025 \, mm^2$)
of ⌀ 50 mm (massief ; $1963 \, mm^2$).

Dimensionering bovenrand

Op druk dimensioneren is lastig, eigenlijk altijd knikcontrole nodig; knik is het grootste gevaar.
Probleem bij een vakwerk is de bepaling van de knieklengte.
Meestal is dit voor een individuele staaf de systeemlengte (= afstand tussen twee knopen). Voor de bovenrand van een vakwerk ligt dit moeilijker; de hele bovenrand kan uitknikken.

In het midden is de drukkracht maximaal, naar de opleggingen toe neemt hij, net als de trekkracht in de onderrand, af.
Daarom nemen we de knieklengte van de bovenrand op 0,75 * lengte vakwerk.



$$l_{kr.} = 0{,}75 * 15 \, m = 11{,}25 \, m.$$

Controle via Eulerse knikkracht

$$F_{kr.} = \frac{\pi^2 . E I}{l_{kr.}^2}$$

Extra veiligheid op knik; $\gamma_k = 5$ ← E_{staal}

$F_{kr.} = 5 * 461 = 805 \times 10^3 [N] = \frac{\pi^2 * (2{,}1 * 10^5) * I_{ben.}}{(11250)^2}$

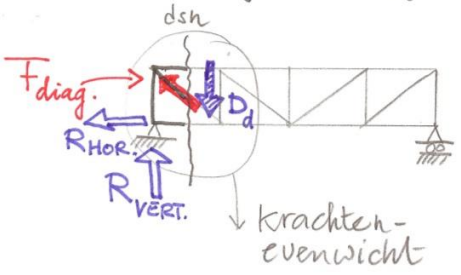
$I_{benodigd} = 49{,}2 * 10^6 \ mm^4$

Bijvoorbeeld koker $\square$ 220 mm; $t = 8{,}8$ mm ← wanddikte
($I_{gd.} = 53{,}0 * 10^6 mm^4$)

of buis ϕ 254 mm; $t = 10$ mm
($I_{gd.} = 57{,}1 * 10^6 mm^4$)

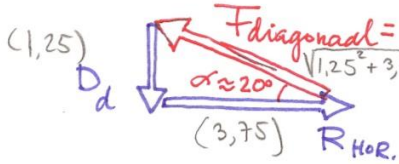
Wij kiezen voor druk belaste profielen liever een symmetrisch profiel (koker of buis) omdat een H- of I- profiel een zwakke as heeft.

(2) Evenwicht in doorsnede bij oplegging.



Bij oplegging; $M \approx 0$
dus $F_{b.r.} = F_{o.r} \approx 0$

Dwarskracht D_d is juist maximaal:
$D_d = \frac{1}{2} ql = 185$ kN



$F_{diag.} = 585$ kN.

Vallende diagonalen dus trek in diagonalen; toelaatbare maximale treksspanning is 235 N/mm². (constructiestaal)

$A_{ben.} = \frac{585 * 10^3}{235} = 2489 \ mm^2$ → $\square$ 50 mm
→ ϕ 56 mm

Als het stijgende diagonalen waren geweest  dan zouden de diagonalen op druk belast zijn en ontstaat er weer knikgevaar.

Voor de diagonalen zijn wel de systeemlengte gelijk aan de knik lengte; in dit geval dus $\sqrt{1,25^2 + 3,75^2} = 3,95$ m.

Controle via Eulerse knikkast.
met veiligheid $\gamma_F = 5$

$$F_{kr.} = 5 * 585 = 2925 * 10^3 [N] = \frac{\pi^2 * (2,1 * 10^5) * I_{ben.}}{(3950)^2}$$ (E_{staal})

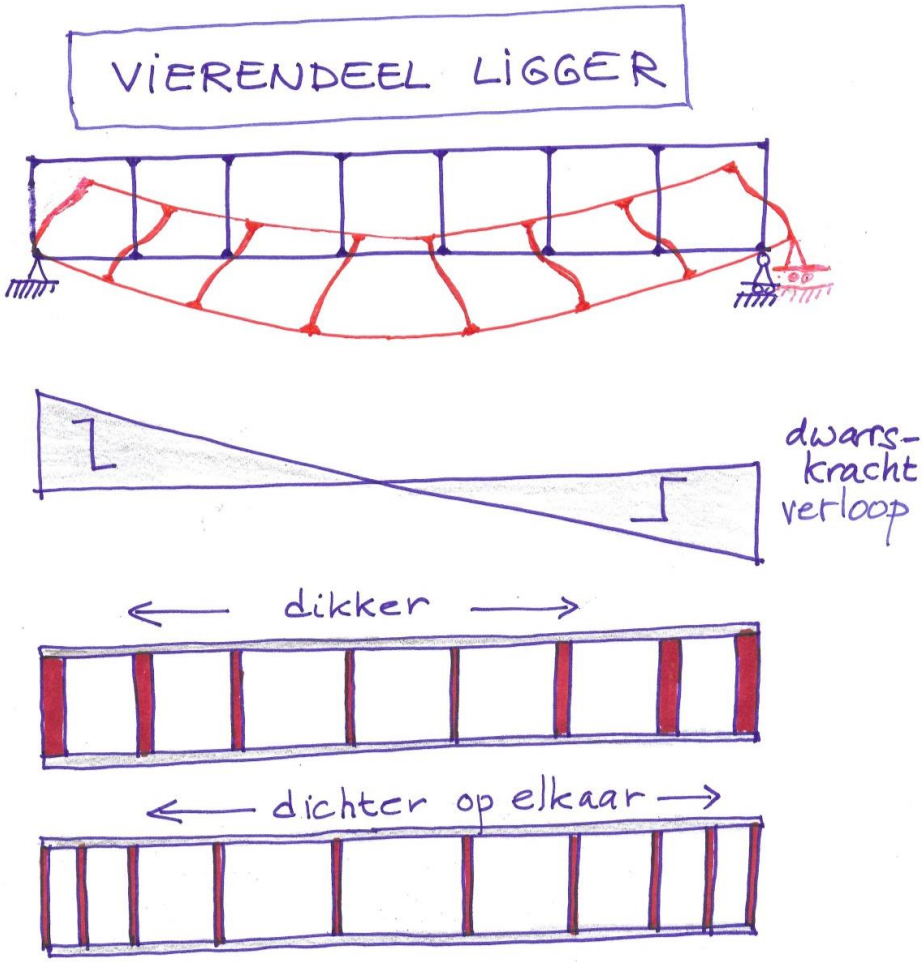
$$I_{benodigd} = 22,0 * 10^6 \text{ mm}^4$$

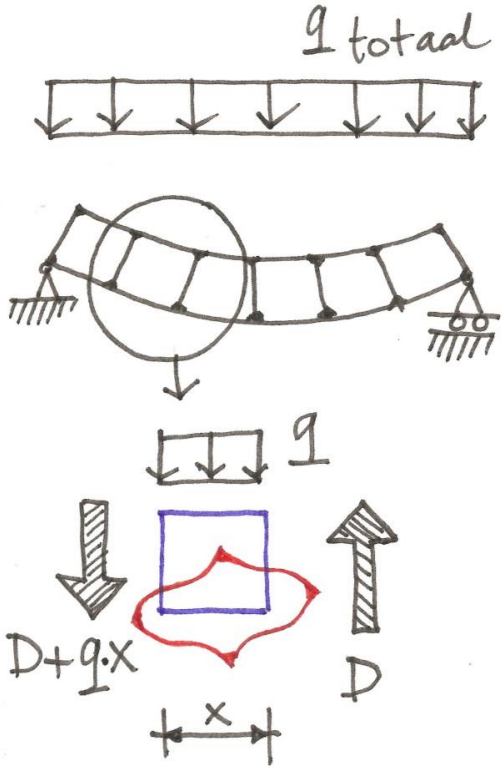
Bijvoorbeeld koker $\square$ 180mm ; t = 8mm
($I_{gd.} = 25,9 * 10^6$ mm^4)

of buis ϕ 203mm ; t = 8mm
($I_{gd.} = 23,3 * 10^6$ mm^4)

1.6 De Vierendeel-ligger

De Vierendeel-ligger is eigenlijk een vakwerk waar men de diagonalen uit heeft weggelaten. Hierdoor zijn er geen driehoeken meer en wordt de constructie veel slapper. Dit type ligger is genoemd naar de Belgische ingenieur Arthur Vierendeel die rond 1890 deze ligger bedacht. Zij werden later toegepast voor bruggen over het Albertkanaal in België. We zeggen weleens dat Vierendeel-liggers op dwarskracht-overdracht dragen. De vakken van de Vierendeel liggers worden door de dwarskracht als het ware gedeformeerd. In de getekende figuur is dat goed te zien naarmate je dichter bij de oplegging komt neemt de vervorming van de staanders enorm toe en lijkt ieder vlakje steeds meer te verdraaien. Hier kun je bij het optimaliseren van dit constructie type gebruik van maken door of de staanders dichter op elkaar te zetten naar mate je dichter bij de opleggingen komt of de staanders steeds dikker te maken (= meer weerstand tegen verbuigen).





Elementaire vervorming van één vak van de Vierendeel ligger: de dwarskrachtvervorming.

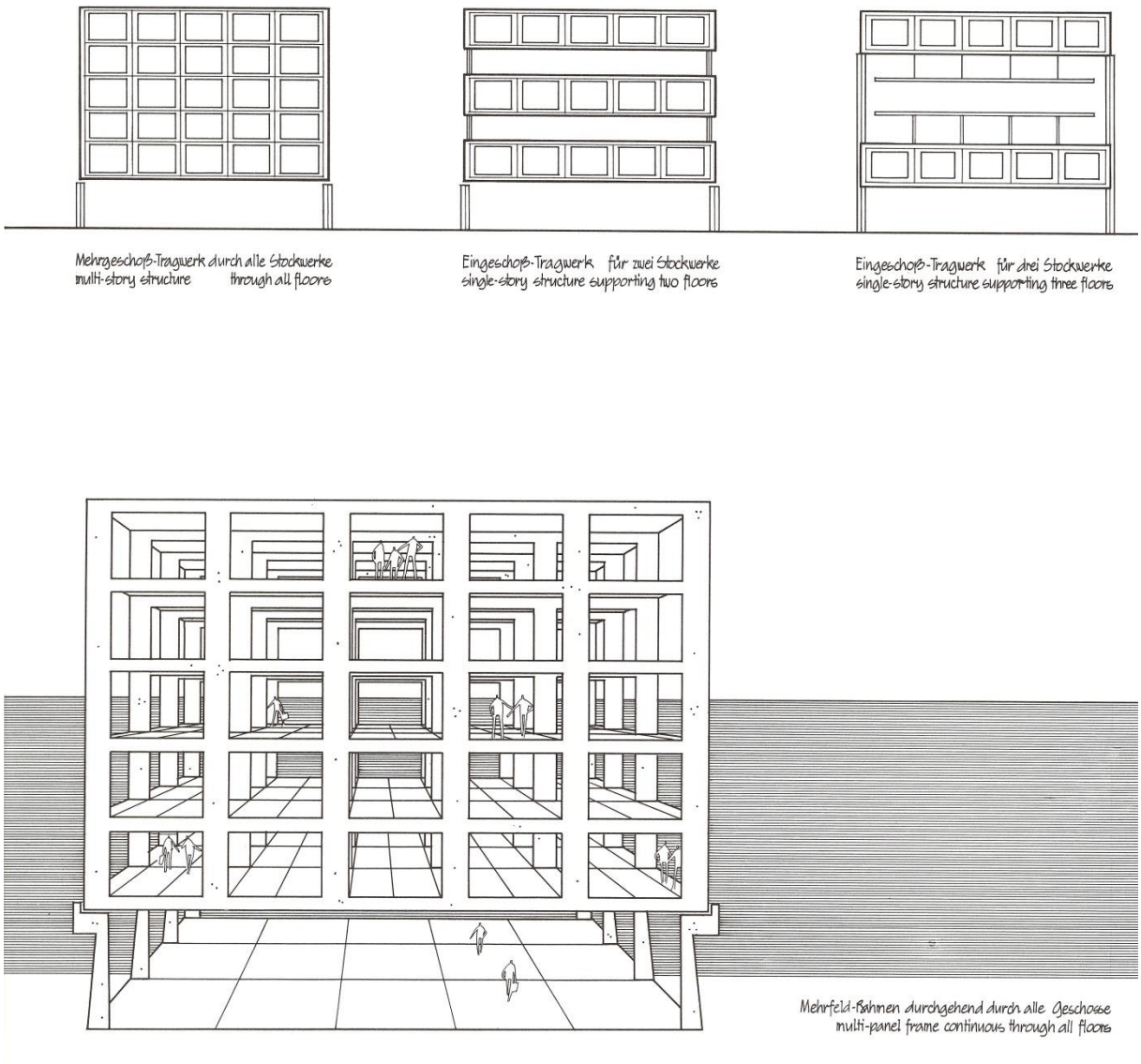
De Vierendeel-ligger is geen economische constructie. Om de zelfde weerstand tegen buiging (= stijfheid) te krijgen als een vakwerk met gelijke overspanning en belasting zal er zo'n twee maal zoveel materiaal ingestopt moeten worden. Soms biedt de afwezigheid van de diagonalen echter esthetische of functionele (je stoot je hoofd niet) voordelen zodat de Vierendeel-ligger toch wel eens wordt toegepast.

Een aardige toepassing van een Vierendeelligger is te zien in de kantine van Bouwkunde aan de Julianalaan in Delft. Hier dragen Vierendeelliggers van beton (!) het dak.



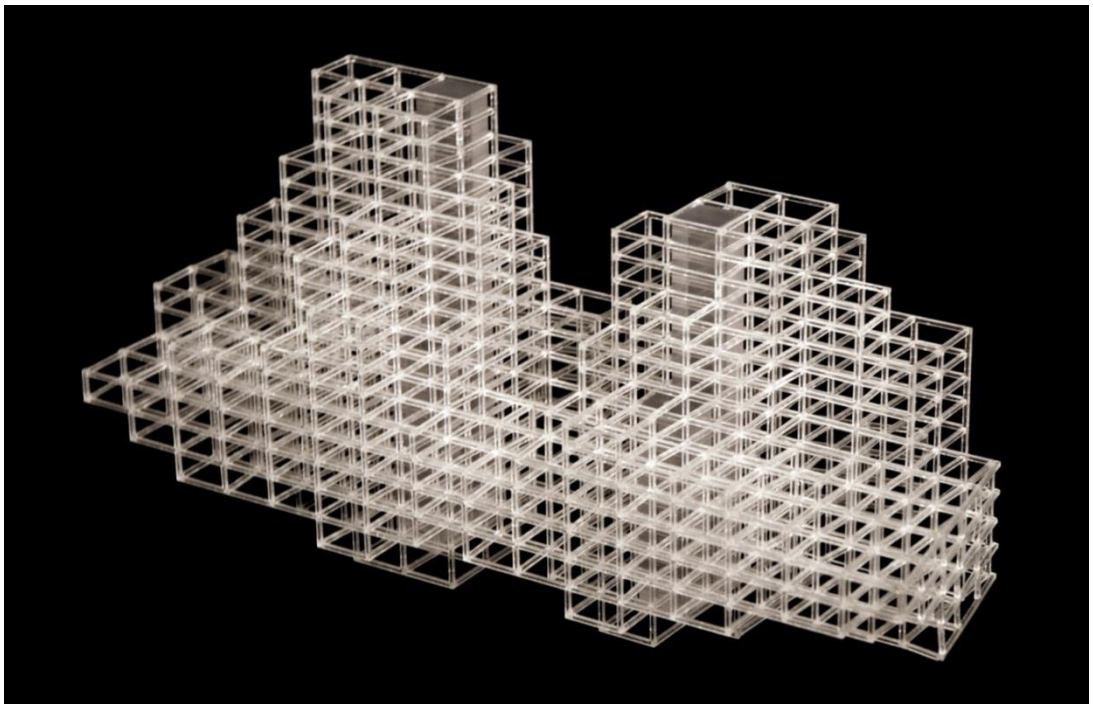
Het Vierendeel-dak boven de kantine van Bouwkunde; let op het laatste vak voor de oplegging in de muur: dichtgezet om meer weerstand tegen dwarskracht te krijgen!

Met een constructie opgebouwd met het Vierendeel-principe (= alleen balken en kolommen met (zeer) stijve hoekverbindingen) kun je echter verrassende constructies maken, zie de afbeeldingen hierna die uit de jaren 1950 dateren. Bedenk altijd wel dat dit zeer oneconomische constructies zijn: veel materiaal nodig en veel werk aan de verbindingen (= arbeidsloon- en bouwtijd-verhogend).



Diverse mogelijke gebouwvormen gebruik makend van Vierendeel-werking.

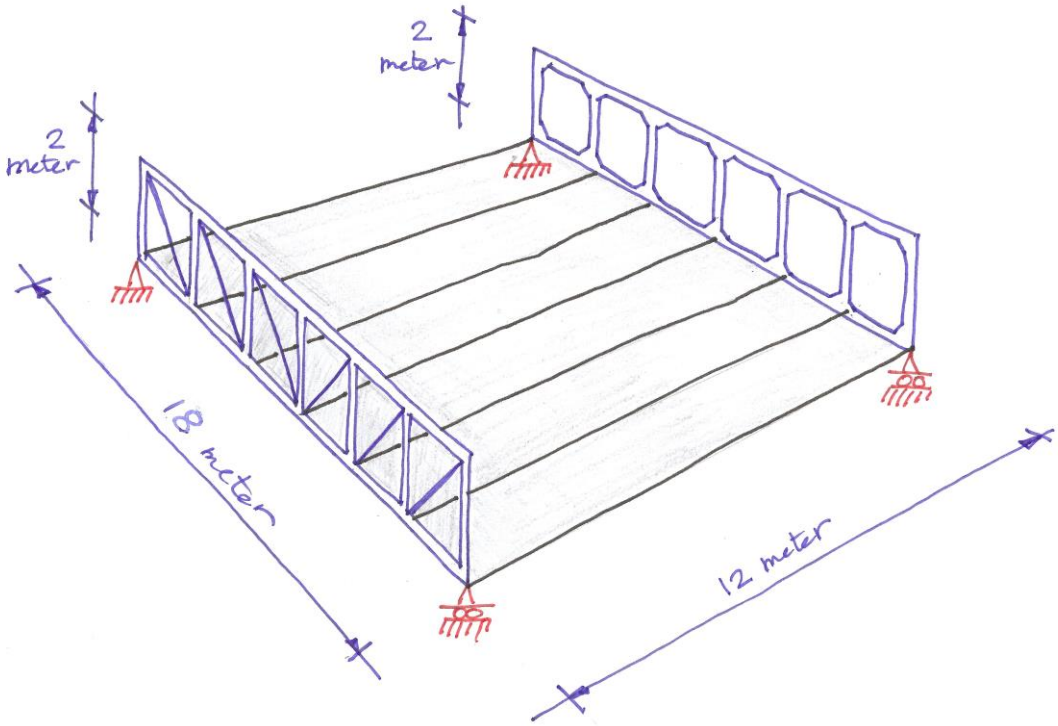
Toch bieden de moderne rekentechnieken met de computer, vooral de optimalisatie programma's (= op iedere positie juist dat profiel dat nog net, binnen alle veiligheidseisen, voldoet) de mogelijkheden Vierendeel-constructies op een concurrerende wijze in te kunnen zetten. Het nieuwe Stadskantoor van Rotterdam (een ontwerp van OMA) is hiermee opgebouwd: een drie dimensionaal Vierendeel-skelet van enkel balken en kolommen dat alle krachten inclusief stabiliteit (= vooral wind) kan opnemen. 'The Cloud' wordt dit ontwerp bij OMA genoemd, waarmee elke mogelijke toekomstige vorm mogelijk wordt.



The 'Cloud': allemaal balken en kolommen in een 3D Vierendeel-verband voor het Stadskantoor Rotterdam, ontwerp O.M.A.

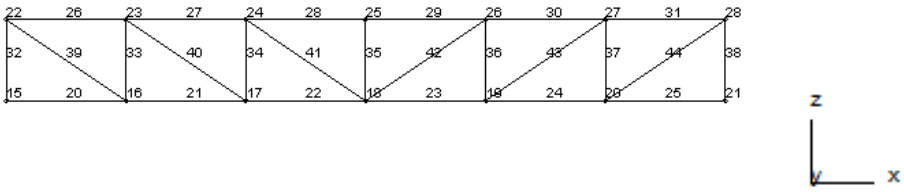
1.7 Berekening vakwerk en Vierendeel-ligger

Tot slot van dit hoofdstuk gaan we rekenen, met de computer en de optimalisatie programma's om een gelijkwaardige oplossing voor zowel een vakwerk (met diagonalen) als een Vierendeel-constructie met elkaar te kunnen vergelijken.

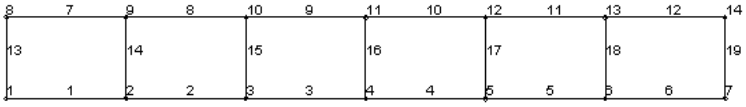


Als eerst wordt het model ingevoerd in het rekenpakket. Hierbij wordt een logische knoop- en elementnummering aangehouden:

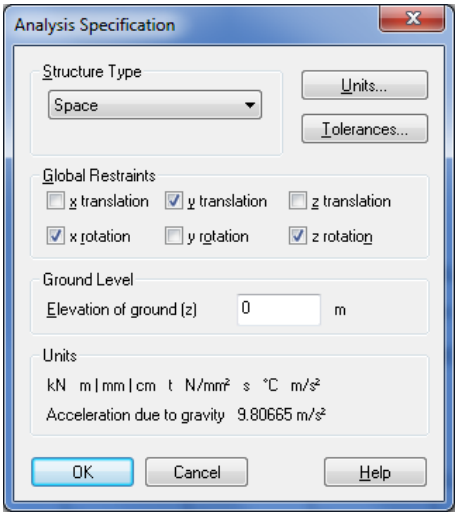
Vakwerk:



Vierendeel:

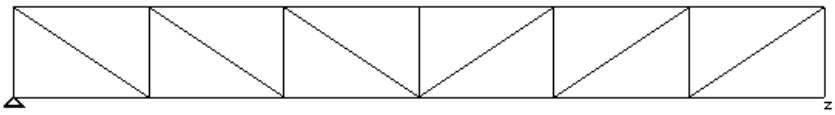


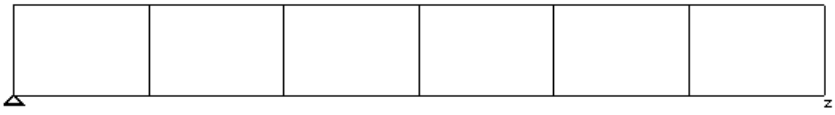
Omdat het hier gaat om een 2D constructie en we de effecten uit het vlak niet gaan beschouwen kunnen we het aantal vrijheidsgraden beperken. De verplaatsing uit het vlak (in y-richting) en alsmede de rotatie uit het vlak (om de x en z-as) worden vastgezet.



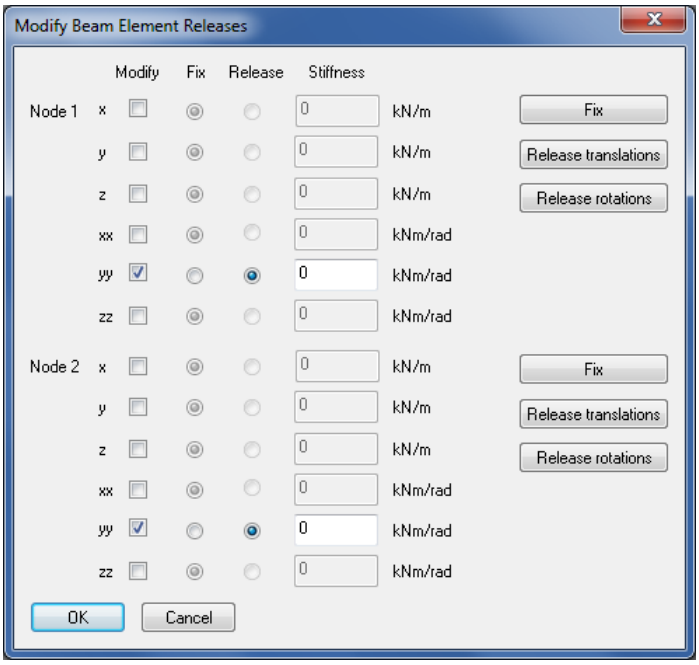
Bij het rekenmodel wordt geen reken gehouden met het eventueel wegknikken van de bovenrand van het vakwerk. Om dit in de praktijk toe te kunnen passen moet de bovenrand voldoende uit het vlak gesteund worden, bijvoorbeeld door een vloer.

De volgende stap is het aanbrengen van de knoopondersteuningen; aan 1 zijde moet de constructie schuivend opgelegd worden:

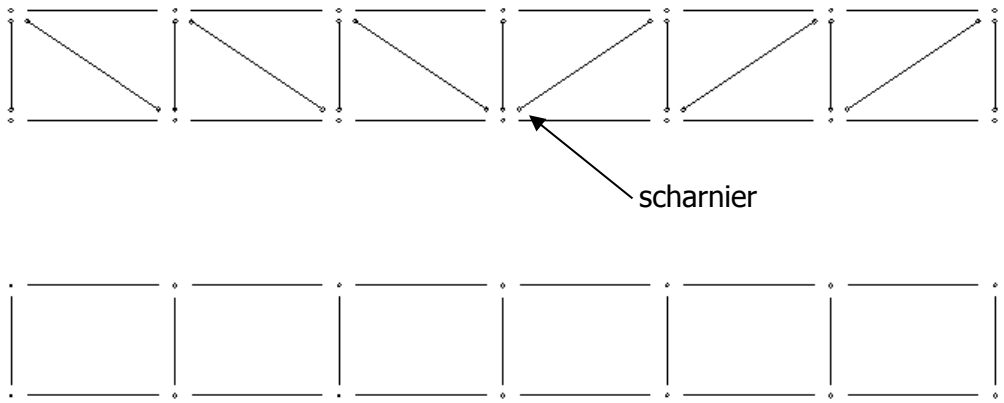




Om zuiver te kunnen rekenen is het bij de vakwerkconstructie van belang dat de diagonalen en stijlen geen momenten gaan opnemen. Er zullen daarom schanieren worden aangebracht aan de uiteinden van deze staven. Dit kan gedaan worden door om de rotatie om de sterke as vrij te laten.



Dit zorgt voor onze uiteindelijke schematisatie (let op: voor de duidelijkheid van de scharnieren zijn alle staven korter getekend dan dat ze werkelijk zijn):



Om een berekening te kunnen maken zullen er eerst profieleigenschappen opgegeven moeten worden. Er is er voor gekozen het vakwerk te groeperen in vier verschillende profielen en het vierendeel in drie verschillende profielen:

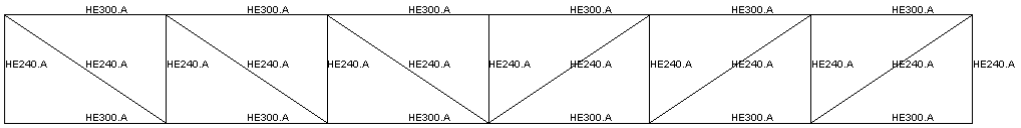
Vakwerk:

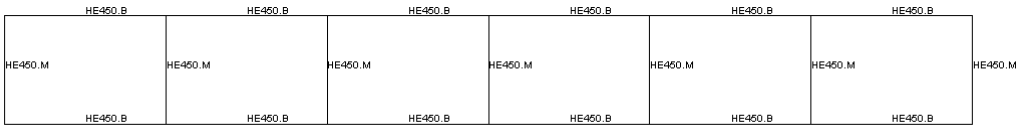
Defaults	Section #	Steel	Explicit
1	Vakwerk-onderrege	Steel	CAT HE HE300.A
2	Vakwerk - bovenre	Steel	CAT HE HE300.A
3	Vakwerk - stijlen	Steel	CAT HE HE240.A
4	Vakwerk - diagonal	Steel	CAT HE HE240.A

Vierendeel:

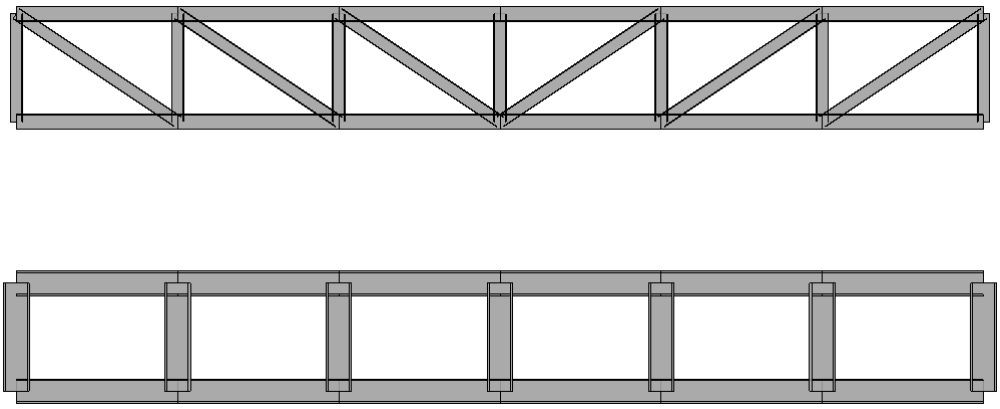
11	Vierendeel - onderr	Steel	CAT HE HE450.B
12	Vierendeel - bovenr	Steel	CAT HE HE450.B
13	Vierendeel - stijlen	Steel	CAT HE HE450.M

Grafisch ziet dat er als volgt uit:





Met de dimensies van de profielen getekend:

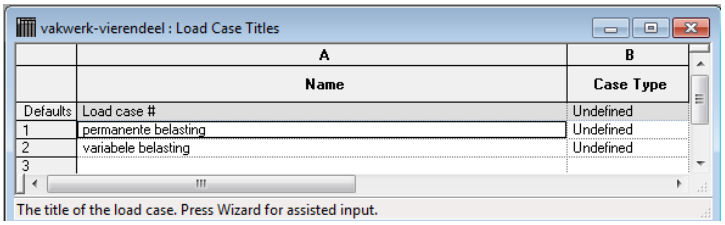


Zoals te zien zijn de profielen van het vierendeel een stuk zwaarder. Ondanks dat het minder elementen bevat, zal hierdoor de hoeveelheid gebruikt materiaal toenemen:

Het vakwerk heeft een verbruik van: 5,3 ton staal
Het vierendeel heeft een verbruik van: 9,8 ton staal

In dit geval komt dat neer op een toename van het staalverbruik van 85%. Naast het staalverbruik neemt overigens ook de hoeveelheid werk aan de verbindingen sterk toe en dat kost veel geld (arbeidsloon). Vandaar dat de prijs van een Vierendeel-ligger wel een factor 2 à 3 hoger is dan van een (qua functioneren gelijkwaardig) vakwerk.

De volgende stap is het aanmaken van belastinggevallen, het invoeren van de belastingen en het maken van de combinaties.
Er worden twee belastinggevallen aangemaakt (permanent en variabel):



Voor beide belastingen wordt er op de onderrand van de constructies een belasting ingevoerd:

vakwerk-vierendeel : Beam Loading

Record	A Beam List	B Load Case	C Type	D Axis	E Projected	F Direction	G Position 1 [m], [%]	H Load 1 [kN], [m]	I Position 2 [m], [%]	J Load 2 [kN], [m]
Defaults	none	3	Uniform	Global	~	z	0	0	100%	0
1	1 to 6 20 to 25	1 : permanent	Uniform	Global	~	z		-36		
2	1 to 6 20 to 25	2 : variabele b	Uniform	Global	~	z		-60		
3										

Beam Loads | Pre-stress | Distortions | Thermal

The item to which the load is applied

Tevens wordt opgegeven dat het programma het eigengewicht van de constructieonderdelen moet meenemen in belastinggeval 1: permanent:

vakwerk-vierendeel : Gravity Loading

Record	A Element List	B Load Case	C Gravity Factors x [g]	D y [g]	E z [g]
Defaults	all	3	0	0	-1
1	all	1 : permanent	0	0	-1
2					

The list of elements to apply the load to.

Vervolgens worden er combinaties ingevoerd voor zowel de bruikbaarheids- (SLS) als de uiterste grenstoestand (ULS):

vakwerk-vierendeel : Combination Cases

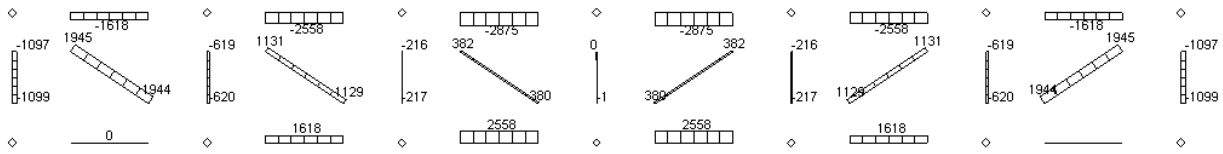
Case	A Name	B Description
Defaults	Combination case #	
1	SLS	A1 + A2
2	ULS	1.35A1 + 1.5A2
3		

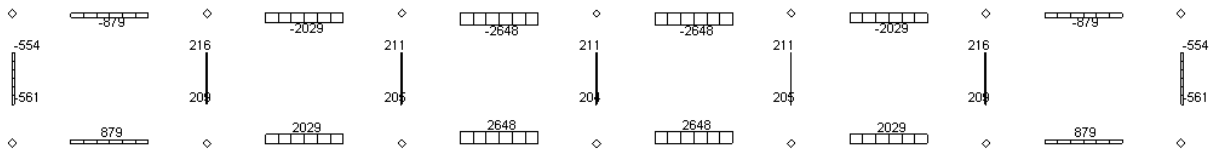
Description | Factors

The name of the combination case. Press Wizard for assisted input.

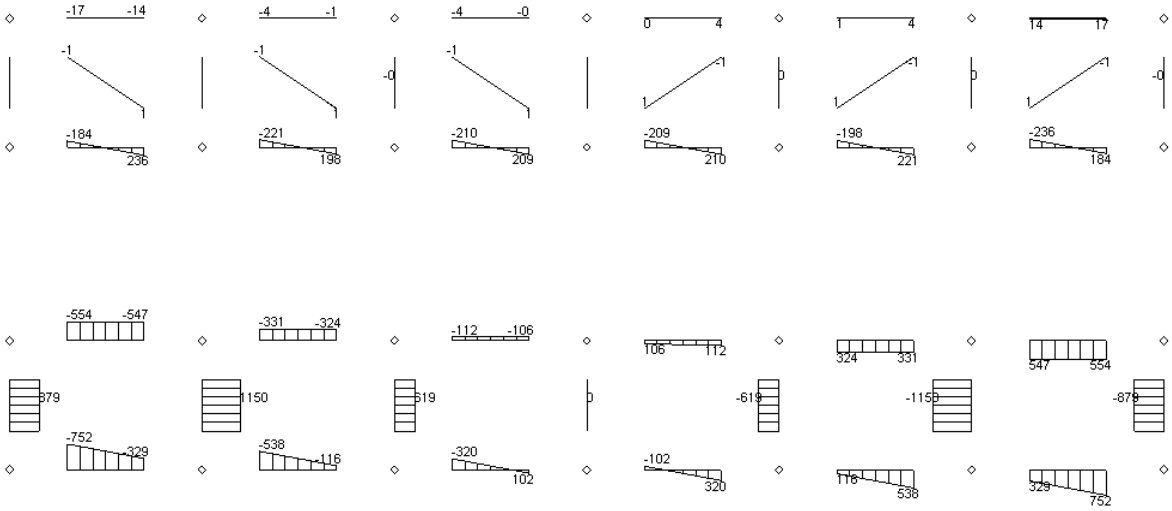
Als alles is ingevoerd, kunnen de krachten worden uitgerekend. Dit wordt gedaan in de uiterste grenstoestand (combinatie 2: ULS). De afmetingen van de profielen moeten getoetst worden op deze krachten. Ten behoeve van de leesbaarheid zijn alle staven verkort getekend:

De normaalkrachten:

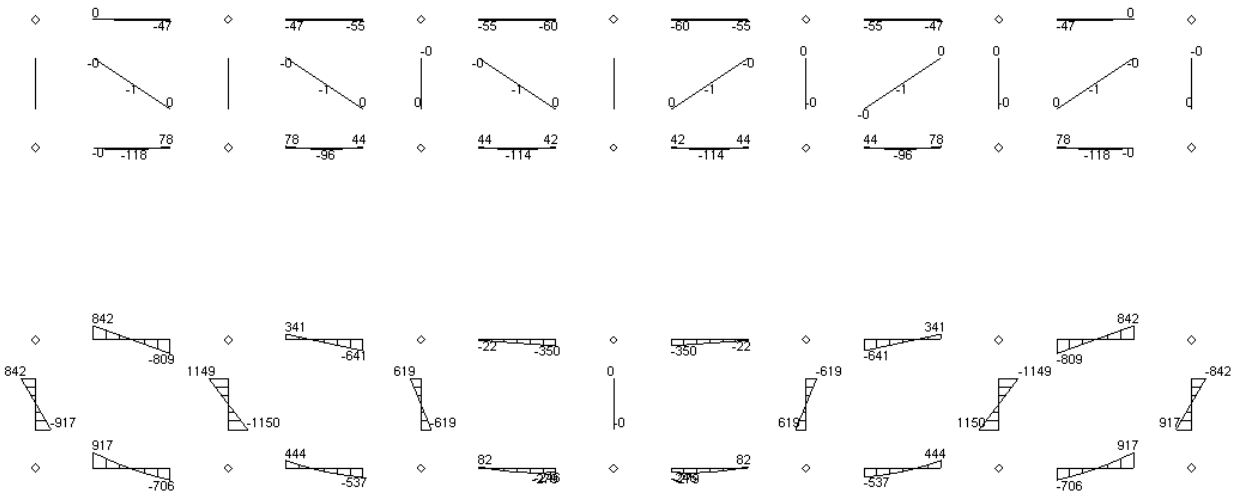




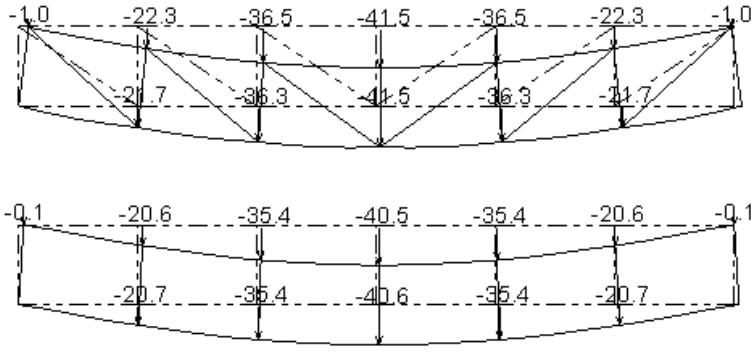
De dwarskrachten:



De momenten:



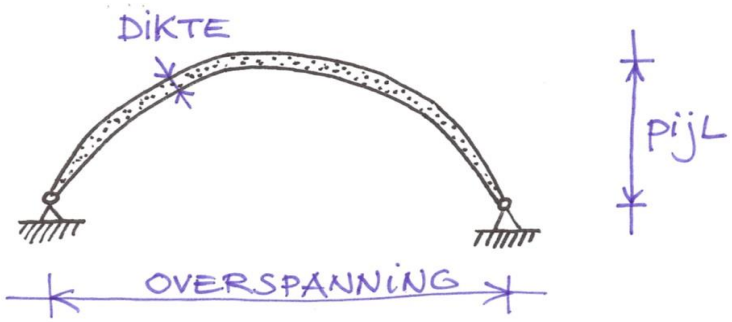
Naaste de sterkte moet ook de stijfheid voldoen. De stijfheid wordt beschouwd in de bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS):



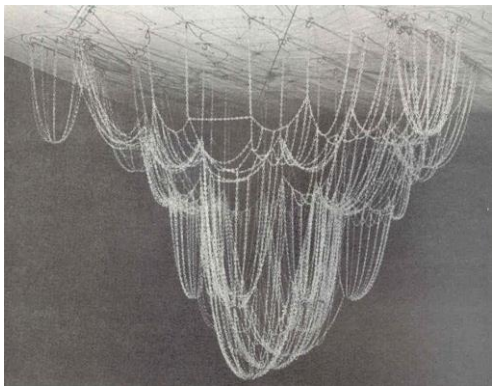
Zoals te zien gedragen beide constructies zich ongeveer even stijf.

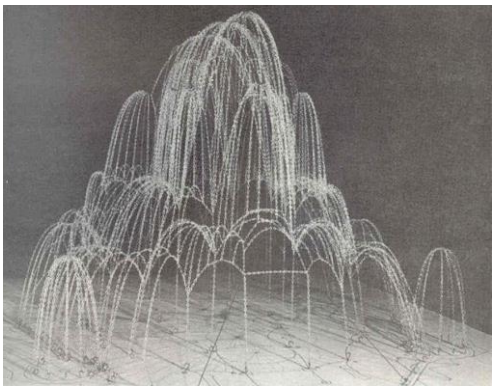
2 Bogen & Kabels

Bogen en kabels zijn twee vormen van constructie elementen die we veel te weinig toepassen, we denken liever in de vorm van rechte elementen zoals balken en kolommen (eendimensionaal) of vloeren en wanden (tweedimensionaal). Waarschijnlijk omdat deze rechte elementen veel makkelijker te maken zijn. Maar bogen en kabels zijn zeer economische constructie elementen en ook in potentie zeer stijve toevoegingen in een gebouw. Bogen werken onder druk maar daar moeten ze wel een zekere hoogte hebben; de pijl van een boog. Wordt deze pijl te klein dan gedraagt de boog met een te kleine pijl zich als een (buig)ligger.



Kabels kunnen alleen trekkrachten overbrengen. Op druk belast geven zij geen enkele sterkte. Eigenlijk knikken ze vrijwel meteen uit. Zo op het eerste gezicht is er geen enkele verwantschap tussen een boog en een kabel. Toch zijn zij familie, alleen zijn ze elkaars tegenpool. Werkt de boog op drukkrachten, de kabel werkt alleen op trekkrachten. Maar keren we een kabel om dan zien we de boogvorm en keren we een (vrijhangende) kabel om dan krijgen de boogvorm. De Spaanse architect Gaudi maakte daar bij zijn ontwerpwerk voor kerkgewelven gebruik van door met hangende kettingen (op trek belast dus) de gewenste gewelfvorm te maken (zie afbeelding hieronder). Als dat was gelukt, werd alles opgemeten en (omgekeerd) getekend en als boogconstructie gemetseld (op druk belast).

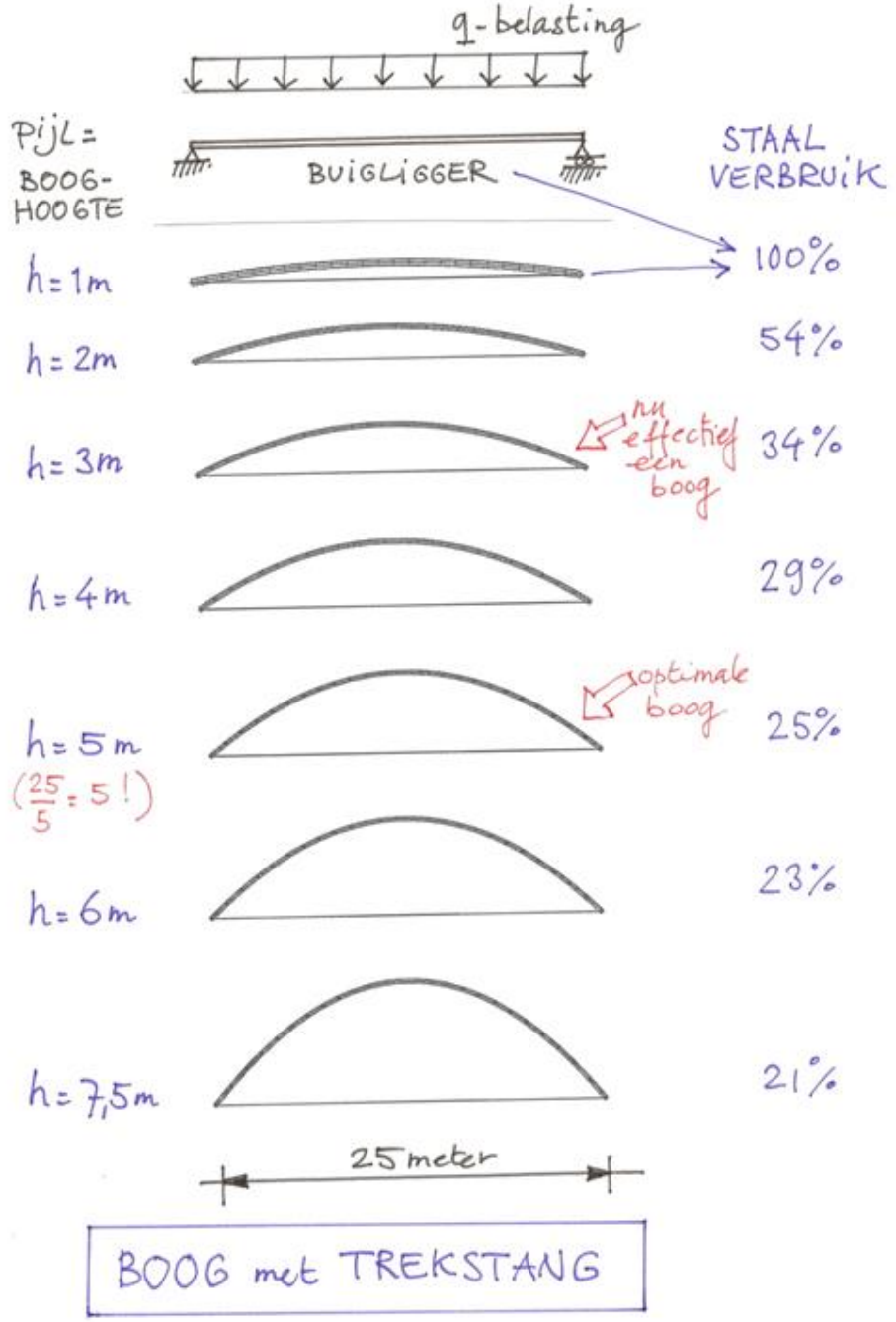




2.1 Bogen

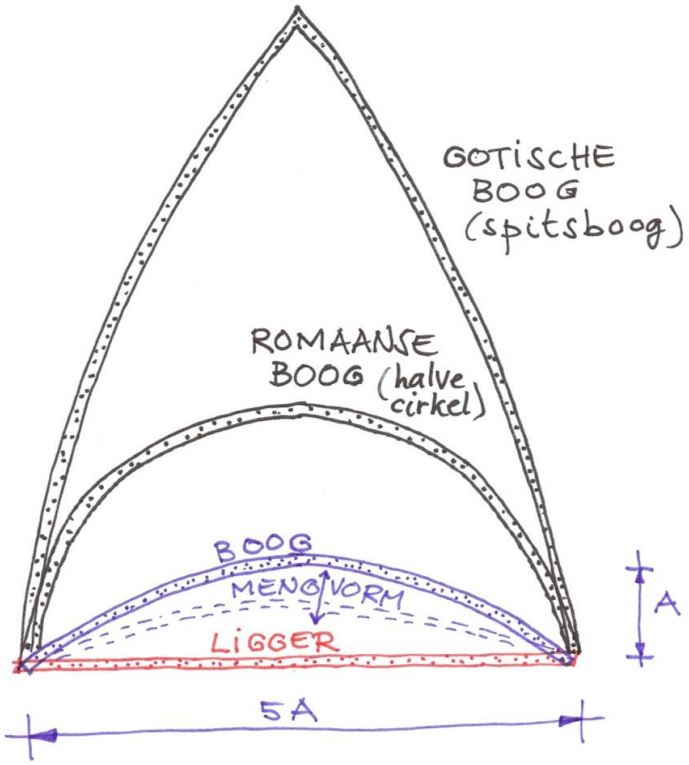
Zoals al is vermeld moet een boog een zekere hoogte hebben; een pijl anders werkt de boog niet als boog op druk maar als ligger op buiging. Van een pijl-overspanningsverhouding van 1 op 5, dus 5 keer de pijl is de overspanning werkt een boog pas echt als boog. Hoe minder de pijl hoe meer de boog zich als een (buig)ligger gaat gedragen, tot hij helemaal plat is en eigenlijk een ligger is geworden.

Bogen brengen door drukspanning de krachten over naar de ondergrond; de fundering. Gelijkmatig verdeelde belasting op een boogconstructie, zoals het eigen gewicht, vormen geen probleem maar puntlasten zijn echter gevaarlijk op een boog. Er ontstaat dan de kans dat de boog 'doorslaat' en plotseling bezwijkt. Een boog is een op druk belaste constructie en dat betekent dat er knikgevaar dreigt.



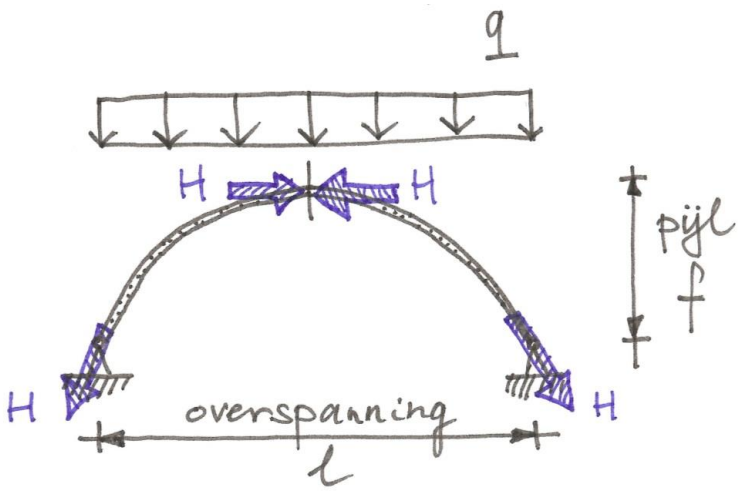
Wanneer wordt een buigligger een boog?

Het bepalen van de drukkracht in een boog kan op redelijk eenvoudige wijze met een ligger analogie. Je vergelijkt het uitwendige moment dat op een (platte) ligger met dezelfde overspanning zou gaan werken met het inwendige moment dat een boog kan opnemen, namelijk de drukkracht in het hoogste punt vermenigvuldigd met de arm (= pijl van de boog). Zodoende kun je snel de drukspanning in een boog controleren en zelfs een knikgevaar analyse uitvoeren.



Overzicht boogvormen.

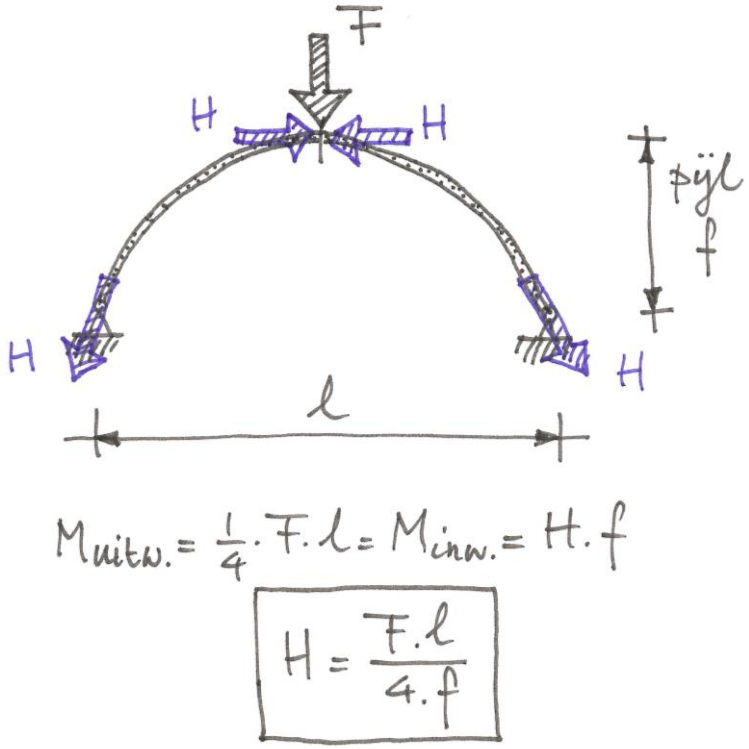
In de figuren hieronder een afleiding van de formule voor de drukkracht in een boog voor een gelijkmatig verdeelde belasting q en een puntlast F op de top van de boog. Let op! Dit zijn benaderingsformules die een goede indicatie leveren maar geen exact antwoord. Zeker bij bogen die qua vorm afwijken van de ideale boogvorm (de verhouding 1 op 5 tussen overspanning en pijl) kan dit aanzienlijk afwijken.



$$M_{uitw.} = \frac{1}{8} \cdot q \cdot l^2 = M_{inw.} = H \cdot f$$

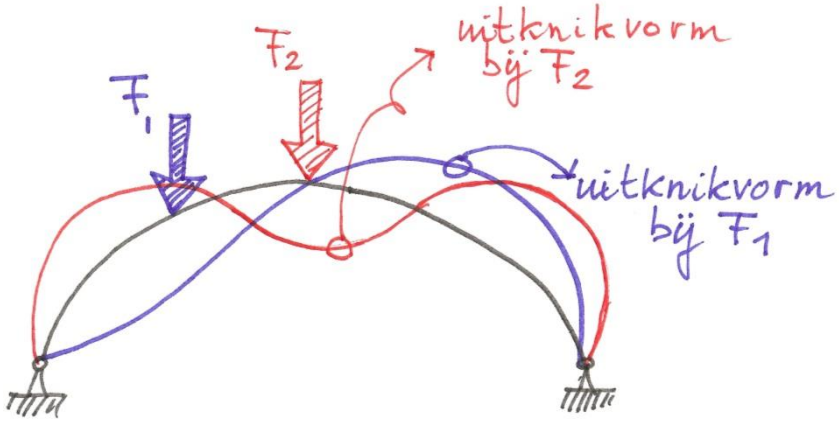
$$H = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f}$$

Afleiding drukkracht in boog met een ligger-analogie, belast door een gelijkmatige verdeelde q-last.

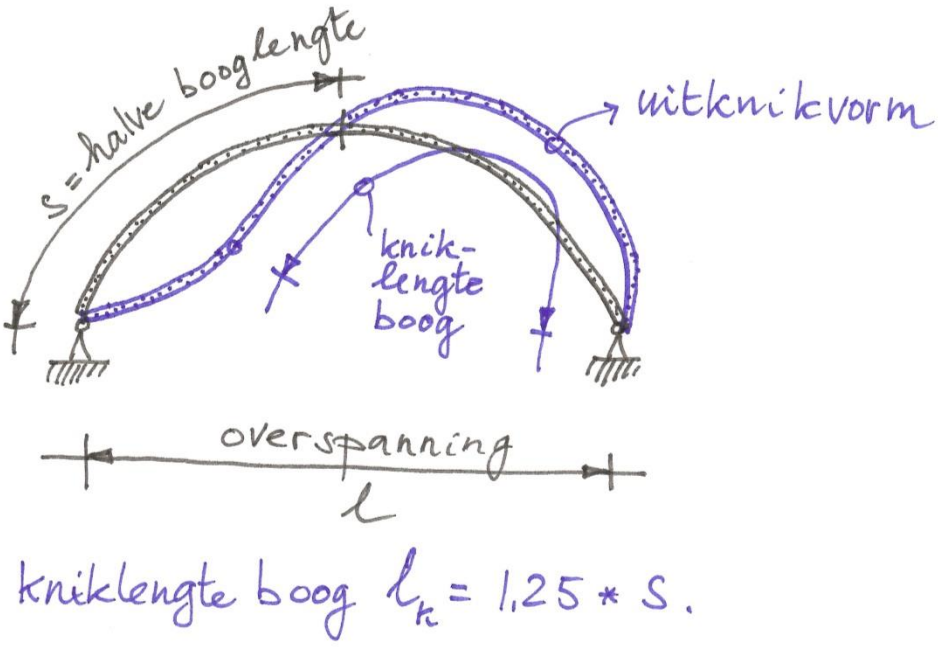


Afleiding drukkracht in boog met een ligger analogie, belast door een puntlast F in de top van de boog.

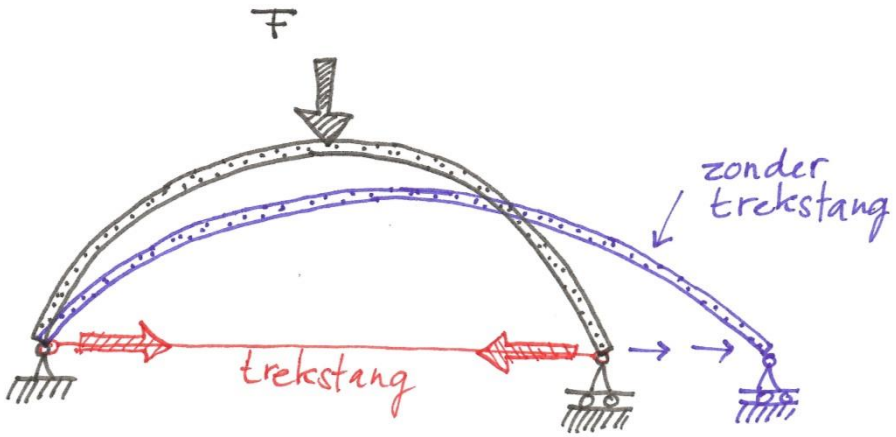
Een boog kan op diverse manieren, afhankelijk van de belastingpositie, uitknikken.



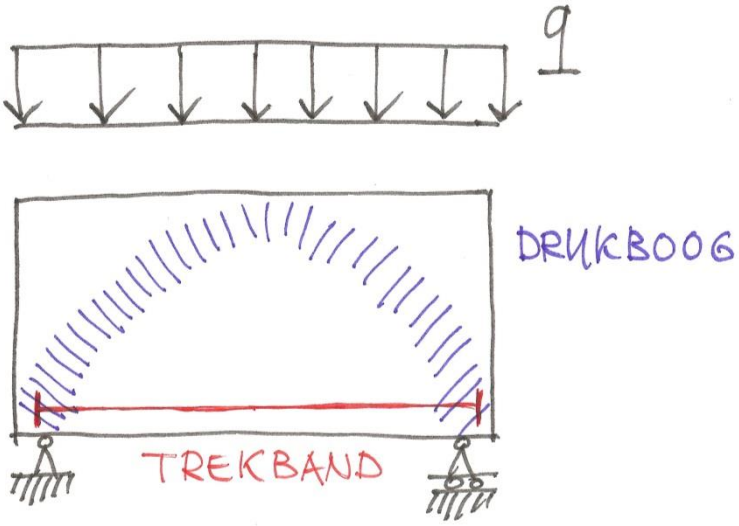
Knikken betekent plotseling zijdelings uitwijken en bij een boog kan dat op twee manieren: ten eerste in het vlak van de boog en ten tweede daar loodrecht op. Loodrecht op het vlak van de boog kan voorkomen worden door het dakvlak dat op de bogen gelegd wordt als koppeling tussen de bogen te gebruiken. Dan kan de boog in het dakvlak niet bewegen en dus niet uitknikken. Uitknikken in het vlak van de boog ligt ingewikkelder. Als een goede benadering geldt: l_k= 1,25 x (halve booglengte). Dit geldt voor bogen met pijl van 0,15 tot 0,50 x de overspanning. Als maatgevende kracht wordt de normaalkracht (= drukkracht) op ¼ van de booglengte vanaf de oplegging aangehouden. Je kunt een boog gewoon op knik controleren met de formule van Euler; $F_{kr.} = \pi^2$ x EI / l_{kr}^2. Zie ook figuur.



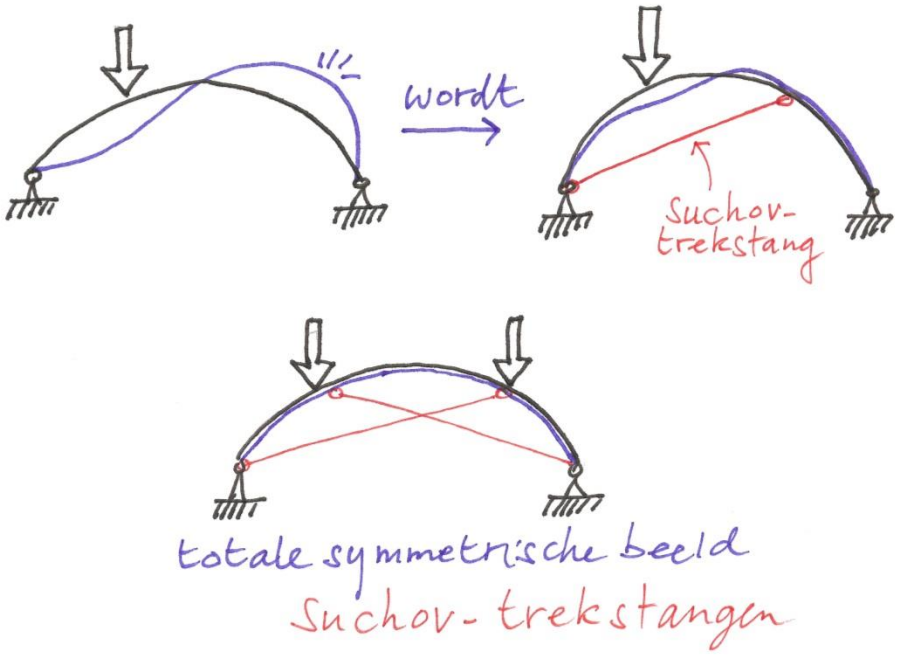
Tot nu toe hebben we de steunpunten als scharnieren aangegeven. Dat wil zeggen plaatsvaste punten die de druk-of spatkrachten uit de boog goed kunnen opnemen. In het buitenland met bijvoorbeeld een rotsbodem geen probleem maar in de West-Nederlandse ondergrond; waar altijd lange palen nodig zijn, is de opnamecapaciteit voor horizontale krachten zeer gering. Ook als een boog op kolommen (opgetild) staat is er geen capaciteit voor de horizontale krachten die door de druk- of spatkrachten van de boog automatisch ontstaan. Daarom moeten we een constructie element toevoegen: de trekstang. Deze trekstang houdt de twee voetpunten van de boog bij elkaar en herstelt het inwendige evenwicht op eenvoudige wijze.



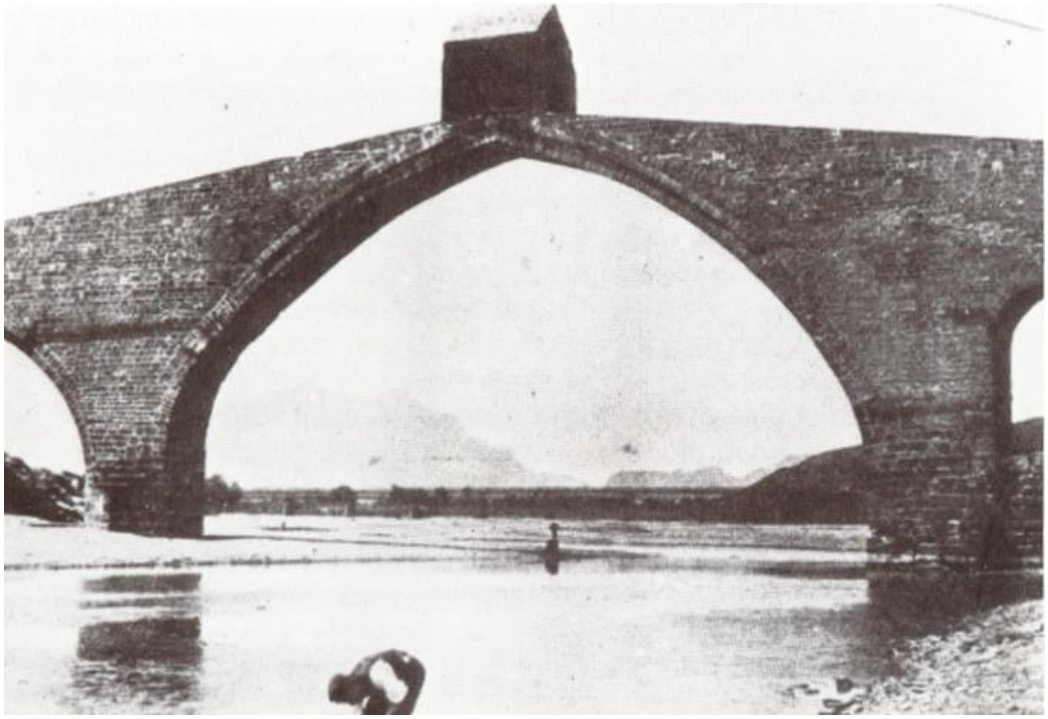
Vergeet verder niet dat ik elke hoge wand (geen slanke maar een gedrongen constructie) een boog 'verstopt' zit, eigenlijk zou je al het 'overbodige' materiaal van een hoge wand weg kunnen laten en alleen de boog + trekstang overlaten.



Een trekstang wil wel eens lelijk in de weg zitten voor een goed, functioneel gebruik van de ruimte onder de boog. Dan bestaat er nog een truc om een (horizontale) trekstang te vermijden en tevens iets te doen aan de gevoeligheid van een boog voor puntlasten (zie doorslaan boog).
Dat zijn de Suchov trekstangen genoemd naar een Russisch ingenieur uit circa 1890, die ze bedacht voor een hele lichte stalen boogkap voor het warenhuis Gum in Moskou.



Een andere mogelijkheid om dit uitknikken van een boog te voorkomen is de boog onder permanente druk te zetten door er, permanent!, een zware belasting op te zetten. Hieronder bijvoorbeeld met een huisje op een slanke metselwerkboog in Spanje.
Het gewicht van het huisje geeft een permanente drukspanning in het metselwerk van de boog zodat trekspanning ten gevolge een zware tijdelijke belasting (bijvoorbeeld een kar beladen met stenen) eerst de drukspanning moet 'opeten' voordat deze knik of breuk van de boog kan veroorzaken.



Omdat het merkwaardig gevonden werd dat het toevoegen van een grote belasting op een eigenlijk te slappe boog leidde tot een, qua gedrag onder belasting, stevigere boog, werden deze bruggen in de volksmond Duivels-bruggen genoemd. Men dacht dat de bouwmeester in ruil voor een goed functionerende brug zijn ziel aan de duivel verkocht moest hebben.

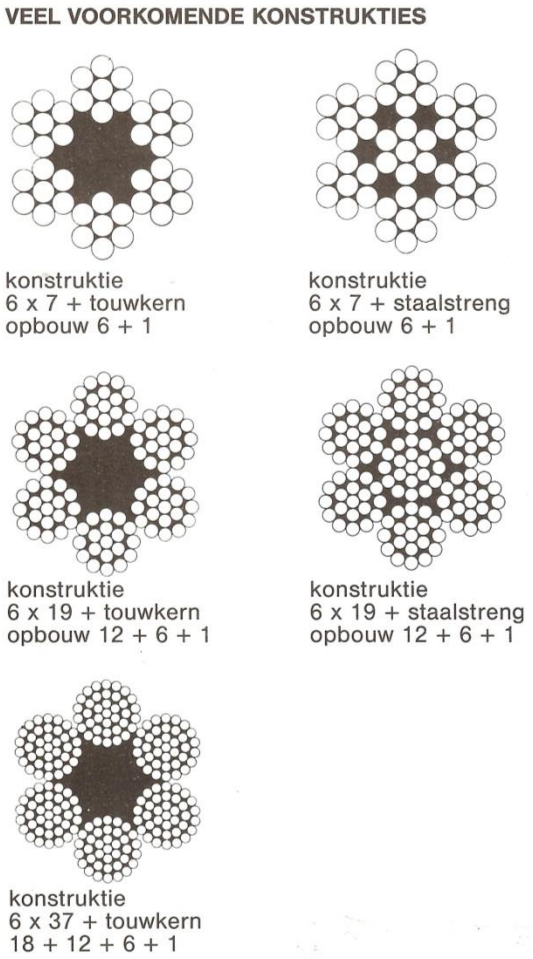
Bogen kunnen van alle bouwmaterialen vervaardigd worden, het hoeft niet alleen metselwerk, natuursteen of beton te zijn dat goed drukspanningen kan overdragen. Uit Hout en Staal kunnen ook zeer mooie, slanke bogen vervaardigd worden. In Staal zelfs zeer slanke zoals op onderstaand plaatje te zien is.



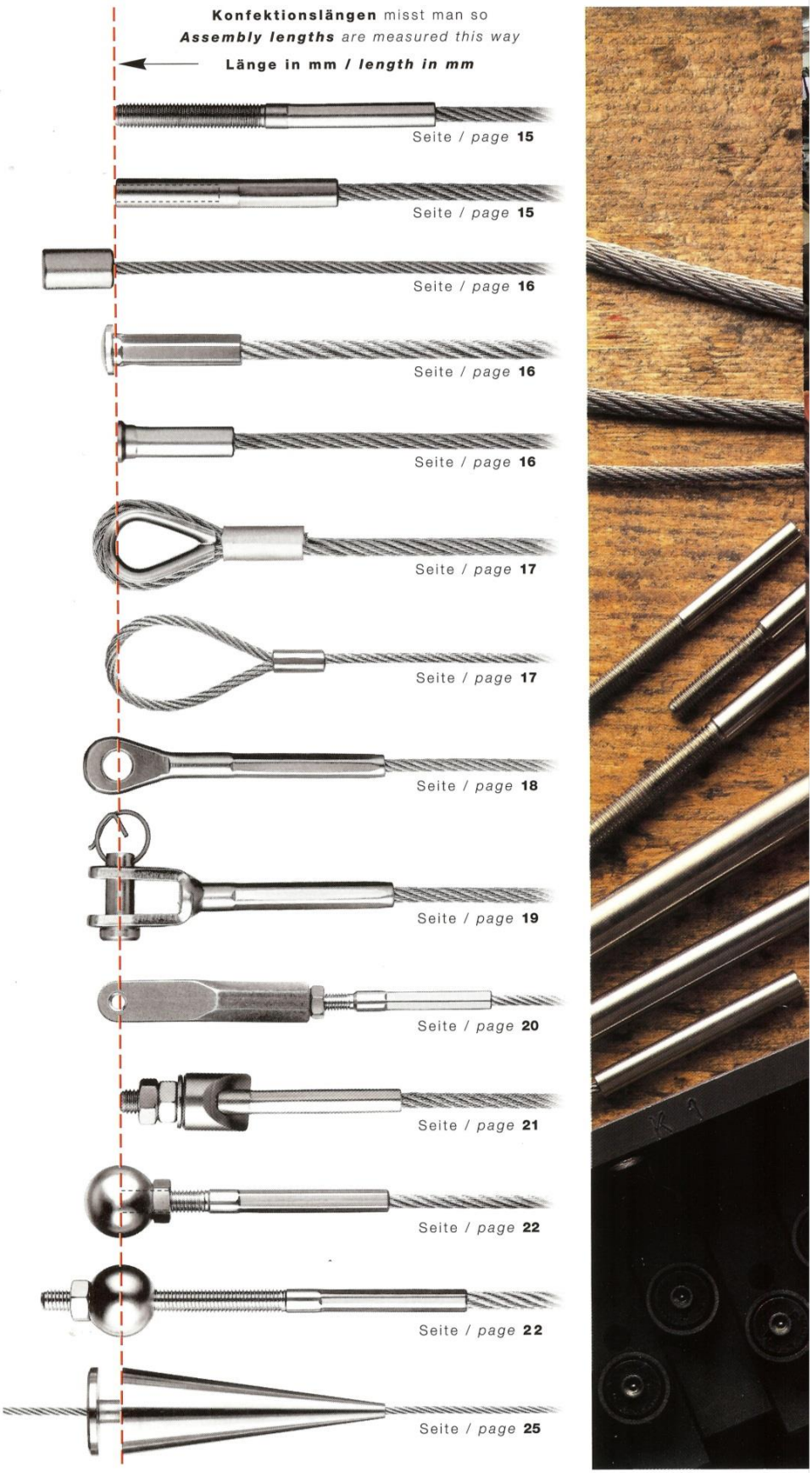
IJzeren boog spoorbrug viaduct Garabit van Gustave Eiffel, rond 1884.
De steunpunten zijn plaatsvast: geen trekstang nodig!

2.2 Kabels

Kabels zijn constructie elementen die enkel en alleen trek kunnen opnemen. Kabels kunnen uit touw en van staal vervaardigd worden. Dit kan één streng zijn maar meestal zijn het een behoorlijk aantal strengen die om elkaar heen geweven zijn. De zogenaamde geslagen kabels.
Kettingen gedragen zich wel hetzelfde als kabels maar worden heel anders gemaakt: allemaal losse schakels worden aan elkaar gekoppeld tot één ketting. Kettingen, kabels trouwens ook, zijn oude constructie elementen, de Egyptenaren, de Romeinen en de Chinezen werkten er al mee. De piramiden hadden zonder deze elementen niet gebouwd kunnen worden. Meestal worden strak gespannen kabels in een constructie toegepast. Hiermee wordt veel verplaatsing om de kabel (= uitrekking) aan te spannen vermeden. Tevens kan zo een deel van de (onvermijdelijke) grote verlenging van een kabel weggewerkt worden.

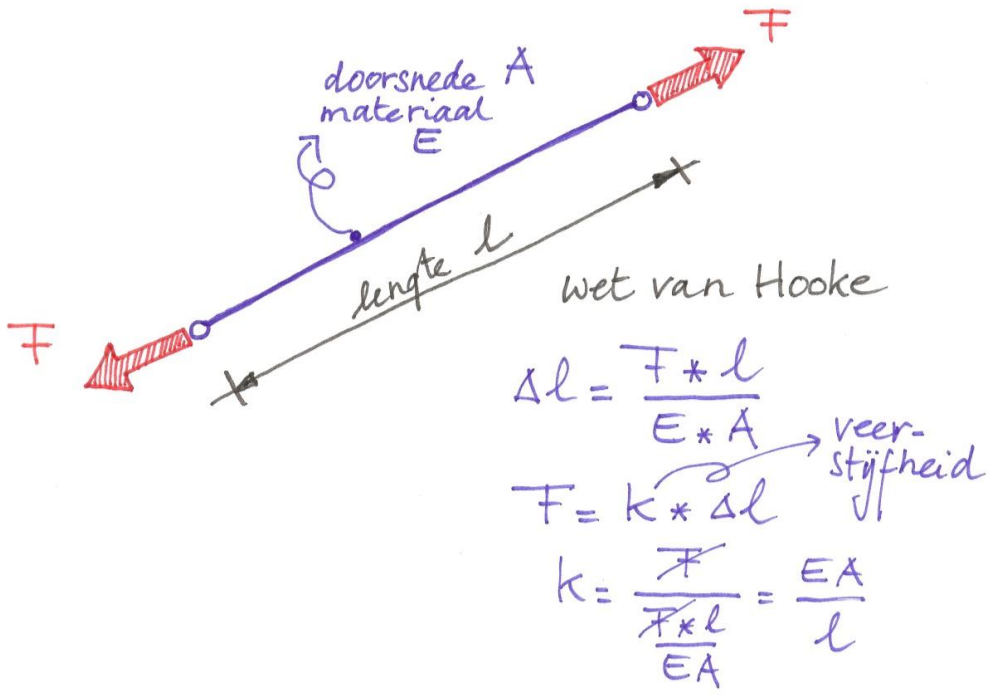


Overzicht mogelijke kabel opbouw, van alleen staal of alleen touw tot zelfs mengvormen van staal en touw. Een streng is een aantal samen gevlochten dunne stalen staven, meestal gedraaid.



Hoe maak je een kabel aan de rest van de constructie vast? Met bovenstaande kabelbeëindigingen, ook deels instelbaar om de kabel strak te zetten.

Hiertoe worden speciale kabel schoenen (= verbindingstukken) toegepast waarin wartels zitten waarmee de kabel onder spanning gedraaid kan worden. Een kabel moet gewoon voldoen aan de wet van Hooke zodat kabelverlenging eenvoudig te bepalen is.



Wet van Hooke en afleiding veerstijfheid k.

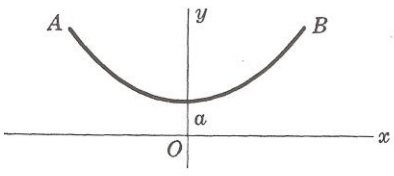
Als een kabel (of ketting) niet aangespannen is, en alleen het eigen gewicht werkt er op!, dan gaat de kabel er in een elegant boogje bij houden. De wiskundige formule van dit lijntje is zeer ingewikkeld; we noemen het de kettinglijn of, in het Engels, the catenary. Het is een wiskundige formule die is opgebouwd uit twee e-machten.

KETTINGLIJN

CATENARY

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

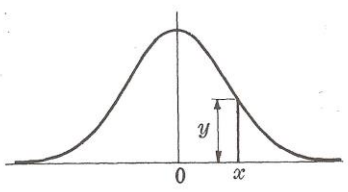
This is the curve in which a heavy uniform chain would hang if suspended vertically from fixed points A and B.



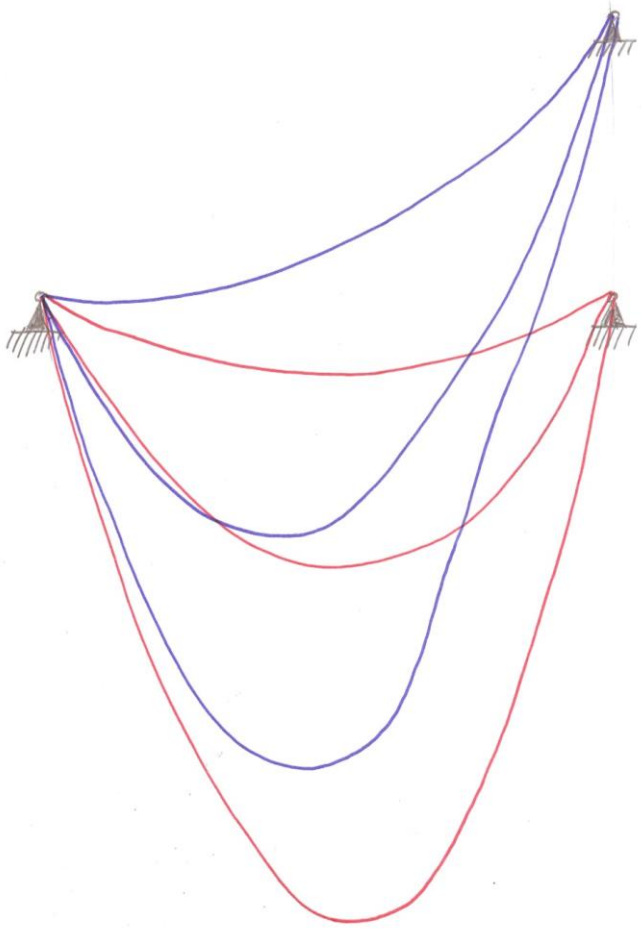
STANDAARD VERDELING: GAUSS-KROMME

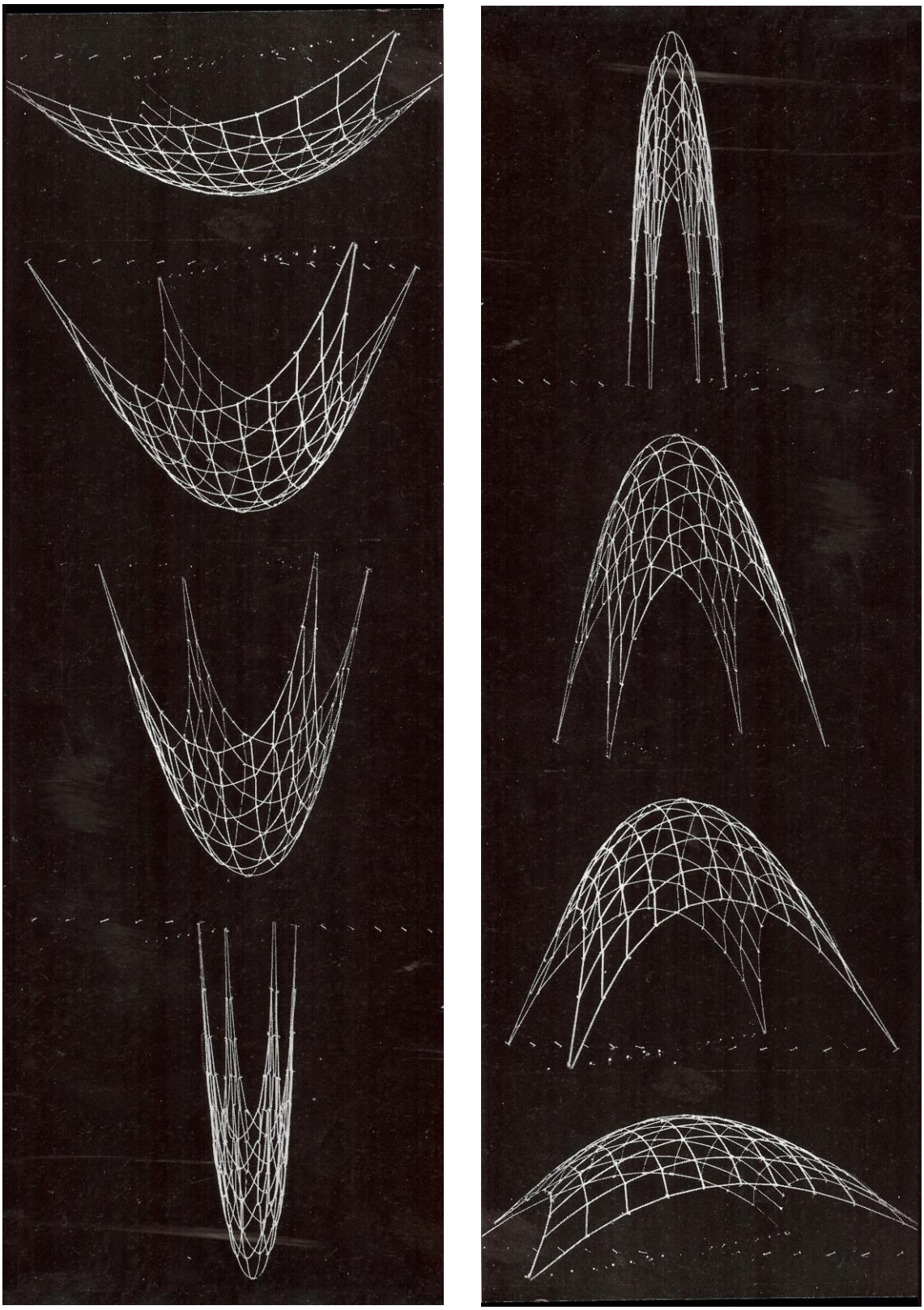
ORDINATES OF THE STANDARD NORMAL CURVE

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$



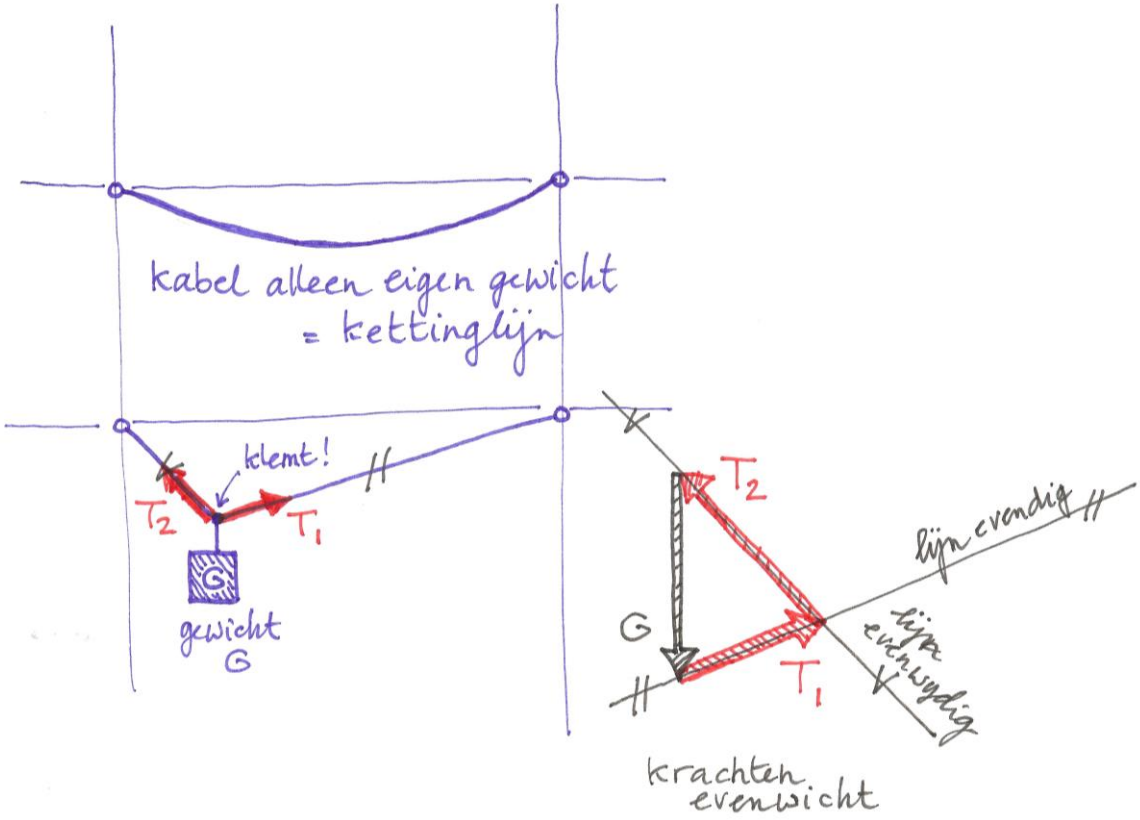
Een e-macht is het getal e^x met e = 2.1718281828etc., een zogenaamd irrationeel getal net als bijvoorbeeld π (pi) = 3,1415926535etc. Een e-macht is een curve die constant even snel aangroeit oftewel wiskundig uitgedrukt zowel de functie als de gedifferentieerde als de geïntegreerde waarde zijn gelijk (en allemaal dus e^x)!
De vorm varieert nog met de positie van de ophangpunten en de lengte van de kabel (of ketting).





Kabels en Bogen zijn elkaars negatieve zwaartekracht-beeld. Hang kabels aan het dak, keer alles 180 graden om en je hebt een bogenstelsel.

Ingewikkelder wordt het als we een puntlast of een geconcentreerde belasting aan de kabel hangen. Meteen gaat de kabel, die immers bijna geen (buig)stijfheid EI heeft, zich aanpassen aan de erop uitgeoefende kracht, zodanig dat er altijd trekkrachten in de kabel zitten en er krachtenevenwicht is tussen de belasting en de trekkracht in de kabel.



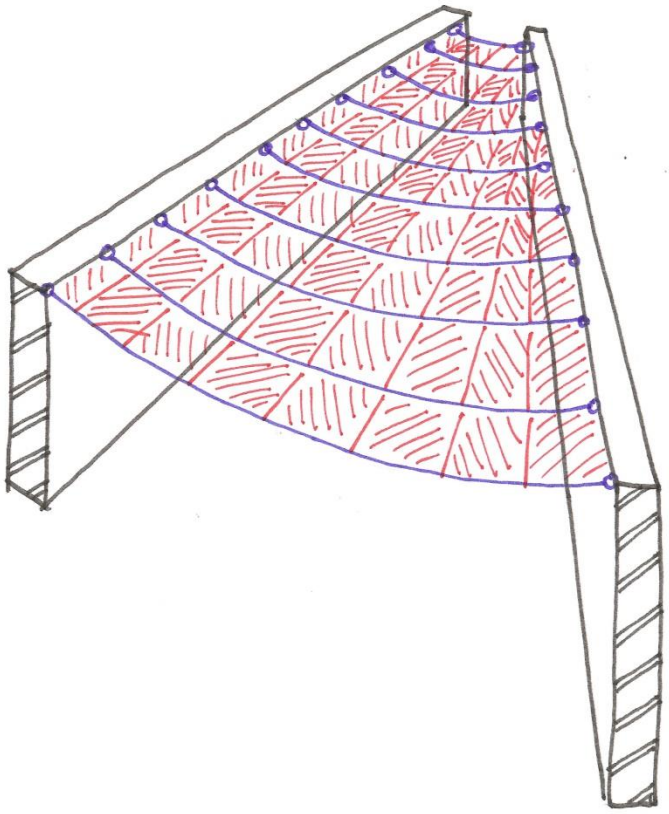
Toelaatbare kabelkrachten.

6- strengs kabels met touwkern			
nominale diameter	gewicht 100 m	minimale breukbelasting	
		treksterkte 1770 N/mm²=180 kgf/mm²	
mm	kg	kN	kgf
8	22.50	37.40	3810
9	28.50	47.30	4820
10	35.20	58.40	5960
11	42.60	70.70	7210
12	50.70	84.10	8580
13	59.50	98.70	10100
14	69.00	114.00	11600
16	90.10	150.00	15300
18	114.00	189.00	19300
19	127.00	211.00	21500
20	141.00	234.00	23900
22	170.00	283.00	28900
24	203.00	336.00	34300
26	238.00	395.00	40300
28	276.00	458.00	46700
30	317.00	526.00	53600
32	360.00	598.00	61000
34	407.00	675.00	68800
36	456.00	757.00	77200
38	508.00	843.00	86000
40	563.00	935.00	95300
42	621.00	1030.00	105000
44	681.00	1130.00	115000
46	745.00	1240.00	126000
48	811.00	1350.00	138000

6- strengs kabels met touwkern			
nominale diameter	gewicht 100 m	minimale breukbelasting	
		treksterkte 1770 N/mm²=180 kgf/mm²	
mm	kg	kN	kgf
50	880.00	1460.00	149000
52	952.00	1580.00	161000
54	1030.00	1700.00	173000
56	1100.00	1830.00	187000
58	1180.00	1960.00	200000
60	1270.00	2100.00	214000

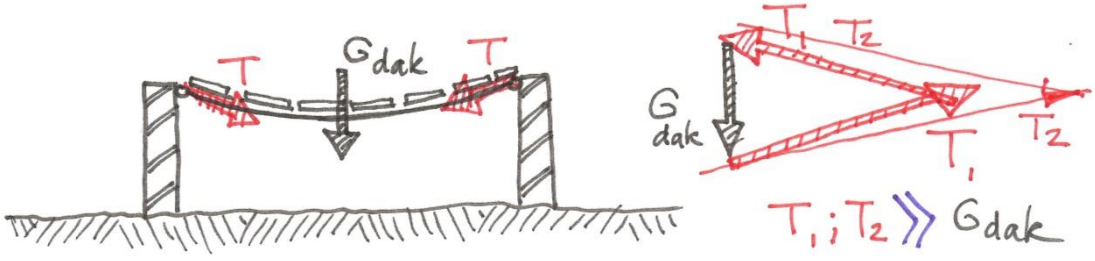
De opgegeven gewichten zijn gemiddelde waarden.
Gegevens van niet vermelde kabels op aanvraag.

De grote uitdaging bij kabelconstructies is het opnemen van die grote trekkrachten uit de kabels in de rest van de constructie. Je zou bijvoorbeeld op het idee kunnen komen om een hal te maken door tussen twee muren kabels te spannen en op de kabels houten platen te leggen als dak. Leg op de houten platen isolatie en dakbedekking en je hebt een goedkoop dak dat ook nog eens snel te bouwen is!



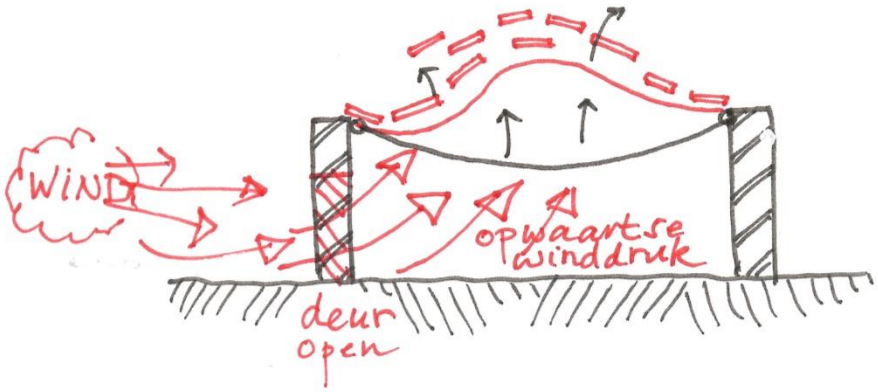
Helaas staan er twee grote bezwaren in de weg van dit, inderdaad zeer lichte en goedkope gebouw. En dat zijn de opnamecapaciteit van de trekkrachten uit de kabels en de mogelijk op het dak aangrijpende opwaartse wind.

Bezwaar 1; opname trekkracht in kabel.
De opname van de grote trekkrachten uit de kabels manifesteert zich als volgt.
De hellingshoek van de kabel met de muur is niet groot: 5-10 graden. Ontbinden van het totale dakgewicht per kabel leidt tot zeer grote horizontale krachten op de muren, tot wel 10 keer het dakgewicht! De muren moeten deze horizontale kracht door buiging naar de fundering brengen en daarvoor zullen de muren zeer sterk en dus dik moeten zijn.



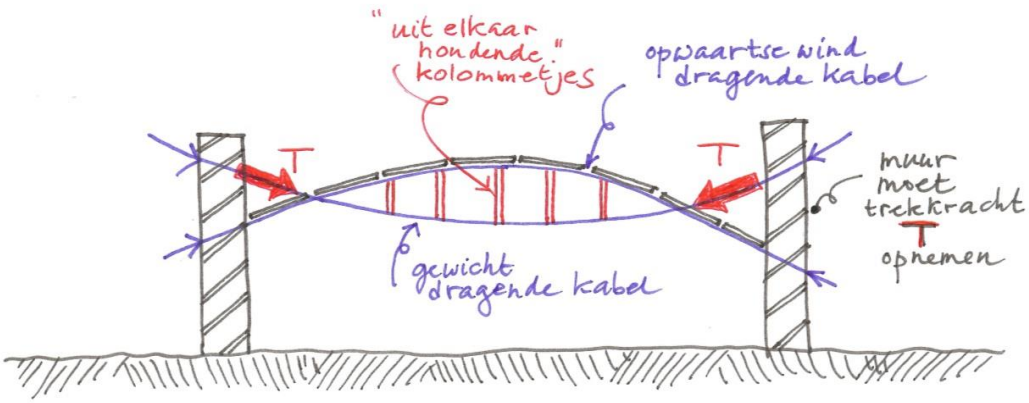
Berekening ophangkrachten van een hangdak.

Bezwaar 2; opwaartse windkracht op dak.
De opwaartse windkracht op een dak kan voortkomen uit wervels die bij een storm over het dak razen of doordat iemand een deur heeft open gezet en de wind in het gebouw kan slaan en van binnen uit tegen het dak gaan aandrukken. De houten platen van het dak vliegen alle kanten op, want de kabel geeft totaal geen weerstand tegen opwaartse krachten. Je zou dus het dak zo zwaar moeten maken dat het door zijn eigen gewicht niet opwaait. Beseffen we dat een licht dak zoals beschreven circa 0,2 kN/m^2 weegt en de opwaartse windbelasting in Nederland wel tot 1,50 kN/m^2 kan oplopen (in orkaan gebieden wel tot 5 kN/m^2) en realiseren we ons uit bezwaar 1 dat de trekkracht in de kabel tot 10 keer het dakgewicht kan oplopen dan blijkt dit een dure uitweg te zijn.



Opwaartse windbelasting.

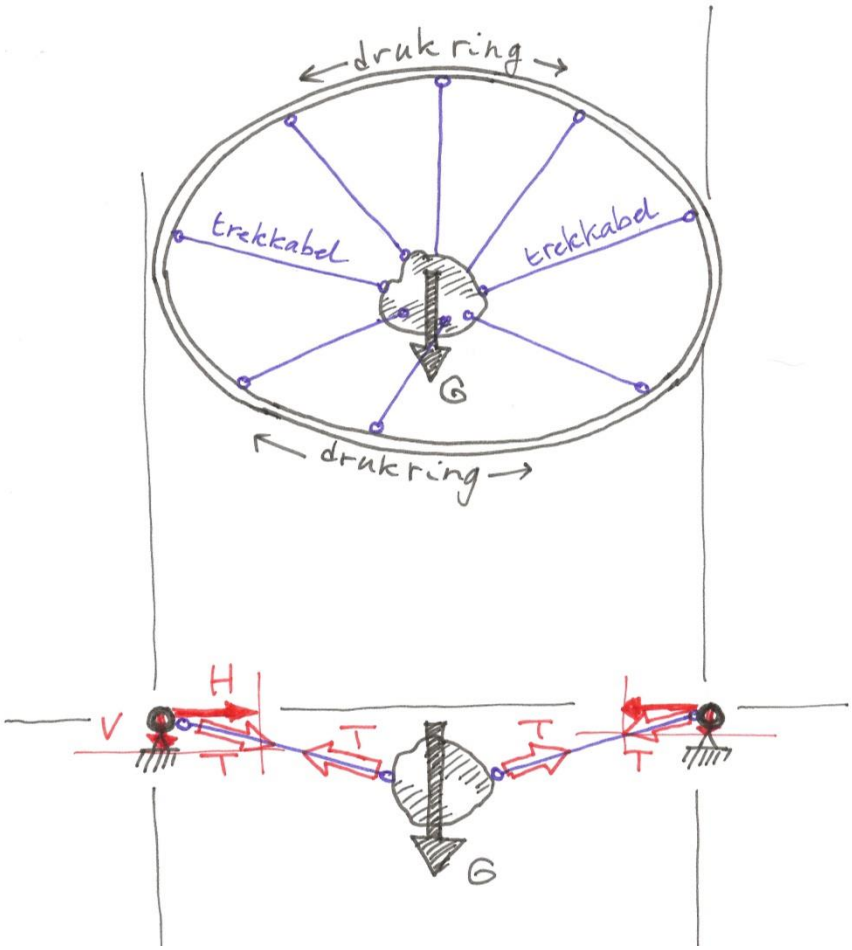
Toch is er een slim antwoord op althans een van de twee bezwaren gevonden en dat heet het Jawerth-dak, genoemd naar een Zweedse ingenieur die dit halverwege de 20ste eeuw voor een ijsstadion heeft toegepast. Het is ook gebruikt voor hangars. Daar moeten soms overspanningen van zo'n 200 meter worden gerealiseerd om een vliegtuig in zijn geheel naar binnen te kunnen rijden voor reparatie. De 'truc' van Jawerth was dat hij twee kabels tegelijk spant. De ene (de holle) draagt het gewicht van het dak en de andere (de bolle) draagt de eventueel optredende opwaartse wind. Zij worden constant onder spanning gehouden door korte staafjes (afstandhouders) tussen de twee kabels te zetten. Jawerth plaatste deze staafjes diagonaalsgewijs zodat een stijf vakwerk ontstond. De opwaartse wind wordt door de bolle kabel opgenomen en het dak kan dus zeer licht blijven. Blijft als bezwaar de opname van de horizontale krachten ten gevolge van de trekkrachten uit de kabels (maar nu wel met een laag dakgewicht!). Aangetekend moet worden dat dit type dak wel stijf genoeg kan zijn (niet teveel doorbuigen) maar heel bewegelijk blijft waardoor de naden tussen de dakbeplating kunnen gaan verschuiven en het dak daardoor kan gaan lekken.



De werking van het Jawerth dak.

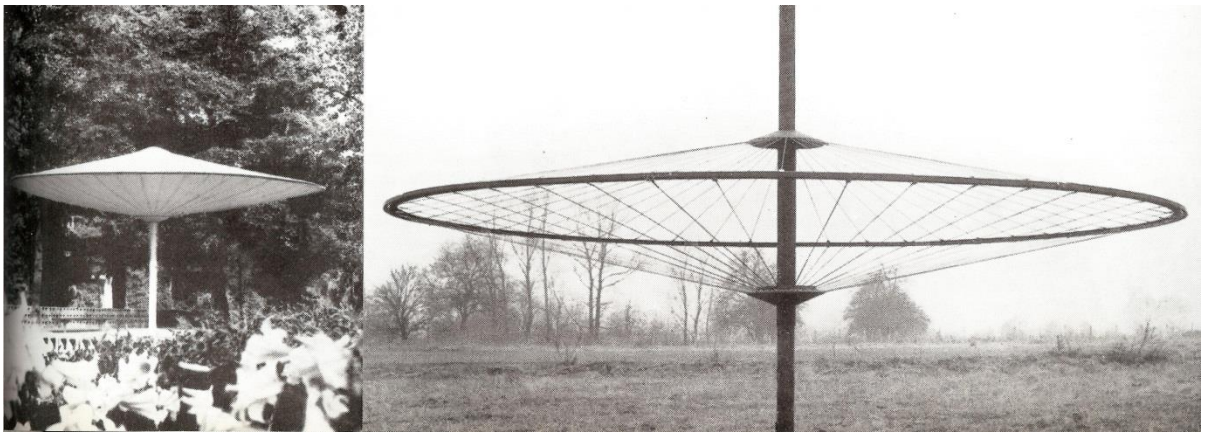
2.3 Trek- en Drukringsystemen

Trek- en Drukringsystemen zijn drie dimensionaal werkende krachtoverbrengingssystemen die in principe cirkelsymmetrisch moeten zijn. Net als bij alle kabelsystemen kan het een zeer licht dak zijn en kunnen er grote overspanningen, schijnbaar moeiteloos met heel weinig constructiegewicht (en dus goedkoop en duurzaam) gemaakt worden.
Het principe is het beste te begrijpen door een eenvoudig voorbeeld te maken.

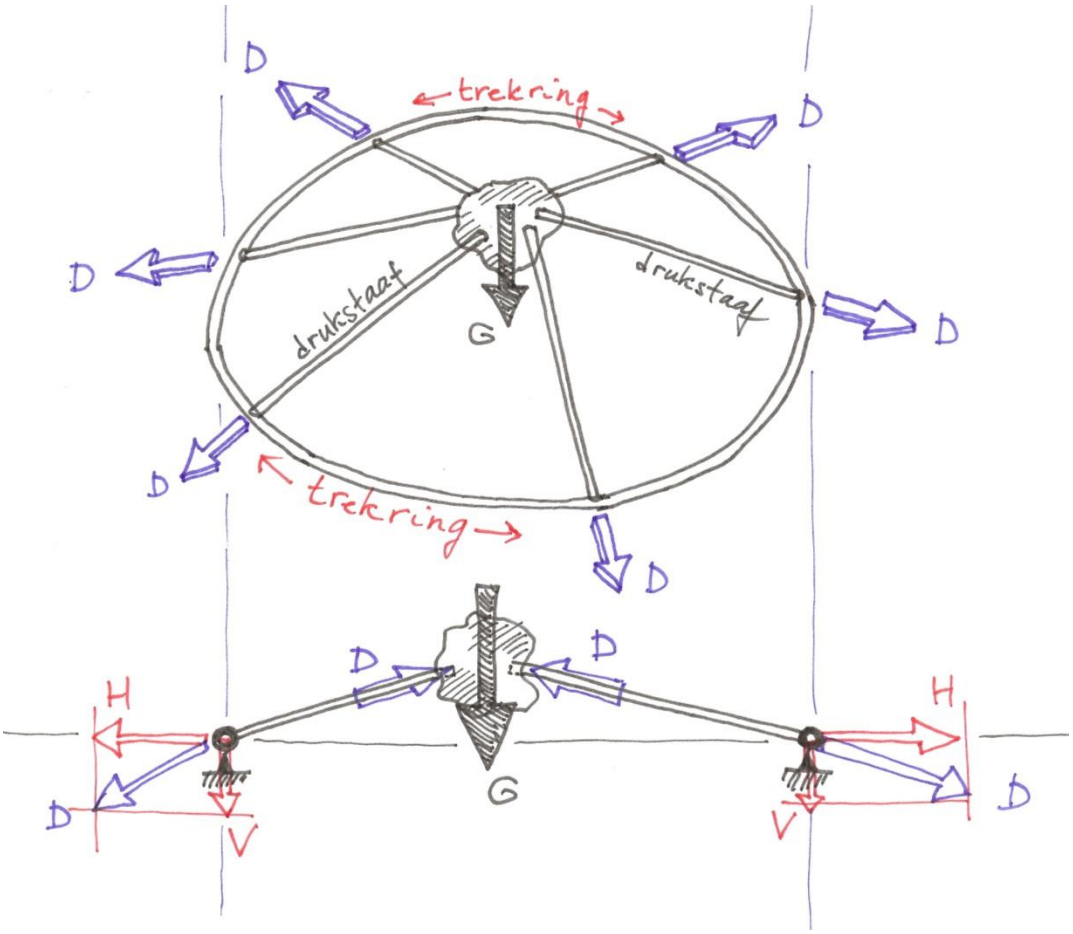


Werking drukring.

We beginnen met een zuivere drukring. Een stalen buis wordt op een cirkel van kolommen neergelegd. Aan de stalen buis bevestigen we allemaal stalen kabels die naar het middelpunt wijzen. Aan het uiteinde van alle stalen kabels bevestigen we een rotsblok dat het totale gewicht van het dak voorstelt. Het gewicht van het rotsblok wil naar beneden toe vallen maar wordt opgevangen door alle kabels die daardoor onder trek komen te staan. De kabels trekken allemaal rondom gaande aan de stalen buis die daardoor in elkaar gedrukt wordt: de zogenaamde drukring! Alle horizontale ontbondenen van de trekkrachten in de kabels maken rondom gaande evenwicht met elkaar (tegenover elkaar liggende kabels maken evenwicht met elkaar!). De verticale ontbondenen van de kabelkrachten worden door de rij kolommen opgenomen. Denk nog wel aan het 'circustent'–syndroom: een of meer vlakken afkruisen voor de vereiste rotatie stabiliteit.



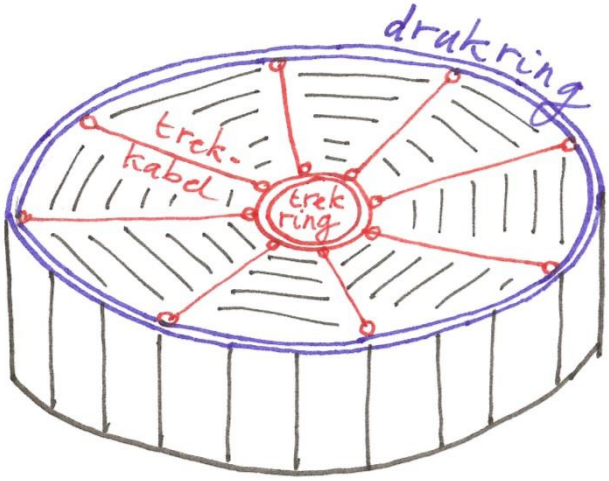
'Zwevende' drukring voor een paddenstoelachtige constructie bekleed met een membraan.



Werking van een trekring.

De zuivere trekring begint wederom met en stalen buis op een cirkel van kolommen. Dit keer geen kabels maar staven want we houden het rotsblok nu boven het vlak van de stalen ring op de kolommen. Laten we het rotsblok neer dan komt er een drukkracht in de staven (vandaar staven en geen kabels). Alle staven drukken tegen de stalen buis en daardoor ontstaat er een trekkracht in de stalen buis, de zogenaamde trekring. Opname van de buiskrachten op dezelfde wijze als bij de trekkrachten uit de kabels. Horizontaal kortgesloten rondom via de stalen buis, verticaal door de kolommen onder se stalen buis. Let ook hier op het 'circustent'-effect.

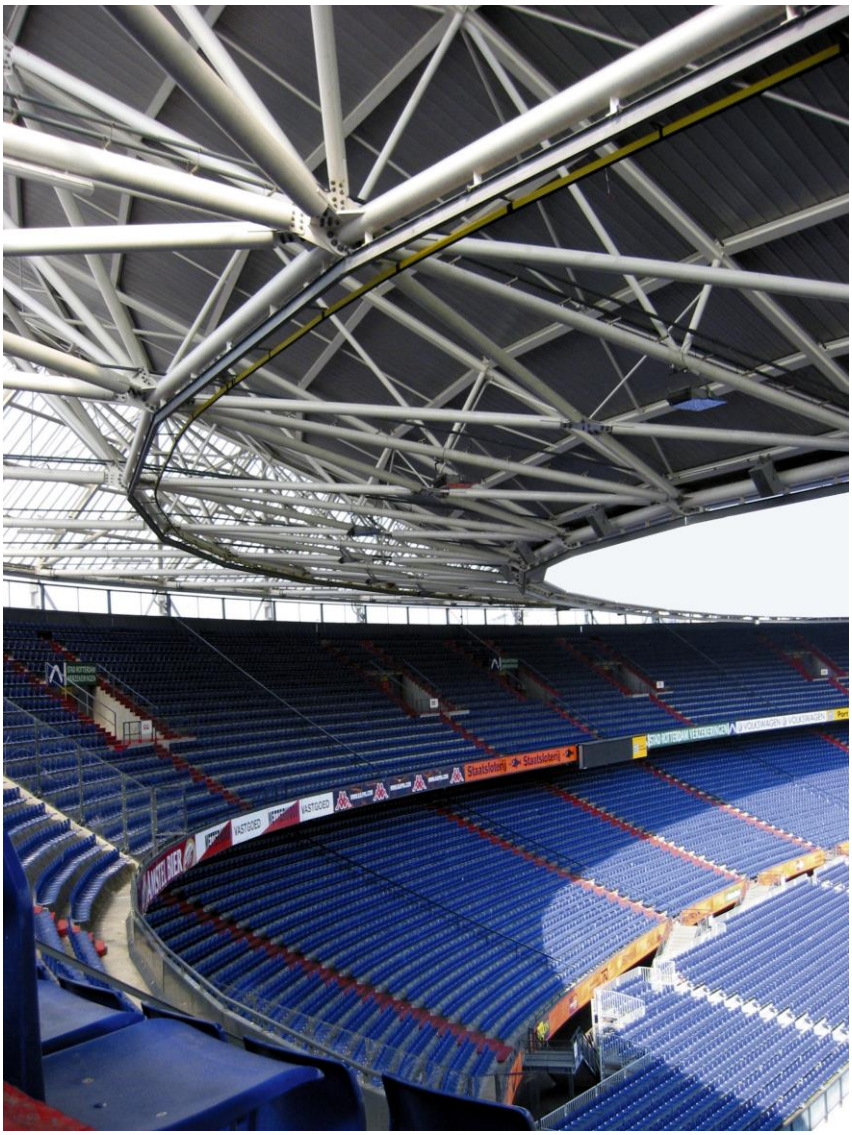
De meeste daken die van deze twee principes, de druk- en trekring, gebruik maken, hebben zowel een trekring, zwevend binnenin als een drukring boven de cirkel kolommen. Op de rondgaande kabels tussen de trek- en drukring wordt het (lichte) dak gelegd. Dit is veelal een textieldak (doek) maar het kunnen ook lichte stalen dakplaten zijn. Het Feyenoord stadion in Rotterdam is een goed voorbeeld hiervan.



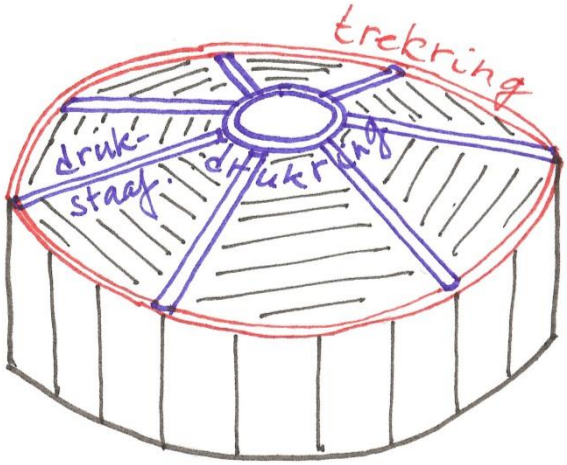
Trekring - drukring dak



Luchtfoto Feyenoord stadion in aanbouw. Buiten het stadion staan de kolommen die het dak dragen, direct daar boven de twee drukringen. Zwevend binnen het stadion boven de tribunes de trekring langs de dakrand.

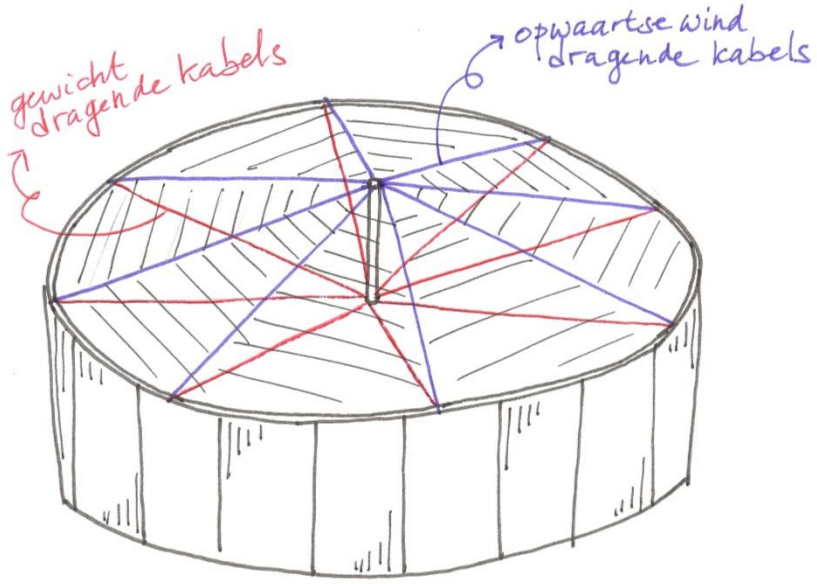


Interieur opname Feyenoord stadion, bovenop de kolommen die buiten rondom het stadion staan liggen twee drukringen (voor veiligheid als er één zou breken door wat voor oorzaak ook) en aan de 'zwevende' dakrand de trekring.

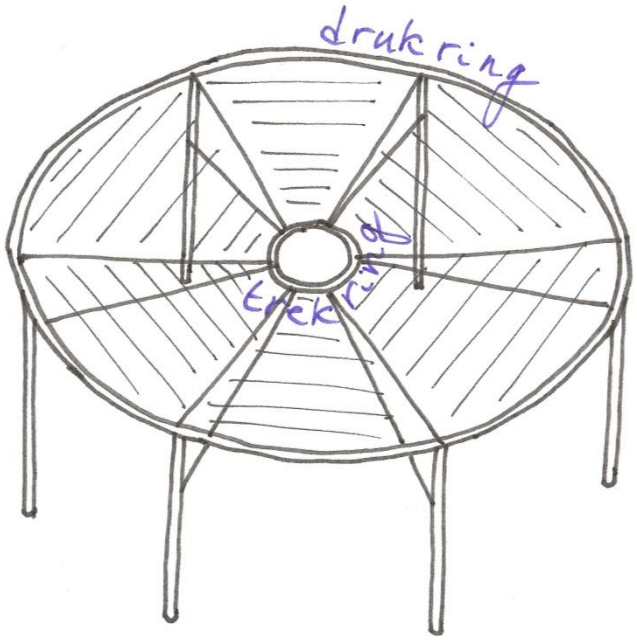


Rond gebouw met op de buitenmuur een trekring en middenin, omhoog gehouden door drukstaven de drukring.

Een van de twee bezwaren tegen het Jawerth-dak is bij een trekring-drukring constructie dus niet aan de orde en dat is de opname van de horizontale krachten uit de kabels. De cirkelsymmetrische constructie maakt rondgaande evenwicht met elkaar. Het nadeel van het lichte dakgewicht blijft; de opwaartse wind kan de hele dakconstructie optillen! Daarom wordt er wel gewerkt met een zogenaamd fietswieldak. Hierbij zijn er net als bij het Jawerth-dak twee kabelsystemen waarvan er een het dakgewicht draagt en het andere kabelsysteem de opwaartse wind.



Fietswieldak.

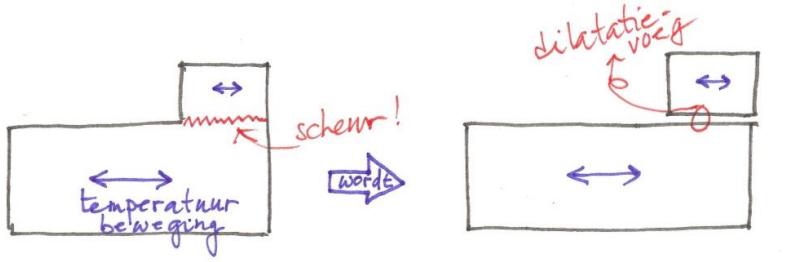


Een variant van een dak met aan de buitenkant een drukring en, vrij hangend, binnenin een trekring (omgekeerd fietswiel-principe; de spaken komen nu in het midden bij elkaar).

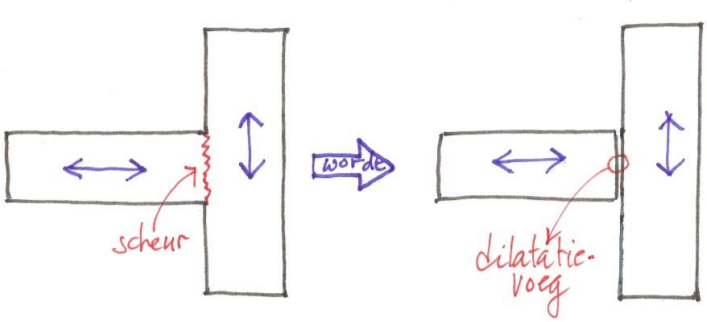
3 Temperatuurbeweging, Dilataties

Het liefst maken we gebouwen zoveel mogelijk samenhangend, dat wil zeggen alles aan elkaar vastgemaakt. Soms is dit niet verstandig aangezien er juist daardoor scheuren kunnen ontstaan. Dat hangt van twee hoofdoorzaken af. De eerste is *verhinderde beweging*. Denk daarbij vooral aan uitzetten of krimpen. De tweede is *ongelijke zettingen onder het gebouw*. Hebben we met een van deze twee te maken dan moeten we maatregelen treffen om scheurvorming te vermijden. Dat doen we door een gebouw in stukken te knippen. Hiertoe brengen we zogenaamde dilatatievoegen aan die beweging zonder scheurvorming mogelijk maken. Besef wel dat het los knippen van het gebouw in delen betekent dat ieder deel afzonderlijk voor zijn stabiliteit moet zorgen.

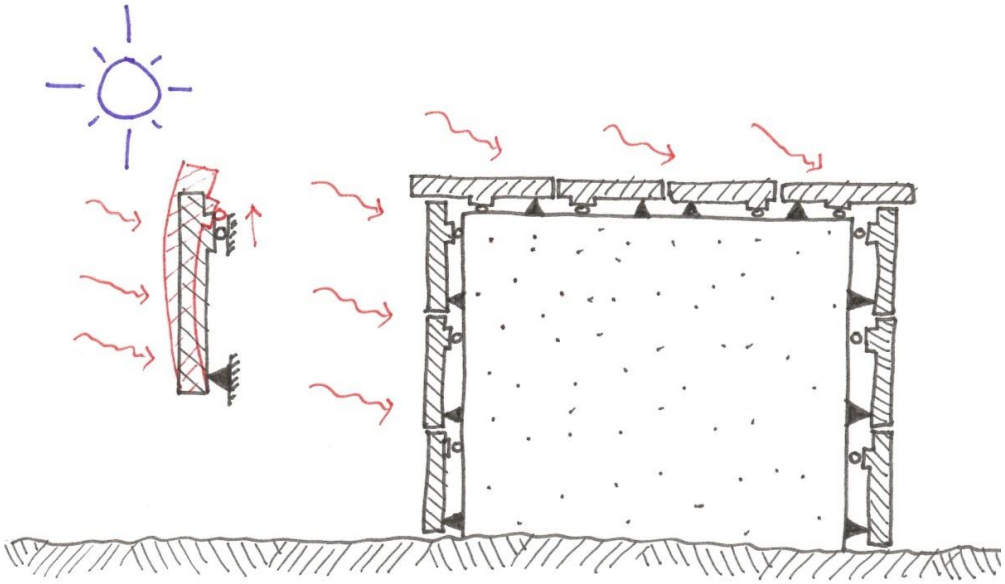
Verhinderde beweging.
Elke bouwwerk moet de beweging die bij temperatuurverandering hoort, kunnen ondergaan. Denk daarbij aan de dag-nacht verandering maar vooral aan de zomer (+40 graden) – winter (-20 graden) verschillen in temperatuur. Ook de zonbestraling kan een belangrijke rol spelen. Een donker gekleurd oppervlak kan wel tot 70 graden opwarmen. Als de door temperatuursverschillen opgeroepen beweging, uitzetten of krimpen, verhinderd wordt, is scheurvorming onvermijdelijk. De krachten die door uitzetten of krimpen worden opgeroepen zijn heel groot en kunnen niet opgenomen worden door bijvoorbeeld een sterke, stijve constructie.



De opgelegde krachten zijn zo groot dat zelfs een sterke, stijve constructie breekt of scheurt. Het feit dat een gebouw geklimatiseerd wordt (temperatuur binnen min of meer constant) betekent niet dat je je geen zorgen hoeft te maken over dit aspect. De verwarming kan uitvallen en vergeet ook de bouwfase niet waarin de gevel er nog niet is en het skelet flink kan afkoelen in de winter (of opwarmen in de zomer).

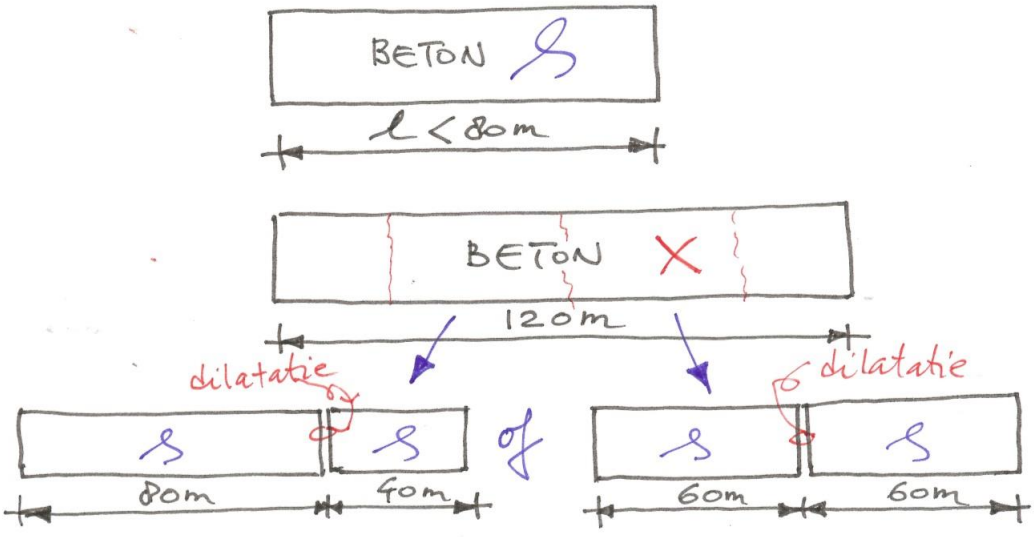


Ook kunnen er bouwdelen zijn, denk daarbij aan de gevel of het dak, die in direct contact met de buitenlucht staan en vastzitten aan het skelet binnenin. Deze gebouwdelen moeten dus de buitentemperatuur volgen (dus krimpen en uitzetten) maar zitten vast aan het min of meer bewegingloze binnenste van het gebouw (constant op kamertemperatuur). Vandaar dat gevels altijd één vast bevestigingspunt hebben en alle andere kunnen verschuiven of glijden om temperatuurbeweging mogelijk te maken.



De gebouwschil wordt opgewarmd door de zonbestraling. De buitenzijde van de gevelelementen wordt meer opgewarmd dan de binnenzijde, dus zet het gevelelement 'bolvormig' uit!

Een andere belangrijke 'aandrijfkracht' voor beweging is het krimpen van beton. Beton dat net gestort is zal door de verharding die langzaam doorgaat krimpen, hoeveel is afhankelijk van een heleboel factoren maar 0,5% is goed mogelijk. We noemen dit de uitdrogingskrimp van beton. Een richtlijn is dat tot circa 80 meter lengte beton vloer er geen problemen te verwachten zijn. Boven de circa 80 meter moeten er knippen aangebracht worden die er voor zorgen dat geen enkel deel groter is dan circa 80 meter.

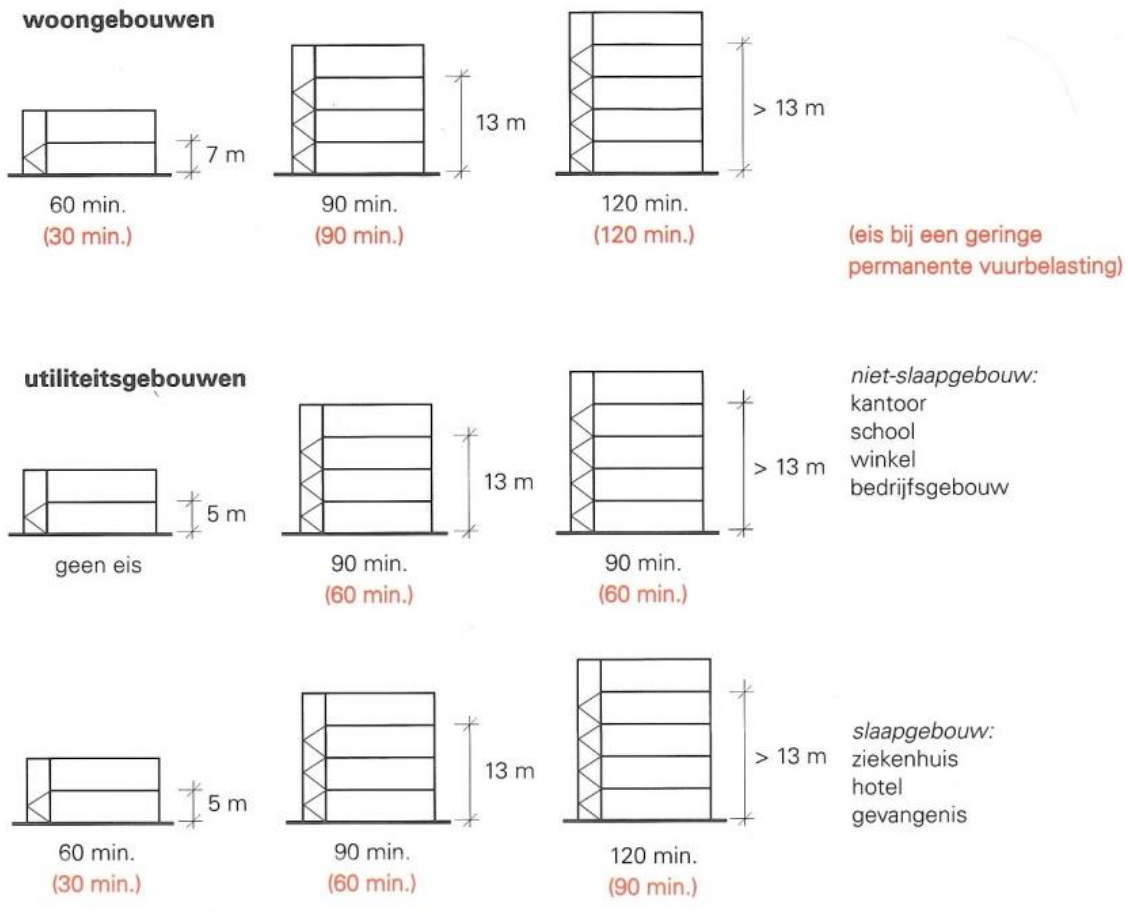


Zeker bij een kelder die in het grondwater zit, is dit een lastig detail. De voeg moet dan immers waterdicht zijn. Maar met ingestorte rubberflappen (de zogenaamde dilatatie-profielen) is dit wel mogelijk. Let wel op! Die 80 meter geldt niet standaard voor alle vloeren maar is afhankelijk van omstandigheden als: is het beton zowel onder als boven in contact met lucht, wat is de lengte / breedte-verhouding, kan er zonlicht opvallen etc. etc. Voor een betonvloer, buiten op zand gestort, geldt bijvoorbeeld een maximaal vlak van circa 7 bij 7 meter!

4 Brandwerendheidseisen hoofddraagconstructie

Het vereiste niveau van brandveiligheid van woon- en utiliteitsgebouwen én de brandwerendheid van constructies als onderdeel daarvan ligt vast in de Nederlandse bouwregelgeving, in de vorm van prestatie-eisen. De eisen voor de *hoofddraagconstructie onder brandomstandigheden* zijn afhankelijk van de gebruiksfunctie en het hoogteverschil (h) tussen de hoogste vloer van een verblijfsgebied en het aansluitende terrein. Bij utiliteitsgebouwen maken we onderscheid tussen 'slaapgebouwen' en 'niet-slaapgebouwen'. Voor 'slaapgebouwen' (hotels, ziekenhuizen, gevangenissen) zijn de eisen hoger dan voor 'niet-slaapgebouwen' (kantoren, scholen, winkels etc.). In de volgende tabel zijn de brandwerendheidseisen voor gebouwen weergegeven.

Tabel: Brandwerendheidseisen voor de hoofddraagconstructie van woongebouwen en van utiliteitsgebouwen.



Noot 1: afwijkingen/aanvullingen op de tabel

- indien bezwijken leidt tot onbruikbaar worden van een rookvrije vluchtroute geldt een eis van 30 minuten. Een route naar het aansluitende open terrein krijgt pas de status van rookvrije vluchtroute vanaf de uitgang(en) van een rookcompartiment;
- in verband met brandoverslag / branddoorslag geldt mogelijk een eis van 30 of 60 minuten voor wanden, vloeren, daken en/of gevels;
- bij de aanwezigheid van brandcompartimenten in een gebouw dienen bij bezwijken van één compartiment de overige bouwdelen te blijven staan. Dit geldt ook voor het dak van deze compartimenten.

De *hoofddraagconstructie onder brandomstandigheden* is het deel van de bouwconstructie gelegen in of grenzend aan een brandruimte als bedoeld in onderdeel 5.1 van NEN 6068 van gebouwen met brandcompartimenten en subbrandcompartimenten als bedoeld in de afdelingen 2.13 en 2.14 van het Bouwbesluit waarvan het bezwijken leidt tot het ook bezwijken van een bouwconstructie die:

- niet in hetzelfde brandcompartiment is gelegen als de beschouwde brandruimte (dit geldt niet voor een woonfunctie);
- in het geval de brandruimte een subbrandcompartiment is of een deel van een subbrandcompartiment, zorgdraagt voor het instandhouden van niet-direct aangrenzende subbrandcompartimenten en niet-direct aangrenzende andere ruimten;
- in het geval de brandruimte deel uitmaakt van een (sub)brandcompartiment dat meer dan 3 bouwlagen bevat, zorgdraagt voor het instandhouden van ruimten die niet direct aan de brandruimte grenzen, maar wel in het (sub)brandcompartiment zijn gelegen; daarbij mag worden uitgegaan van de voor het bezwijken meest ongunstige ligging van de brandruimte in een combinatie van 3 bouwlagen.

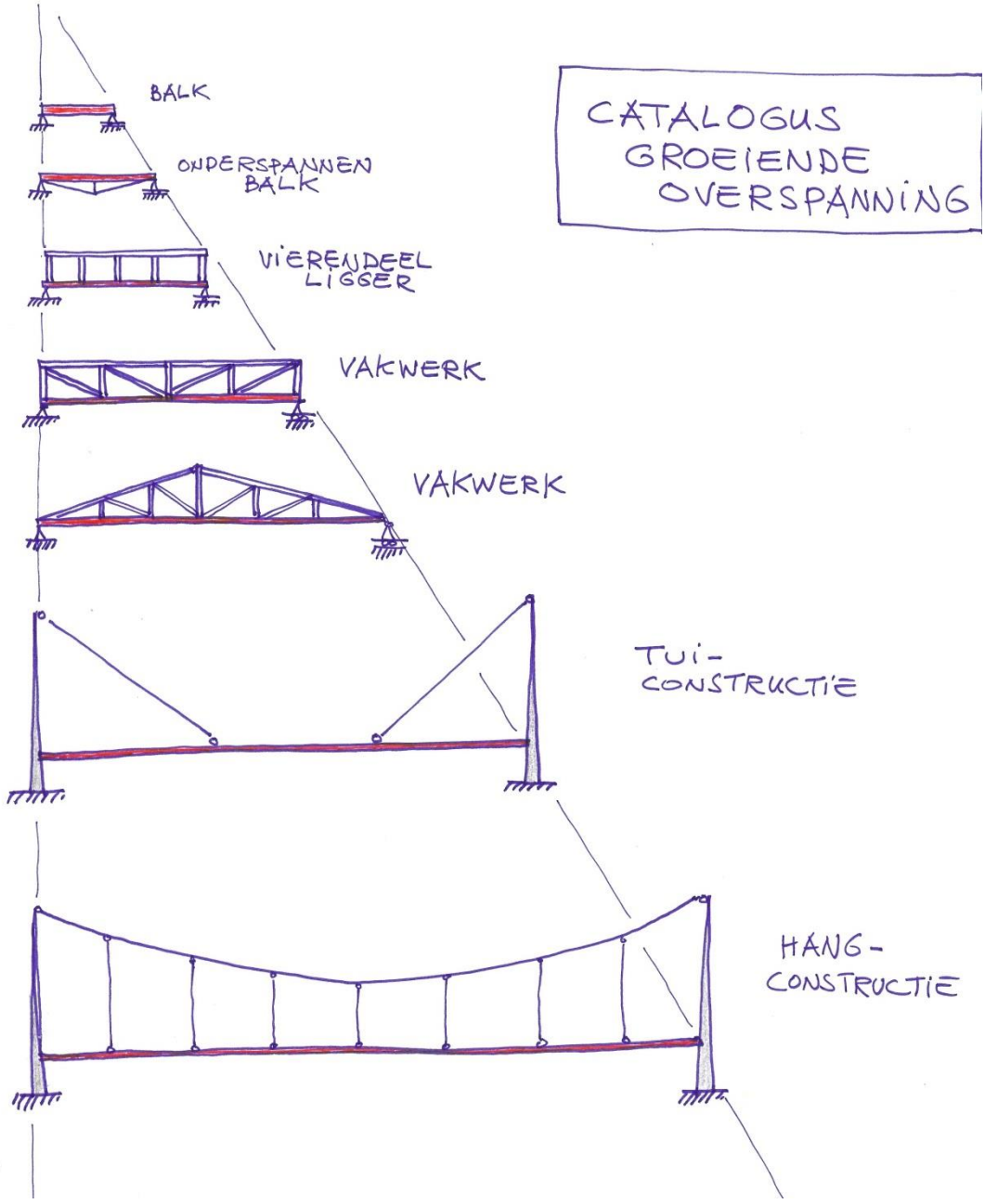
Brand kan worden beschouwd als een buitengewoon belastinggeval.

De brandwerendheidseisen in de tabel mogen met 30 minuten worden gereduceerd indien de permanente vuurbelasting aantoonbaar lager is dan 500 MJ/m^2. De permanente vuurbelasting is de verbrandingswaarde van alle (regulier) vergunningplichtige brandbare bouwdelen. Afbouwdelen als plafonds, niet-dragende scheidingswanden en binnendeuren horen daar niet bij. De waarde 500 MJ komt overeen met de verbrandingsenergie van 25 kg vurenhout. De gereduceerde brandwerendheidseisen zijn in de tabel tussen haakjes geplaatst. Bij toepassing van een sprinklerinstallatie is tevens een nader in overleg met de brandweer te bepalen reductie mogelijk.



Gebouw voor Bouwkunde na de gedeeltelijke instorting t.g.v. de brand. De constructie bezweek ruim 90 minuten nadat de brand het betreffende constructiedeel bereikte.

5 Groeiende Overspanning



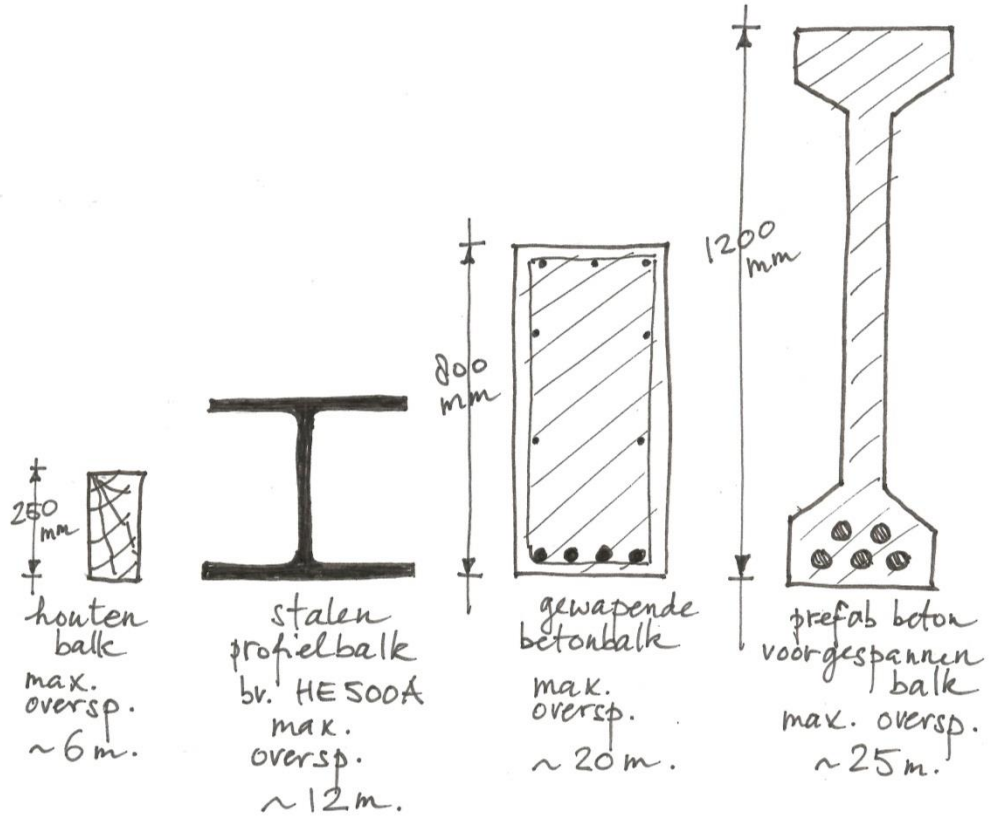
Grafische presentatie Groeiende overspanning.

In bovenstaand figuur wordt een overzicht gegeven van de constructievormen waaruit een architect/ constructeur kan kiezen om overspanningen te maken. Dat begint met een eenvoudige balk die als buigligger de overspanning maakt. Daarna komt de onderspannen ligger in beeld als economisch aantrekkelijke oplossing. Bij nog grotere overspanningen moeten we een Vierendeel ligger maken die uit een stel balken en kolommen een 'liggervorm' creëert. Maar een Vierendeel-ligger is geen economisch verstandige ligger; veel materiaal nodig en een Vierendeel ligger kan weinig stijfheid genereren. Beter is het om over

te stappen op een vakwerk, of te wel recht, met een industrieel (en dus goedkoop) karakter of toelopend naar het midden van de overspanning toe waar het buigend moment het grootst is en de vakwerkligger zo hoog mogelijk moet zijn teneinde een zo groot mogelijke inwendige hefboomsarm te hebben om weerstand te bieden tegen buiging en vervorming. Hierna hebben we geen lineaire elementen meer om een overspanning te maken. Als we voor een vakwerk de vuistregel voor het dimensioneren van de hoogte aanhouden 1/15 van de overspanning dan is bij een vakwerk van 3 meter hoog, 3 keer 15 is 45 meter de maximaal mogelijke overspanning.
Bij meer dan 50 meter overspanning moet er dus iets bijzonders gebeuren. En dat kan met behulp van kabels, die als het ware verende steunpunten creëren en de overspanning in kleinere delen opknipt. Elke kabel is immers een 'veer' die uitrekt onder belasting maar wel steunkracht levert en zodoende een 'zwevend' steunpunt vormt voor de ligger. Met kabels kunnen we twee hoofdtypes constructie maken: een Tui-constructie of een Hangconstructie. In de volgende hoofdstukken wordt de hierboven gegeven verdeling in types constructie stuk voor stuk verder behandelt.

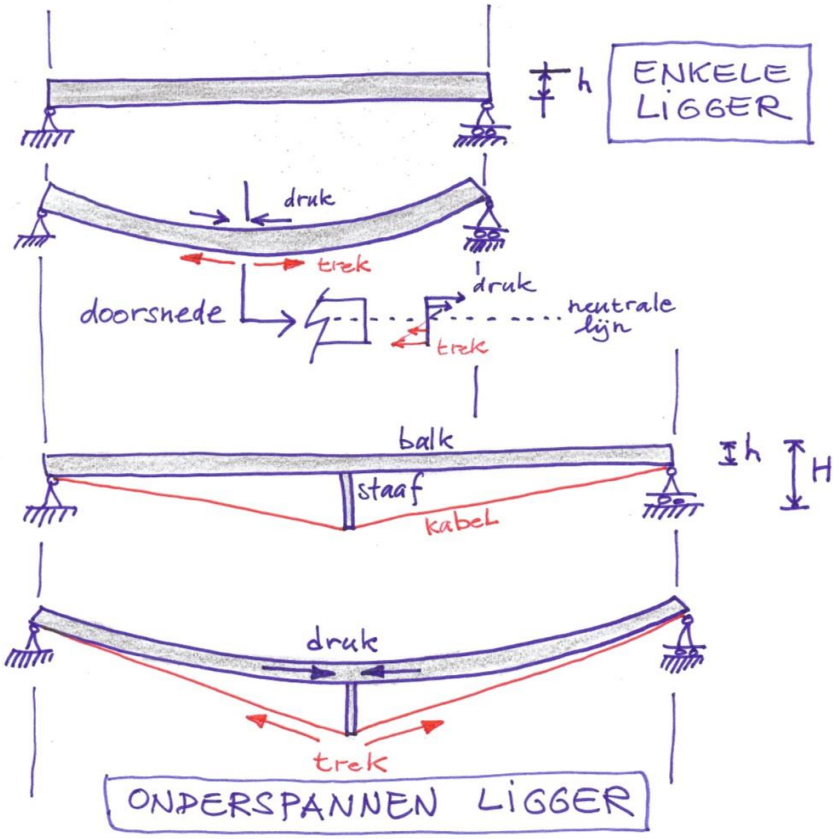
5.1 Balken

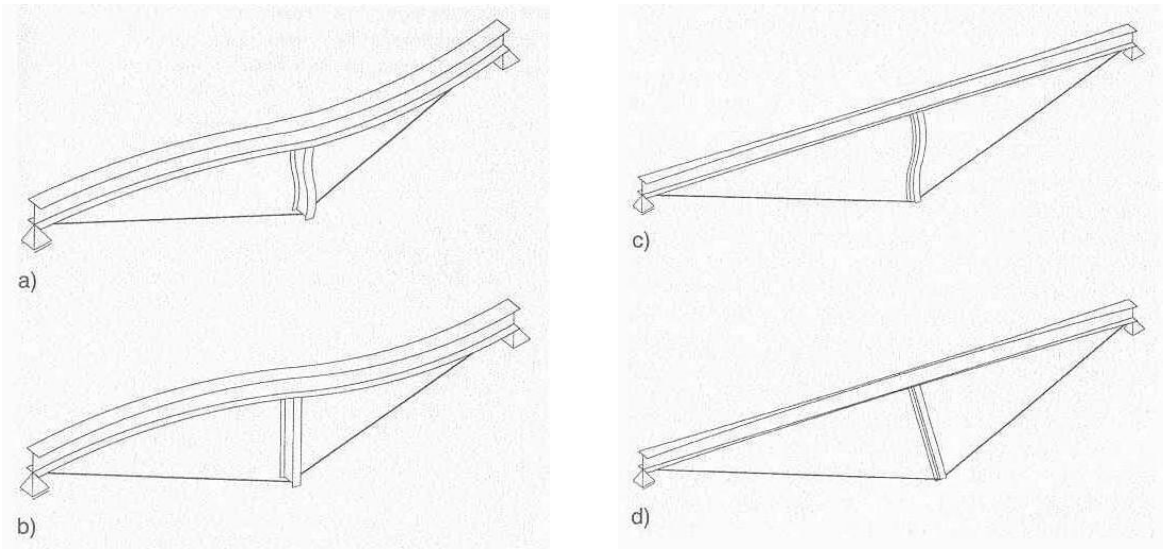
Met balken kun je een niet te grote overspanning mee maken: voor houten balken maximaal 5 tot 7 meter, voor stalen balken bij economische inzet, dus niet teveel kilo staal per m^2 dakoppervlak (meestal 0,6 kN/m^2 maximaal) 14 tot 18 meter en voor betonnen balken (standaard beton, gewapend) maximaal 15 tot 20 meter. Betonbalken zijn altijd hoger en breder dan stalen balken, die vaak eleganter ogen. Met prefab beton van hogere kwaliteit en voorgespannen kan je zelfs tot 30 meter nog goed overspannen maar het zijn dan wel duidelijk aanwezige (zware) elementen. Buiging in een balk of ligger blijft echter een oneconomische manier om belasting naar de steunpunten te brengen.



5.2 Onderspannen liggers

Een verbetering, of beter gezegd versterking, is de onderspannen ligger. Door toevoeging van één klein kolommetje onder het midden van de balk en een stevige kabel of staaf van het ene steunpunt naar uiteinde kolommetje en vervolgens naar het andere steunpunt ontstaat met heel weinig toegevoegd materiaal een veel sterkere ligger. Dat is ook logisch want de hiervoor al gesignaleerde inwendige hefboomsarm is enorm toegenomen. De weerstand tegen buiging of vervorming dus ook. Onderspannen liggers zijn ook elegant om te zien en bieden een goede mogelijkheid om een eigenlijk te slappe ligger te versterken zonder veel materiaal toe te moeten voegen en dat is ook weer duurzaam.





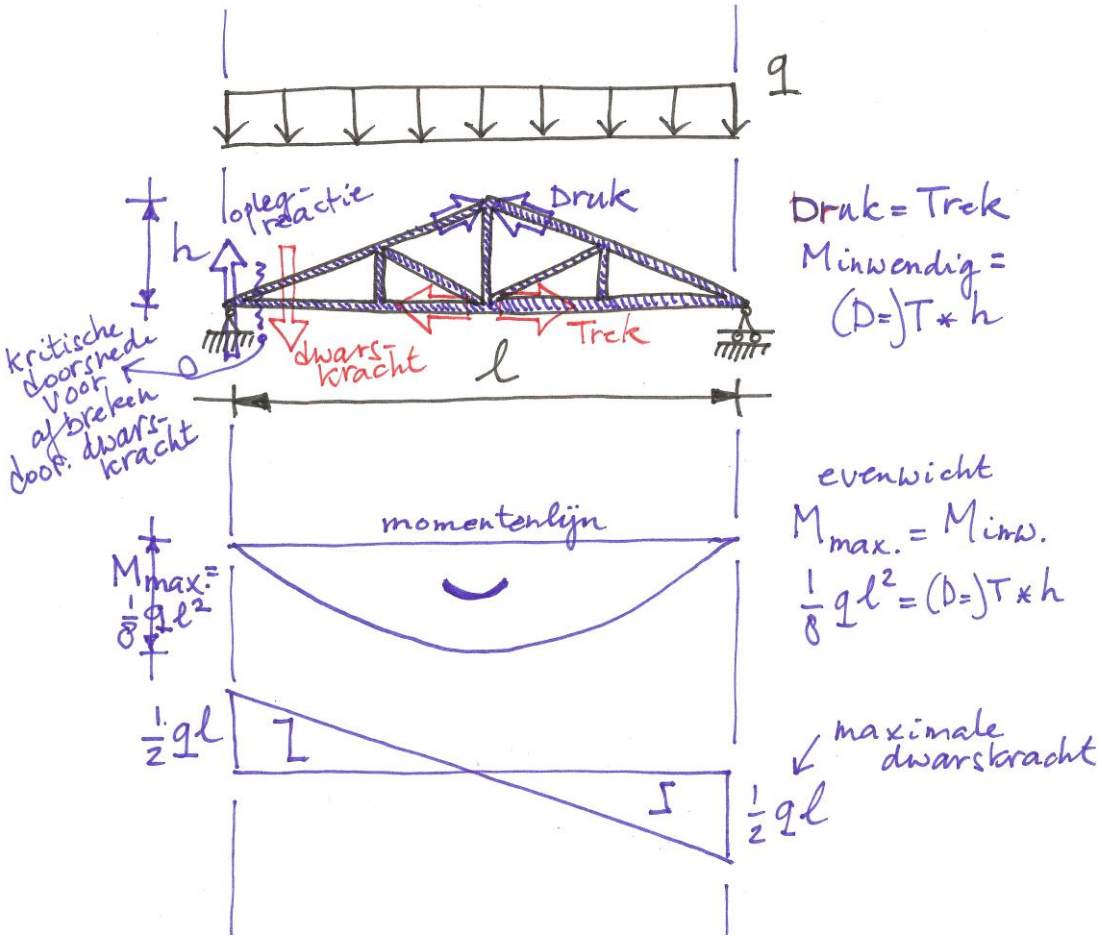
Bezwijkvormen van een onderspannen ligger. Let vooral op het verdraaien van het I-profiel!

5.3 Recht verlopende vakwerken

De meest industriële vorm van het vakwerk is het recht verlopende vakwerk. Eenvoudig te maken uit een rechte balk als onder en bovenrand en de diagonalen en staanders met een vaste maat daartussen. Bij het hoofdstuk 'Vakwerken' is meer over vakwerken te vinden.

5.4 Schuin verlopende vakwerken

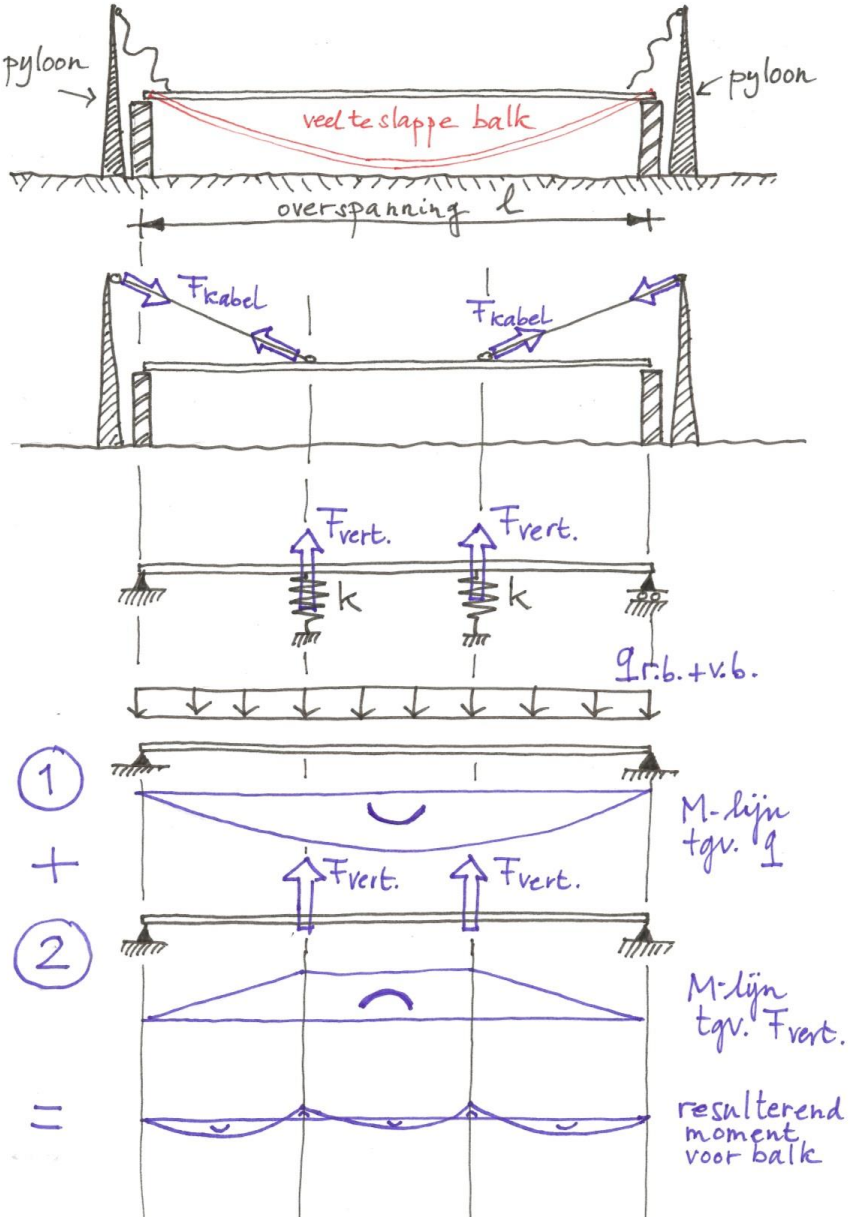
Een volgende stap is het verlopende vakwerk; bij de opleggingen klein en in het veldmidden het hoogst. Wederom daar materiaal aanbrengen waar de buiging het grootst is. Dat betekent minder materiaal nodig voor het vakwerk of spant, dus economischer en duurzamer. Let er wel goed op dat door een vakwerk niet alleen buiging maar ook dwarskracht moet worden overgebracht. Je kunt dus niet het vakwerk in een punt boven de oplegging laten eindigen. Dan zou het vakwerk daar door de grote dwarskracht kunnen afbreken! Zie ook bij het hoofdstuk 'Vakwerken' voor meer gedetailleerde informatie.



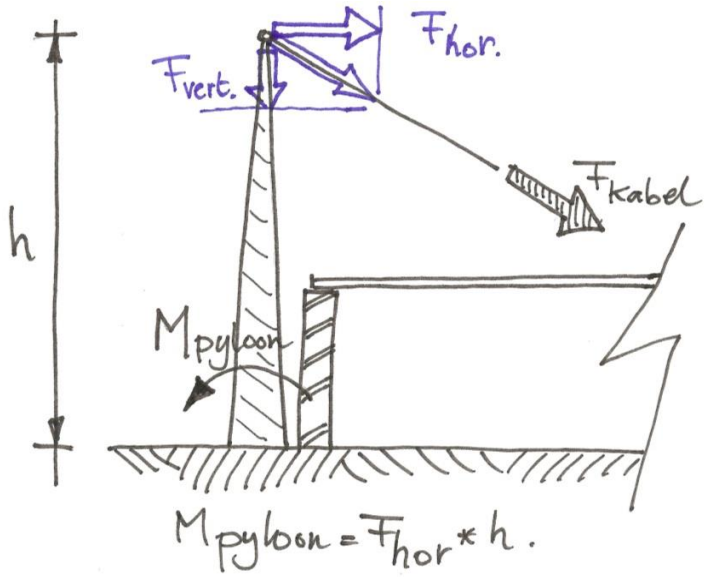
Voor dak-vakwerken geldt als vuistregel voor de hoogte dat deze circa 1/25 van de gewenste overspanning dient te zijn. Een vakwerk dat 150 meter moet overspannen, moet dan ook minimaal 6 meter hoog zijn. Zo'n lange, hoge en vooral smalle vorm is uiterst gevoelig voor zijdelingse instabiliteit (uit het vlak knikken of plooien). Daar kun je dus geen efficiënt gebouw mee neerzetten. Je hebt heel veel additioneel materiaal nodig, zoals steunbalken, extra diagonalen etc. om deze constructieve problemen op te lossen. Vanaf circa 80 tot 100 meter zijn vakwerken geen economische manier om een grote overspanning te maken. We moeten dus wat anders doen en dat lezen we in het hierna volgende.

5.5 Tui-constructies

We roepen de kabels te hulp om ons in staat te stellen een eigenlijk veel te slappe balk sterk en stijf genoeg te maken om een inmiddels zeer grote overspanning, meer dan 80 meter, te maken. Hiertoe volgen we de volgende strategie. Links en rechts van de overspanning plaatsen we een hoge kolom/paal/mast die we meestal pyloon noemen. Vervolgens leggen we van buitenmuur tot buitenmuur een veel te slappe balk neer. Als we niets zouden doen zou deze balk er als een slappe vaatdoek tussen hangen of misschien zelfs breken. Om dit te vermijden hangen we aan het hoogste punt van de pyloon één, of meer, kabels die we op een punt ergens aan de, te slappe, balk vastmaken. Als we de kabel strak spannen zal bij belasting op de balk de balk willen doorbuigen. Dat kan ter plaatse waar de balk aan de kabel vastzit niet: de kabel komt onder spanning te staan en zal de balk weer 'omhoog' trekken. We hebben eigenlijk door het aanbrengen van de kabels 'verende' of 'zwevende' steunpunten gecreëerd. Hierdoor is de overspanning van totaal lengte l terug gebracht tot (in het getekende geval) 1/3 van de overspanning l! De balk wordt dus op veel minder buiging belast en kan dus veel lichter zijn. In het onderstaande figuur wordt een en ander nog eens uitgelegd.

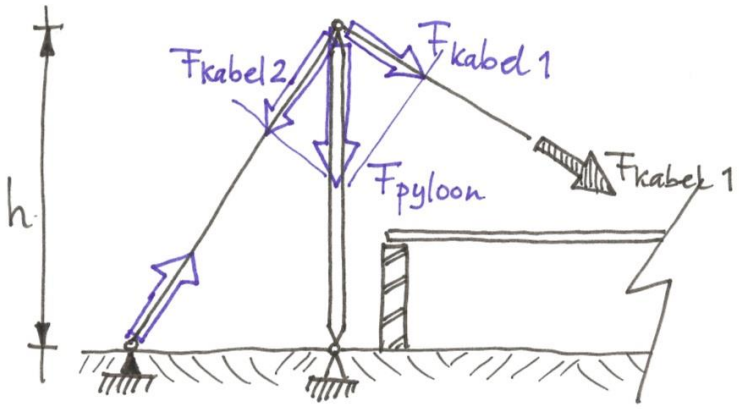


De kabels werken als 'verende' steunpunten. Je kunt de veerstijfheid die een kabel levert berekenen met de wet van Hooke (zie hoofdstuk 'Kabels'). In het algemeen geldt, hoe dikker de kabel, hoe sterker en stijver hij zich zal gedragen en ook, hoe langer de kabel, hoe slapper (minder stijf) hij wordt. In plaats van kabels gebruiken we soms massief stalen staven die zich stijver gedragen dan kabels.

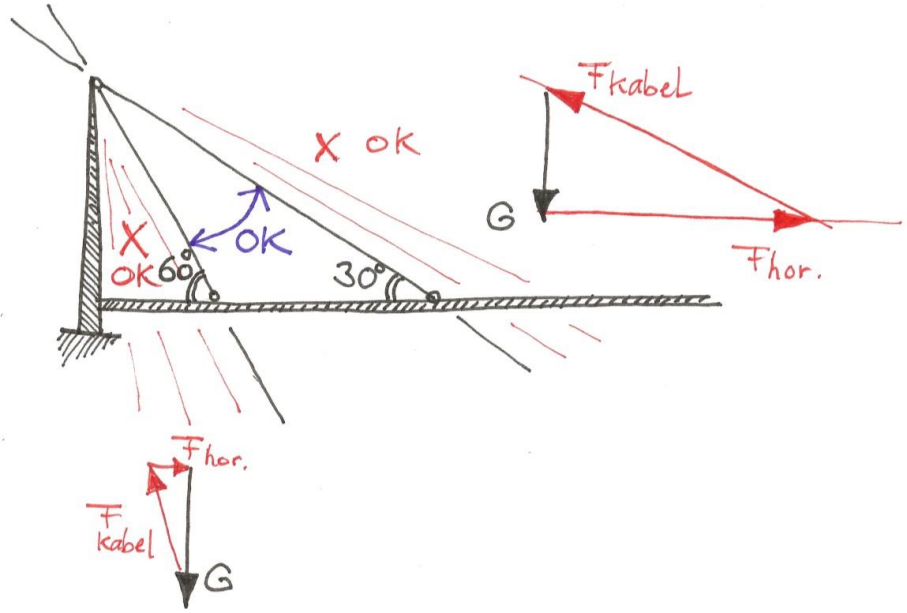


Een vrijstaande pyloon moet een buigend moment kunnen opnemen; vandaar dat de pyloon naar onder toe gaande steeds breder wordt.

Een belangrijk punt van aandacht is de invoer van de kracht uit de kabel in de pyloon. Je hebt daarbij twee mogelijkheden. De eerste mogelijkheid is om de kabelkracht door buiging van de pyloon naar de ondergrond te brengen. Dit betekent dat er onderin grote buigspanningen kunnen optreden; de pyloon moet daar dus sterk = breed zijn. De tweede mogelijkheid is een kabel ook aan de achterkant van de pyloon aan te brengen. Hierdoor wordt de kracht over de pyloon heen getrokken en ontstaat er alleen een axiale drukkracht in de pyloon. We moeten dit type pyloon dus op knik controleren. De kniklengte van de pyloon is de systeemlengte van de pyloon. Door de kabelafspantruc groeit de drukkracht in de pyloon wel tot een grotere waarde dan als we niet de afspanning aan brengen. Let ook op de opname capaciteit van de trekkracht in de achter-kabel bij de oplegging; wees er zeker van dat de ondergrond deze opwaartse kracht kan opnemen. In Nederland met onze slappe ondergrond kan dit wel eens een serieus probleem zijn. Een naar achteren afgespannen pyloon hoeft alleen op druk, dus op knik!, berekent te worden en dus niet op buiging.



Een belangrijk feit moet nog worden medegedeeld: je kunt kabels niet te steil en niet te slap op de balk laten aansluiten. Bij een te steile kabel is de krachtsinwerking van het gewicht van de balk niet genoeg om de kabel effectief te laten dragen en bij een kabel die onder een te slappe hoek aansluit is de kabelkracht vele malen groter dan het gewicht van de balk dat op die kabel draagt. Meestal houden we aan dat we kabels niet onder een kleinere hoek dan 30 graden laten aansluiten en niet onder een grotere hoek dan 60 graden.



Overzicht welke kabelhoeken nog goed zijn en welke niet.

5.6 Hangconstructies

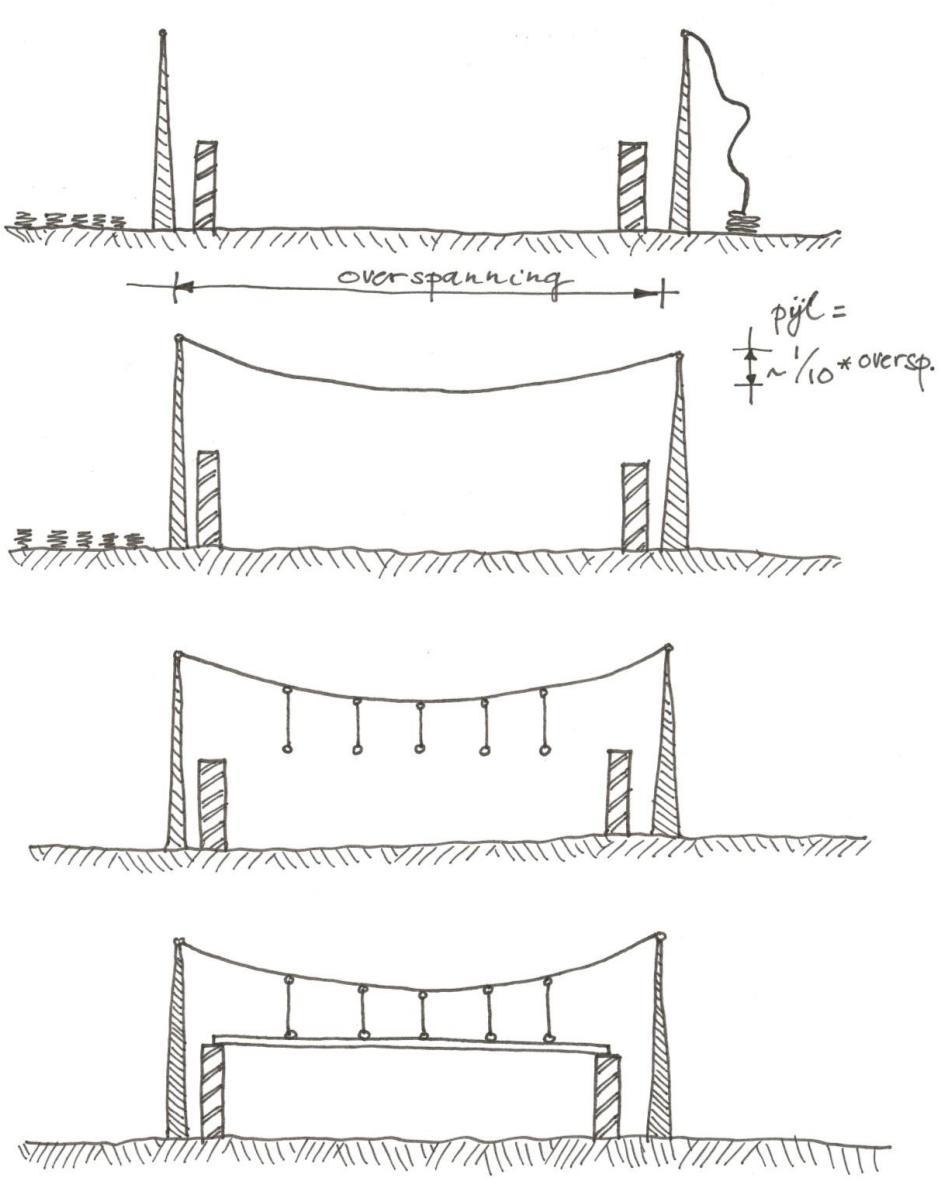
Komen we bij overspanningen groter dan 300 tot 400 meter dan zullen de regels voor de kabelhoek (moet tussen 30 en 60 graden liggen) en de bijbehorende hoogte van de pylonen kritisch worden. De bouwkosten van de pylonen zal gaan overheersen op de totale bouwkosten. We moeten dus een andere constructieve truc verzinnen. En dat is de Hang-constructie. Op de boomstam over de beek na één van de oudste constructies van de Mens: de Touwbrug over de rivier/ het ravijn gebruikt het zelfde principe.



Hangbrug in de Zwitserse Alpen, eigenlijk twee kabels gespannen tussen twee bergen en met ertussen natuursteenplaten als loopvlak en als tegenwicht tegen opwaartse krachten.

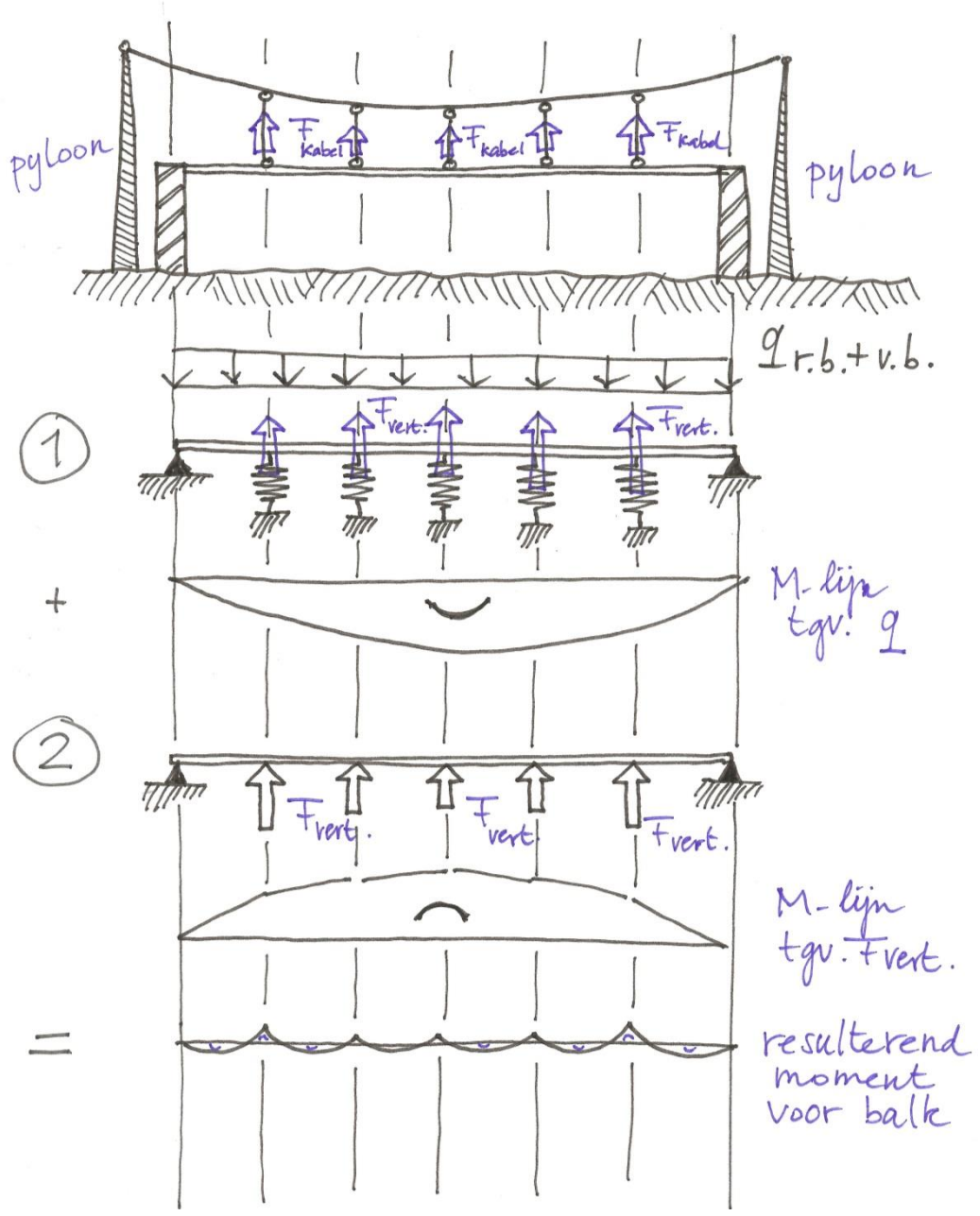
De hangconstructie wordt als volgt opgebouwd. Zet links en rechts van de twee buitenste muren van het gebouw een hoge pyloon. Hang tussen de twee pylonen een stevige kabel, deze zal automatisch in de vorm van de kettinglijn gaan hangen. Voor een gezonde krachtswerking in een hangconstructie moet een kabel circa 1/10 van de overspanning doorhangen. Meer mag wel, minder zeker niet. De doorhang eis bepaalt ook de minimaal benodigde hoogte van de pyloon. Een rekenvoorbeeld. Voor een hal met een vereiste vrije overspanning van 200 meter moet de hoofdhangkabel 200/10 is 20 meter 'doorhangen'. De vereiste vrije hoogte in de hal is bijvoorbeeld 10 meter en we hangen de kabel minimaal 5 meter boven het dak. Dan is de pyloonhoogte 20 + 10 + 5 is 35 meter.

Als de hoofdhangkabel eenmaal hangt kunnen we de secundaire hangkabels er aan vast maken. De hart-op-hart afstand van deze verticaal hangende kabels is een redelijke maat voor de secundaire overspanning in het dak bijvoorbeeld 10 meter. In ons voorbeeld van een hal van 200 meter overspanning heb je 200/10 is 18 verticale kabels nodig (20 min links en rechts een aansluitvlak tegen de buitenmuur. Aan deze hangende kabels bevestigen wij de hoofdbalk van het dak die dus geen 200 meter overspant maar slechts ongeveer 10 meter.



Opbouw en werking hangconstructie.

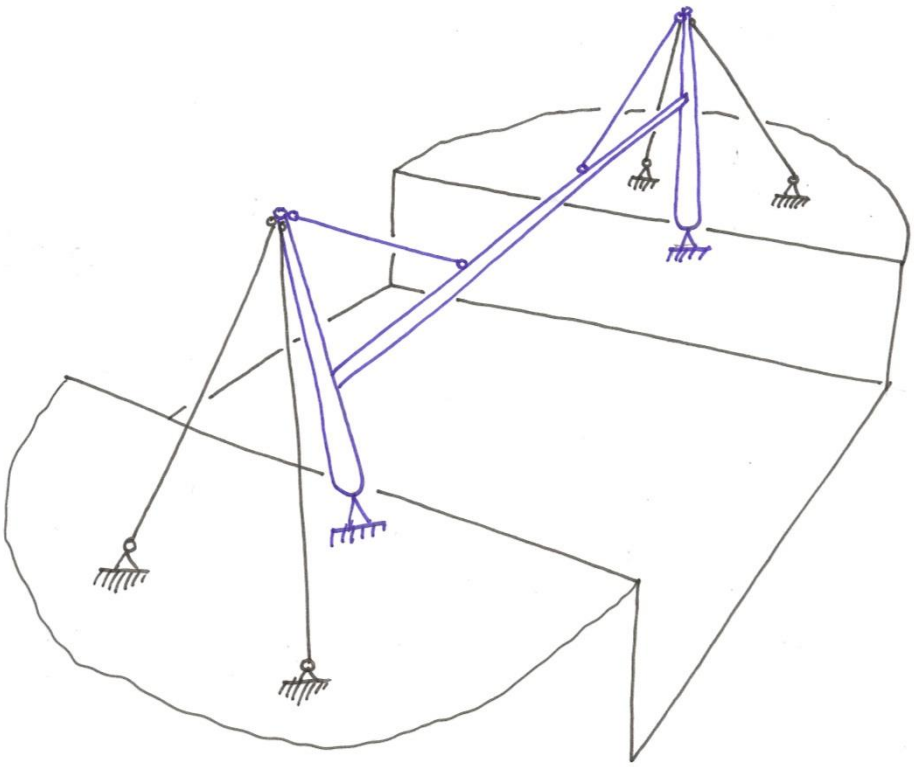
De krachtswerking in een hangconstructie berust op het feit dat de kabels door het gewicht van het dak en de belasting die op het dak uitgeoefend wordt, zoals sneeuw, mensen op het dak, wind etc. onder spanning komen te staan, daardoor uitrekken en als 'veren' 'zwevende' steunpunten gaan vormen. De opwaarts gerichte krachten van de verticale krachten duwen tegen de zwaartekracht in en compenseren daardoor de doorbuiging van de totale dakbalk. Het hangt van de stijfheid verhouding af in hoeverre dit totaal compenseert maar dit is wel de bedoeling van een hangconstructie. Het echte rekenwerk aan een hangconstructie moet door de computer gebeuren die alle invloeden in de berekening kan meenemen.



Krachtswerking van een hangconstructie.

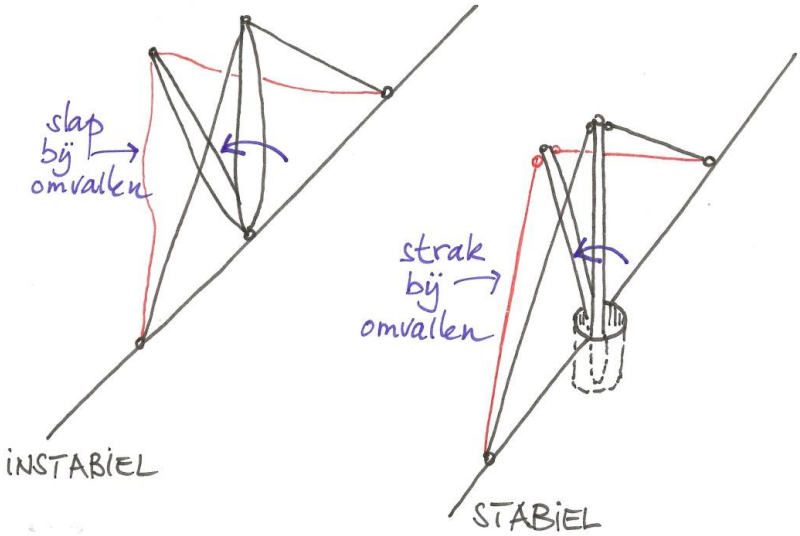
De hangconstructie is dus in dwarsrichting goed op te lossen maar hoe zit het met de stabiliteit in langsrichting van de hal? In principe kunnen de doorsneden van een hang-constructie hal, zoals hiervoor getekend, loodrecht op hun vlak omvallen. We kunnen iedere kolom aan de voet in de fundering inklemmen. Maar als we voor economische (want lichtere

pylonen) achtertuien (= kabels) hebben gekozen? En dus voor een scharnierverbinding (ook economischer dan een inklemming!) bij de voet van de pyloon? Dan kan dit systeem loodrecht op zijn vlak belast omvallen. Maar we hebben nog wat constructieve trucs om dit te voorkomen.



Achtertuien zodanig bevestigen dat de tuiconstructie niet kan omvallen.

De eerste truc is niet één achtertui maar twee tuien toe te passen die uit elkaar lopen. Zodoende ontstaat weer een stabiele driepoot aan de top die niet kan omvallen.
De tweede truc, die ook bij het Fink type vakwerk werd behandeld, is het steunpunt van de kolom duidelijk onder het bevestigingssteunpunt van de kabels of achtertuien te bevestigen. Wil de pyloon omvallen dan komt de kabel onder trek te staan en stabiliseert het geheel.



Toch niet omvallen bij enkele achter tui.

Hiermee zijn we aan het einde van de catalogus van de groeiende overspanning gekomen. Met de hangconstructie is de uiterste grens nog niet bereikt. In principe kun je eindeloos doorgaan met de hangkabel. En dat met heel weinig materiaal dat nog op een heel economische wijze, namelijk op trek (de kabels) belast wordt. Het dak zelf of bij een brug het wegdek kan in verhouding heel dun zijn aangezien alleen de secundaire overspanning (de afstand tussen de verticaal hangende kabels) overspant hoeft te worden.

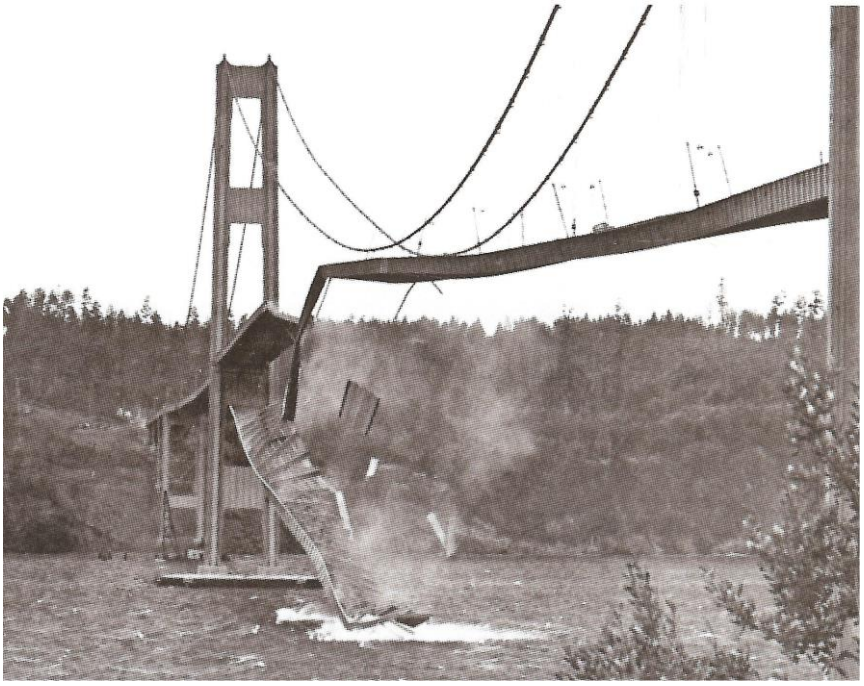


Tacoma Narrows brug in Washington, Westkust van Amerika, al hevig aan het torderen.

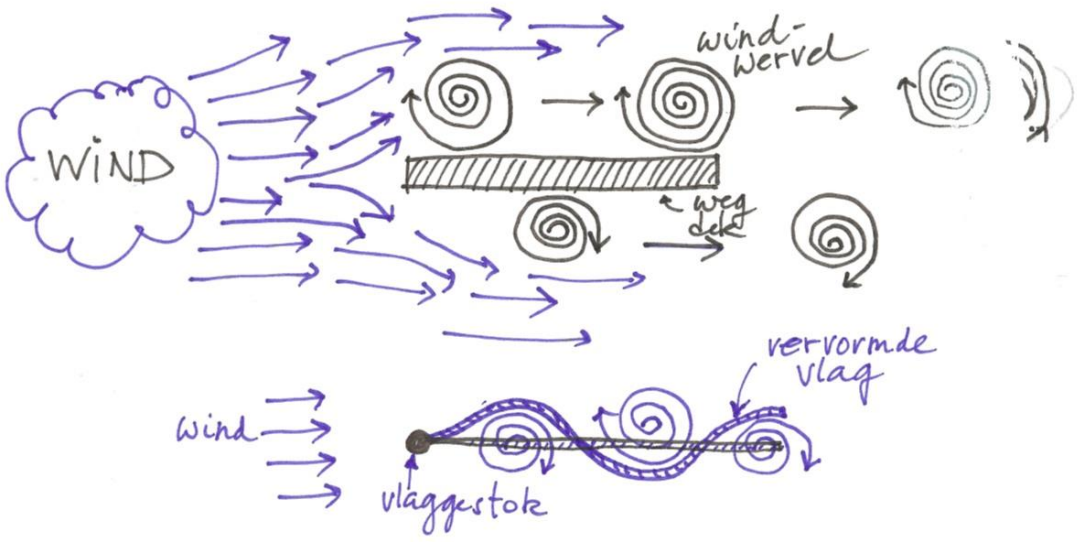
Toch zit daar nog een gevaarlijk addertje onder het gras. Dat addertje kwam in 1940 boven het gras bij de Tacoma Narrows brug aan de Westkust van Amerika. Het was een hangbrug met een middenoverspanning van 840 meter, in die tijd een record. Iedereen kent wel dat filmpje waar een grote hangbrug, de Tacoma Narrows brug dus, in een ingewikkelde slinger-beweging door de wind steeds meer begint te slingeren en uiteindelijk in duizend stukken uit elkaar valt.

Wat gebeurde daar? Eigenlijk het aloude verhaal van met steeds minder materiaal te willen bouwen (economischer) maar wel weer meer te overspannen. Het opzoeken van de grenzen die je pas herkent als je over de fatale grens heen stapt. De steeds hoger wordende gotische kathedralen werden steeds opener (spitsboogramen) en hoger door ingewikkelde muurwerken die uiteindelijk bezweken bij de kritische hoogte die in 1284 bij de Kathedraal van Beauvais bereikt werd: 48 meter!

Voor de Tacoma Narrows brug geldt eigenlijk hetzelfde verhaal. Weer een grotere overspanning voor een Hangbrug met een dunner wegdek: lekker goedkoop. Maar het wegdek (= brugligger) werd zo dun (plat) dat bij bruggen een onbekend fenomeen de kop op stak, de aëro-instabiliteit.

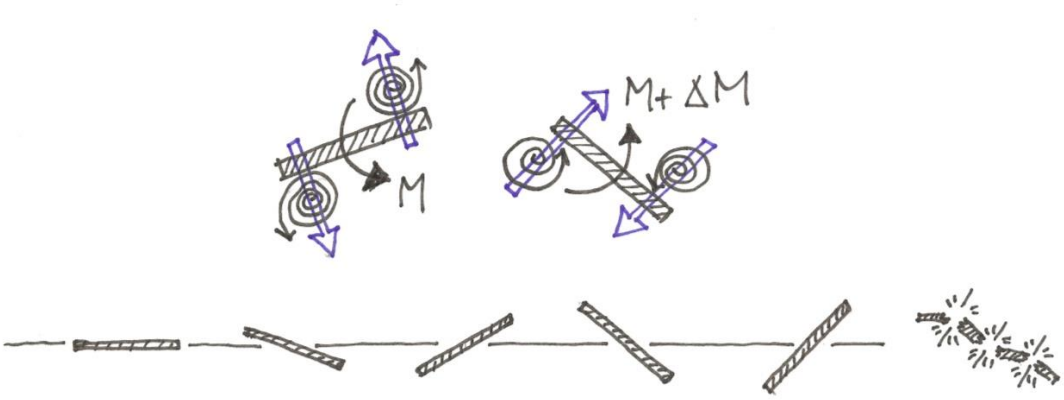


De instortende Tacoma Narrows brug.



Het loslaten van windwervels rond een object, vergelijking met een wapperende vlag.

Hierbij wordt door het beurtelings los laten van luchtwervels rond het wegdek dezelfde beweging opgeroepen als bij een in de wind wapperende vlag. Het wegdek was in die richting zo (torsie-)slap geworden dat hij bijna geen torsie weerstand meer had: eigenlijk een dunne plaat. OP 8 november 1940, een paar jaar na de opening tijdens een windkracht 6 à 7 (dus niet eens een zware storm!) lieten de windwervels in een dusdanige frequentie los dat het torsie slappe wegdek in zijn eigenfrequentie werd aangestoten. Net als bij een schommel kreeg het wegdek op het juiste moment een zetje van de loslatende windwervels. De brug tordeerde om 10.30 zo erg dat hij in 1000 stukken versplinterde en instortte. Sinds die tijd worden hangbruggen in de windtunnels getest om zeker te weten dat dit fenomeen niet kan optreden.



De frequentie van het loslaten van de windwervels leidt tot opslingering en, uiteindelijk, bezwijken.

Natuurlijk is dit een vreselijke ramp, alhoewel er gelukkig geen slachtoffers bij de Tacoma Narrows brug instorting vielen. Maar aan de andere kant door het analyseren van de oorzaak van de ramp en door na het begrijpen ervan maatregelen te nemen kunnen we weer verder overspannen met weer minder materiaal. Zo moet de Mensheid leren van zijn falen en vervolgens maatregelen nemen om het opnieuw optreden van falen te voorkomen. Vervolgens kunnen we weer verder op het pad van hoger, langer en slanker (goedkoper) tot . . . we tegen de volgende grens aanlopen.

6 Groeiende Hoogte

Het verhaal van hoogbouw is, gezien door de bril van een constructeur het gevecht met twee typen krachten: ten eerste de verticale krachten, eigenlijk de zwaartekracht en ten tweede de horizontale krachten.
De eerste, de zwaartekracht, is duidelijk: hoe hoger je bouwt, hoe meer gewicht je bovenop de onderste kolommen en de fundering zet. Zwaartekracht is relatief simpel te bevechten, gewoon zwaarder en dikker maken en dat gaat gelukkig lineair evenredig met de hoogte. Globaal gesteld twee keer zo hoog dan ook twee keer zo dik.
Moeilijker ligt het met de horizontale krachten. Waar komen die ook alweer vandaan? Daarom het onderstaande lijstje.

6.1 Horizontale krachten

1. Windbelasting.
Als je beseft dat een m^3 lucht toch nog 1,2 kilogram (12 N) weegt dan begrijp je dat bij een storm als al die lucht met hoge snelheid tegen het gebouw aanbotst er grote krachten uitgeoefend worden en daardoor het gebouw omver wil vallen. Ook kan de lucht om en over een gebouw wervelen (denk aan het wapperen van een vlag achter de vlaggenmast) en daardoor ook trek- en drukkrachten op het gebouw uitoefenen. In Nederland moeten we rekening houden met maximaal zo'n 200 kilogram/m^2 (2 kN/m^2) optredende winddruk, in orkaangebieden kan dit oplopen tot 550 kilogram/m^2 (5,5 kN/m^2) Een behoorlijke belasting dus.

2. Excentriciteit.
Of te wel scheefstand, niet recht boven elkaar bouwen. Hoe goed de aannemer ook zijn best doet, in de praktijk blijkt dat het bijna onmogelijk is alles precies boven op elkaar te zetten. Je eerste bouwervaringen als blokken stapelende kleuter toonden dit al aan. Hoe netjes je de blokken ook stapelde op een gegeven moment gaat het torentje wankelen en even later omvallen. Scheefstand of excentriciteit leidt dus automatisch tot horizontale (omval-) krachten die ergens moeten worden opgenomen. Denk niet, 'dat valt wel mee', want een scheefstand van 3 graden is bijna niet te zien maar geeft een horizontale kracht van 5 % van het totale verticaal werkend gewicht van een gebouw.

3. Aardbevingen.
Gelukkig kennen we die niet in Nederland, hooguit soms een kleintje in Groningen (aardgaswinning) of Limburg (vanuit de Eiffel of de Ardennen). In het buitenland des te meer zoals de televisie ons jaarlijks laat zien, bijvoorbeeld Haïti in 2009. Bij een aardbeving is het vooral het horizontaal bewegen van de ondergrond die voor veel schade zorgt. Het gebouw blijft door zijn traagheid als het ware staan en de grond waar het gebouw opstaat wordt er onder vandaan getrokken. Je kunt ook bijna altijd zien dat alleen de kolommen en de muren in de onderste laag afgebroken zijn. De rest van het gebouw is daar over heen gevallen. Het is dus eigenlijk een dwarskrachtbreuk die bij aardbeving optreedt.
Je kunt een gebouw redelijk eenvoudig op aardbeving uit rekenen door een percentage van het eigen gewicht (in het Engels zo mooi dead load geheten) als horizontaal aangrijpende belasting in rekening te brengen. In gebieden waar zware aardbevingen kunnen optreden kan dit percentage tot wel 50% oplopen! Daar moeten dus behoorlijk zware afdrachtsystemen in het gebouw voor worden ingebouwd.

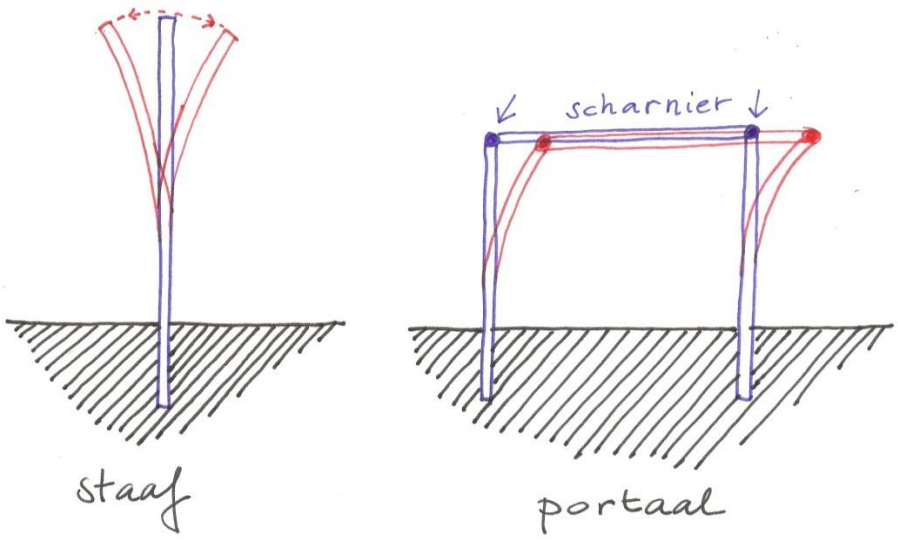
4. Aanrijdingen / botsingen.
Van mensen die ergens tegen aan lopen of schoppen tot vrachtauto's en treinen die de weg kwijt zijn, allemaal roepen ze horizontale krachten op die door het gebouw opgenomen moeten kunnen worden. Natuurlijk hoef je niet ieder gebouw op een er tegenaan botsende vrachtauto uit te rekenen maar als de kans er is dat dit zich voordoet, moet je er wel rekening mee houden.

5. Explosies, Oorloghandelingen, Terrorisme.
Bij gasexplosies, bommen en kanonvuur worden er enorme horizontale krachten uitgeoefend op een gebouw. Bij explosie moet je denken aan drukkrachten van 10-15 kN/m^2 in een zeer korte tijd opgebouwd en, kenmerkend voor een explosie, vrijwel meteen weer weggevallen. Daardoor wordt een negatieve reactiekracht oproepen, de zogenaamde implosie. Meestal is het een hopeloze zaak deze krachten proberen te beteugelen. Men moet accepteren dat het gebouw er niet tegen zal kunnen en ernstige schade en verlies aan levens van de bewoners zal betekenen. Toch is het wel mogelijk gebouwen hier op te ontwerpen. Besef wel dat er dan extreme constructieve maatregelen genomen moeten worden zoals dikke lagen aarde of zand tegen de wand of op het dak en heel dikke stalen of zwaargewapende betonnen wanden of daken.

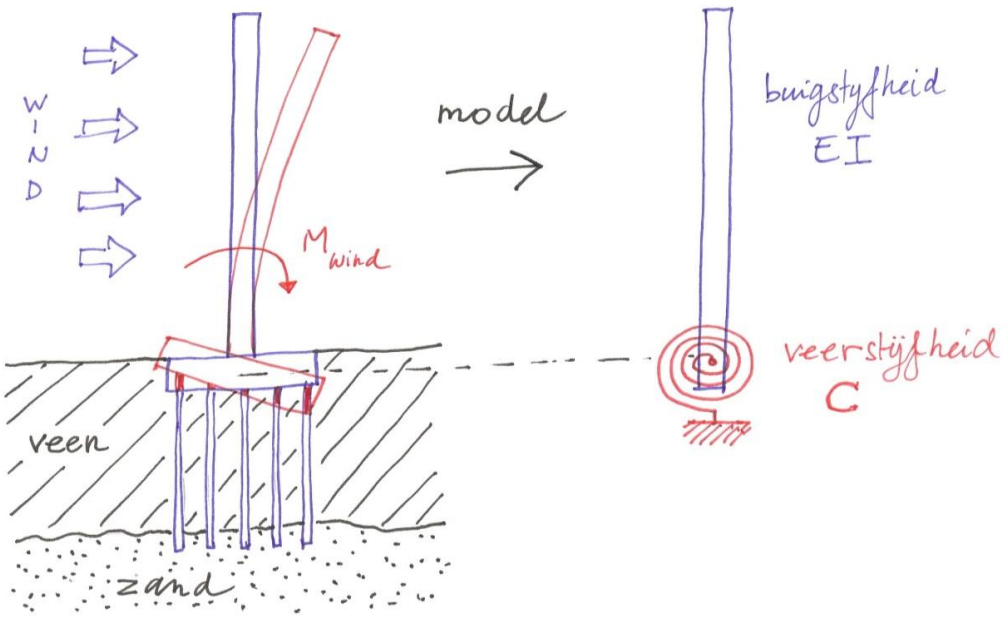
6.2 Opname horizontale krachten

Met welke constructieve hulpmiddelen kan ik horizontale krachten opnemen? Er staan ons een aantal constructieve hulpmiddelen ter beschikking om onze gebouwen geschikt te maken om de horizontale belastingen uit het rijtje hierboven op te nemen.

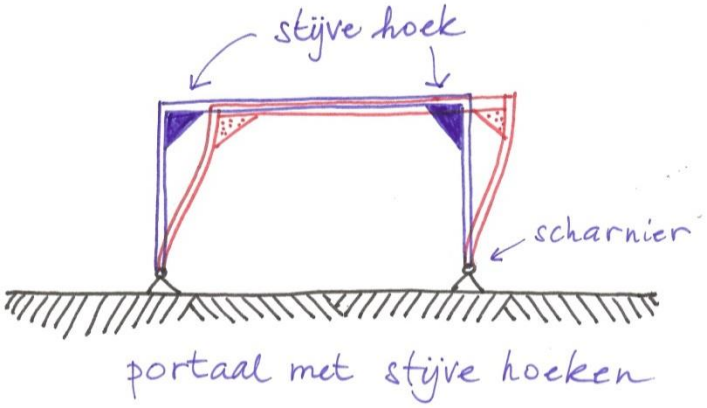
1. Inklemming.
Gewoon iedere kolom of schacht / koker goed inklemmen in de ondergrond. Twee basisvormen zijn hiervoor beschikbaar, de ingeklemde staaf en het ingeklemde portaal.



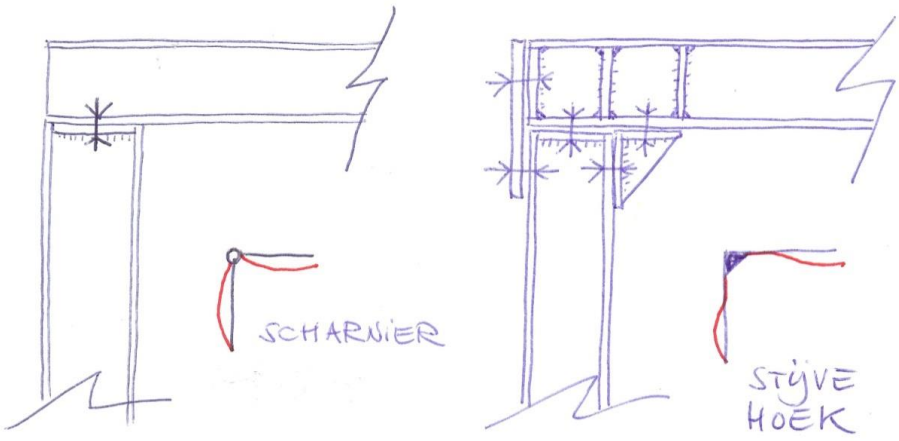
Een inklemming is in werkelijkheid moeilijk te realiseren. Als een gebouw gefundeerd is op palen dan zullen die palen al vervorming (zakking paalpunt, indrukking paal zelf) te zien geven. Daarom moeten we iedere fundering voor onze berekeningen zien als een grote, weliswaar stijve veer die toch iets kan bewegen en, denk er aan!, een kleine verdraaiing aan de voet leidt bij een hoge toren al snel tot grote uitbuiging aan de top. We karakteriseren of schematiseren die 'inklem'-veer als een grote horlogeveer aangrijpend aan de onderkant.



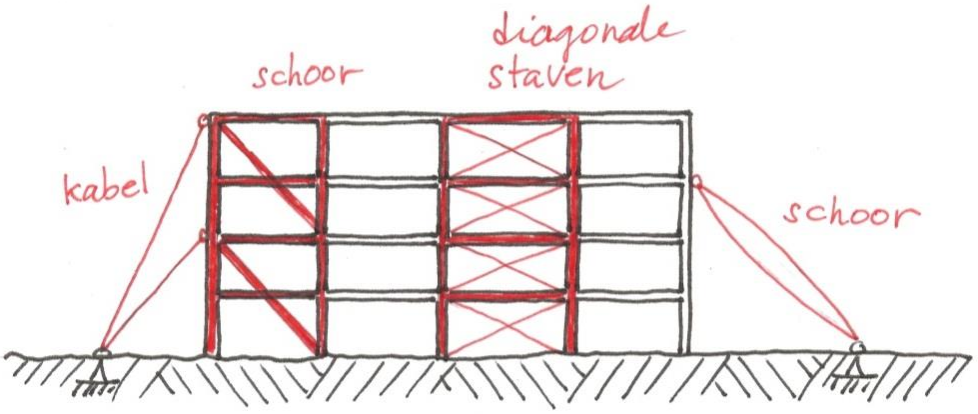
2. Stijve hoeken maken.
Door iedere ontmoeting van een kolom met een balk als buigstijve knoop uit te voeren ontstaat een mechanisme dat horizontale krachten kan opnemen. Weliswaar is dit mechanisme niet sterk en stijf maar een paar bouwlagen zijn zo wel stabiel (= opname horizontale krachten mogelijk) te maken.



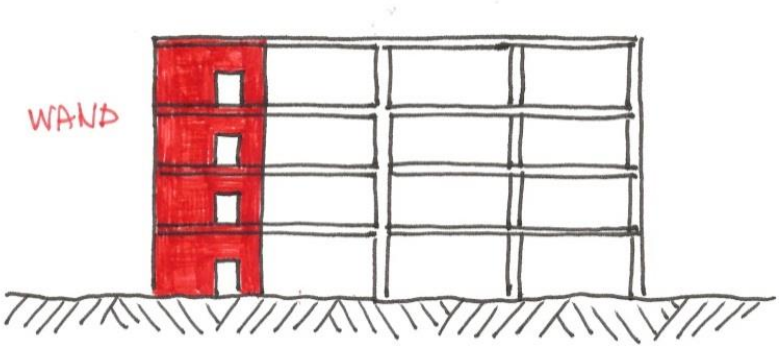
Besef wel dat een buigstijve knoop een duidelijke verdikking te zien zal geven en ook veel arbeidsloon voor het maken nodig heeft.



3. Driehoeken maken.
Het altijd en eeuwig opgaande principe: creëer driehoeken en het geheel is vanzelf stijf. Dat kan letterlijk door diagonalen of schoren toe te voegen maar ook door kabels te spannen. Let er op dat dit soort systemen altijd goed op de fundering aansluit en niet er net boven stopt. De windverbanden die we met driehoeken opbouwen, kunnen met kruisende diagonalen of uit enkele schoordiagonalen opgebouwd worden. Besef dat de schoren op druk worden belast en dus veel zwaarder gedimensioneerd moeten worden dan de diagonale staven die alleen op trek worden belast.

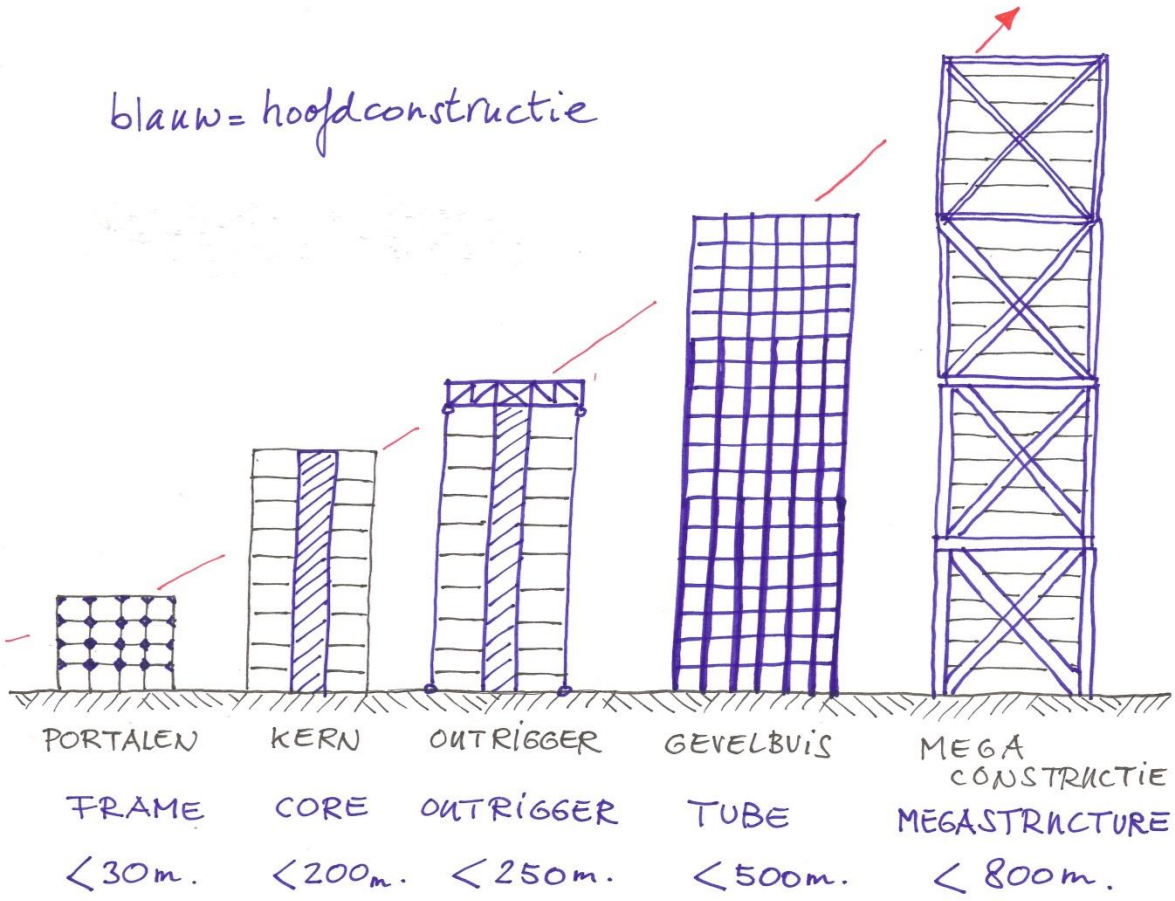


4. Volle wanden mobiliseren.
Ook volle wanden kunnen als stabiliteitswanden ingezet worden. Voor lage gebouwen kunnen ook metselwerkwanden als stabiliteitswanden ingezet worden maar als het gebouw maar enigszins hoogte krijgt moeten betonnen wanden en nog hoger zelfs gewapend betonnen wanden ingezet worden. Probleem hierbij is dat er toch gaten voor bijvoorbeeld deuren of ramen gemaakt moeten kunnen worden. Dit tast het draagvermogen aan en kan een wand zelfs ernstig verzwakken. Controle hierop is dan ook noodzakelijk.



6.3 De groeiende hoogbouw

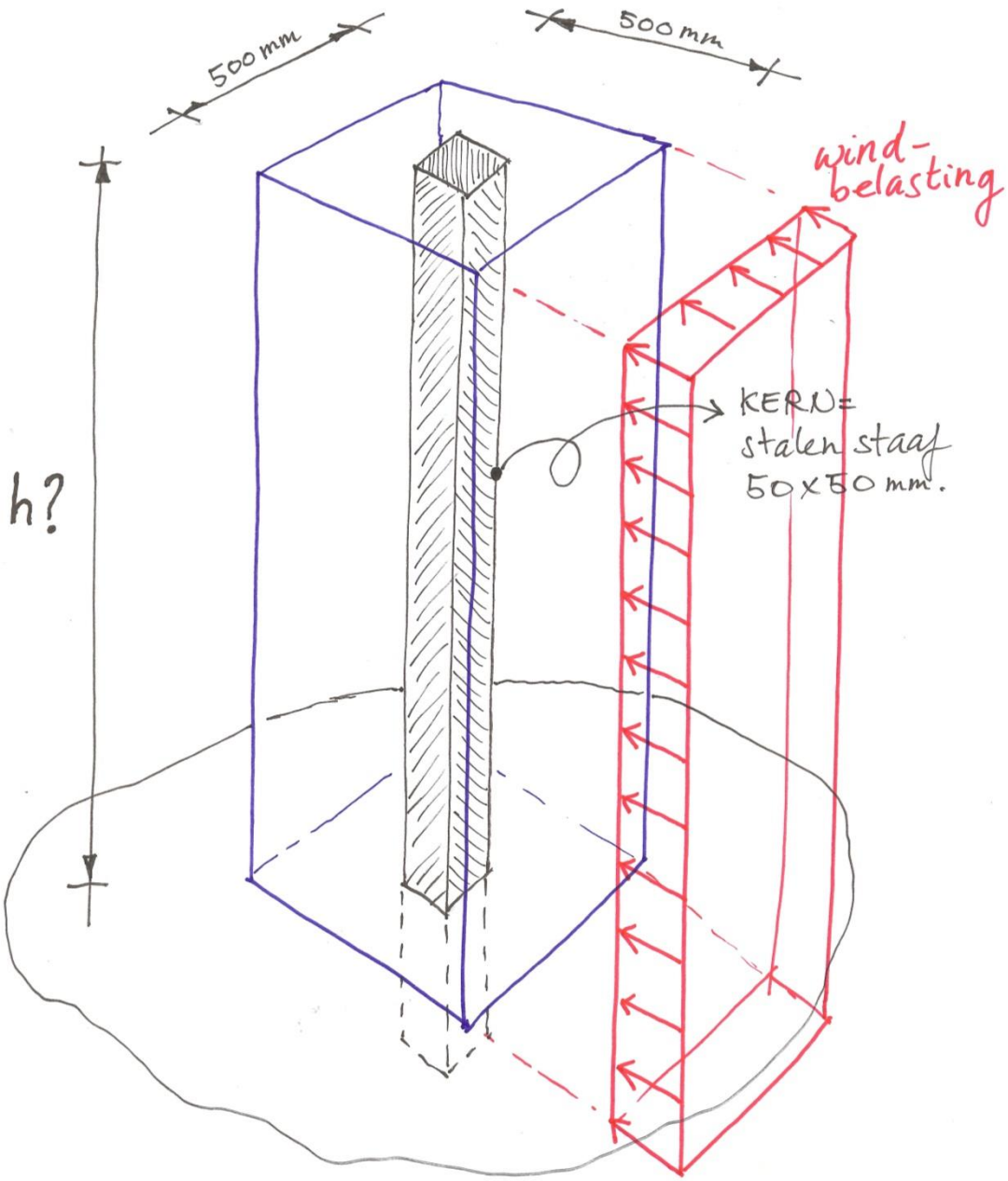
Het hierna volgende figuur geeft een mooi overzicht van de constructiesystemen die ons ter beschikking staan om steeds hoger te bouwen. Zoals je kunt zien heeft ieder systeem zijn grenzen, zijn limieten. In de figuur staan hoogte indicaties in meters. Dit zijn gemiddelde, globale waardes binnen de kaders van de huidige bouwtechniek en materiaaleigenschappen. Met veel geweld, lees materiaal, zou je misschien hoger kunnen komen maar je bent dan zeer oneconomisch bezig.



Laten we ons gebouw laten groeien en kijken welke draagsystemen voor hoogbouw voorbij komen. We beginnen met het portalen-systeem (Frame in het Engels), waarbij we de stijve hoeken gebruiken om weerstand te bieden tegen de horizontale krachten. Dat is een niet al te sterk systeem. Daarom kunnen we er ook niet hoog meekomen. Boven de dertig meter zijn de knopen en de balken en kolommen niet meer stijf genoeg te maken. We moeten wat nieuws verzinnen en dat is de stevige staaf of koker die midden in het gebouw staat, goed ingeklemd in de fundering. Deze kern (Core in het Engels) zoals we hem noemen, is de schacht waarin de liften, de trappen en de installaties (vooral kabels, leidingen en luchtkanalen) zich bevinden. Eigenlijk van nature alle verticale gebouwelementen. De wanden van de kern kunnen uit beton (volle wanden) of uit staal (vakwerken) bestaan. Boven een bepaalde hoogte, die hier op 200 meter is gesteld voldoet de kern niet meer. We kunnen de kern verstijven door hem een stijve 'hoed' te geven, de zogenaamde outrigger. Hierdoor wordt de kern versterkt en verstijfd en kunnen we zo'n 50 meter hoger komen. Willen we nog hoger komen dan moeten we overschakelen op een sterker en stijver systeem en dat is het Buis-principe (Tube in het Engels). Hierbij promoveren we het hele gebouw tot kern. De hele gevel wordt zo uitgevoerd dat in de gevelvlakken met, wederom stijve hoeken tussen de balken en kolommen, de horizontale krachten kunnen worden afgevoerd. Die stijve hoeken blijven een moeizame constructie en boven 500 meter hoef je dit systeem dan ook zeker niet meer te proberen. Je moet weer driehoeken toepassen maar dan op gebouwschaal. De gevel-Buis wordt versterkt en verstijfd met grote diagonalen. Dit noemen we een Megaconstructie (Mega structure in het Engels). Dit is een zeer sterk en stijf systeem en je kunt hiermee tot wel 800 meter komen. Als je goed kijkt kun je zien dat, zowel bij de gevel-Buis als de Mega constructie de elementen naar onder toe steeds zwaarder (en sterker) moeten worden.

6.4 Maatgevende criteria voor hoogbouw

Wat zijn de maatgevende criteria voor een hoogbouw? Zoals bekend, moet elk gebouw aan de drie S-en voldoen. Het gebouw moet Sterk genoeg zijn (niet breken of scheuren), het moet Stijf genoeg zijn (niet te veel vervormen) en het moet Stabiel zijn (niet omvallen). Bij hoogbouw komt daar nog een geheimzinnige eis bij; het gebouw mag niet te veel gaan trillen c.q. zwaaien na een plotselinge belasting zoals een windstoot of windvlaag. Om dit alles toe te lichten maken we een eenvoudig model dat eigenlijk voor iedere hoogbouw geldig is: de goed in de ondergrond ingeklemde staaf. We gebruiken een massief stalen vierkante staaf van 50 x 50 mm en laten die steeds groter worden zodat we kunnen analyseren wat er, al groter wordend, gebeurt en we begrijpen welk criterium wanneer kritisch is.



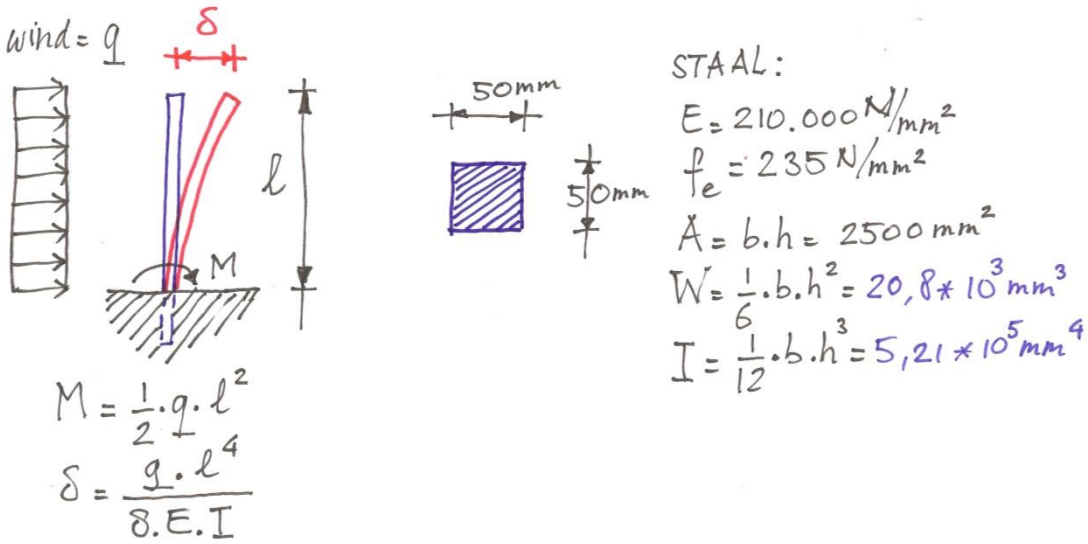
Om ons model meer op een echt gebouw te doen lijken denken we rondom de staaf, die we als 'kern' van ons gebouw zien een vloer van 0,50 x 0,50 meter zodat ook de gevelbreedte op 0,50 meter per zijvlak vast ligt. We vereenvoudigen de windbelasting op 1 kN/m^2, gelijkmatig verdeeld en de vloerbelasting (rustend + variabel) stellen we op 0 kN/m^2 om alleen met de invloed van de wind te kunnen rekenen.
Je ziet ook hoe belangrijk de horizontale schijfwerking van de vloeren zijn. In het vlak van de vloer worden de windkrachten die op de gevel aangrijpen via de gevelconstructie naar de vloerranden verplaatst en vervolgens via het (heel stijve) vlak van de vloer naar de 'kern' gebracht.

We gaan nu de drie S-en; de drie criteria onderzoeken.

1. Sterkte
Het criterium hiervoor is dat de massief stalen staaf door buiging aan de voet, daar waar de staaf in de ondergrond zit ingeklemd, niet mag breken. We rekenen een belasting-veiligheidsfactor van 1,5, de windbelasting van de gevel die op de staaf werkt is dus 1,5 x (0,5 m x 1,0 kN/m^2) is 0,75 kN/m^1.
Het buigende moment aan de voet is dus M = ½ x 0,75 x h^2 = 0,375 x h^2 kNm.
Maximaal toelaatbaar aan spanning is de vloeispanning f_e, groot 235 N/mm^2. De formule voor de spanning is f = M / W of te wel 235 = (0,375 x h^2 x 10^6) / (20,8 x 10^3).

NB. Het is slim om alles in N (Newton) en mm in de berekeningen in te voeren, niet alleen worden spanningen in N/mm^2 uitgedrukt (ook wel ipv N/mm^2 de notatie MPa (M = mega = 10^6, Pa = pascal, 1 MPa = 1 N/m^2) maar ook omdat vervormingen/ doorbuigingen in mm uit de berekeningen komen. Dat betekent dat we een buigend moment in kNm zoals hierboven met 10^6 moeten vermenigvuldigen om Nmm te krijgen.

Met deze formule berekenen we dat bij een hoogte h van 3,61 m de stalen staaf voor deze situatie zal breken of vloeien.



2. Stijfheid
Het criterium volgens de Normen voor stijfheid is dat de staaf aan de top niet meer mag doorbuigen (vervormen) dan 1 / 500 van de hoogte: h / 500.
De doorbuiging bij de windbelasting van 0,5 kN/m^1 (zie hierboven) is volgens de formule voor de uitbuiging van een uitkragende staaf delta = (0,5) x (h^4 x 10^12) / (8 x 210.000 x (5,21 x 10^5) = (h x 10^3) / 500. (NB alles weer in N en mm!) Hieruit is te berekenen dat

voor deze situatie op een hoogte van 1,518 meter de toelaatbare doorbuiging bereikt zal worden. De bijbehorende doorbuiging is dan 1/500 x 1518 is 3 mm. In dit geval niet veel, het is ook maar een klein model. Bij een 200 meter hoog gebouw is de toelaatbare doorbuiging 1/500 x 200.000 is 400 mm of te wel 0,40 meter.

3. Stabiliteit
De stabiliteit wordt hier verzorgd door de ingeklemde stalen staaf die als een stabiele kern voor het gebouw de horizontale krachten uit bijvoorbeeld de wind afvoert naar de ondergrond.
Dit systeem moet de stabiliteit, de standzekerheid kunnen garanderen. Wel moet nog door controle berekeningen aangetoond worden dat het systeem sterk en stijf genoeg is.

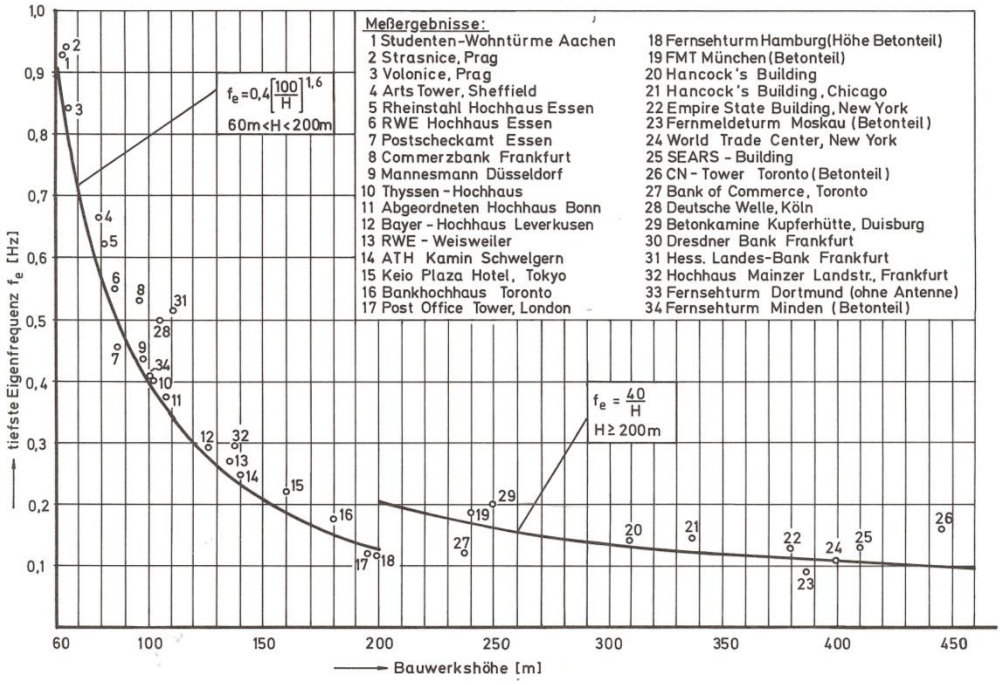
Conclusie rekenwerk aan de drie S-en
Uit het rekenvoorbeeld blijkt dat sterkte voor een redelijk slanke hoogbouw geen probleem is. De vereiste stijfheid is echter een strengere eis die vrijwel altijd maatgevend zal zijn. In het rekenvoorbeeld kunnen we voor de sterkte tot 3,61 meter hoog gaan; de stijfheid beperkt die hoogte tot 1,32 meter.

6.5 Trillingsgevoeligheid en eigenfrequentie

Naast de drie S-en is er nog een verborgen criterium voor Hoogbouw. De stijfheid is normaliter het maatgevende criterium voor een Hoogbouw. Toelaatbaar volgens de Normen is 1/500 van de hoogte. Bij een 200 meter hoog gebouw is dit 400 mm, bij een 400 meter hoog gebouw 800 mm en bij een gebouw van 800 meter hoog, zoals de Burj Khalifa in Dubai, momenteel het hoogste gebouw van de wereld, is de (toelaatbare) doorbuiging van de top zelfs 1600 mm of te wel 1,60 meter! Dat zijn behoorlijke bewegingen en dat is de oorzaak van een nieuw probleem: de trillingsbeweging in de wind wordt voelbaar in het gebouw. En dat vinden mensen alarmerend. Zo zeer zelfs dat sommige mensen zeeziek worden in hoge gebouwen.
Beweging of trilling wordt als beangstigend ervaren, misschien omdat vroeger trilling op naderend gevaar duidde, een zwaar dier dat in aantocht was, een aardbeving of een instorting. Dus hoe hoger we bouwen des te beweeglijker onze gebouwen worden. Eigenlijk konden wij dat als kleuter al weten. Onze blokkenstapeling begon ook als de kritieke hoogte genaderd werd, vervaarlijk te slingeren. Dat slingeren is een belangrijk signaal, het duidt er op dat een kritieke fase bereikt wordt. De slinger beweging noemt men in de toegepaste mechanica de eigenfrequentie. De eigenfrequentie is die frequentie waarin een constructie gaat bewegen of trillen als er een stoot tegen aan gegeven wordt. Dat betekent dat die beweging mogelijk is *zonder dat er verder een uitwendige kracht op werkt*.
Elke constructie heeft een eigenfrequentie en eigenlijk nog veel meer dan één, maar de eerste eigenfrequentie is de meest eenvoudige vervorming. De hogere eigenfrequenties zien er veel ingewikkelder van vorm uit en er is ook veel meer energie voor nodig om deze tot stand te brengen. Vergelijk de trillingsvormen van een gitaarsnaar, hoge tonen en lage tonen afhankelijk van de spanning in de snaar. In de praktijk is meestal de eerste eigenfrequentie (en dus de laagste) maatgevend voor mogelijke ellende, zoals voelbare trillingen en extra buigende momenten, die wij daaruit kunnen ondergaan.

Op de volgende pagina een grafiek met daarin door Duitse onderzoekers afgeleid het verband tussen de hoogte en de eigenfrequentie gemeten in hoge gebouwen. Ook staat er een verbazing wekkend simpele (benaderings)formule bij waarmee de eerste eigenfrequentie van een hoogbouw is af te leiden. Te zien is dat dit van 1 Hz bij een laag gebouw tot 0,1 Hz bij een 400 meter hoog gebouw kan verlopen. 1 Hz is 1 Hertz en 1 Hertz wil zeggen één

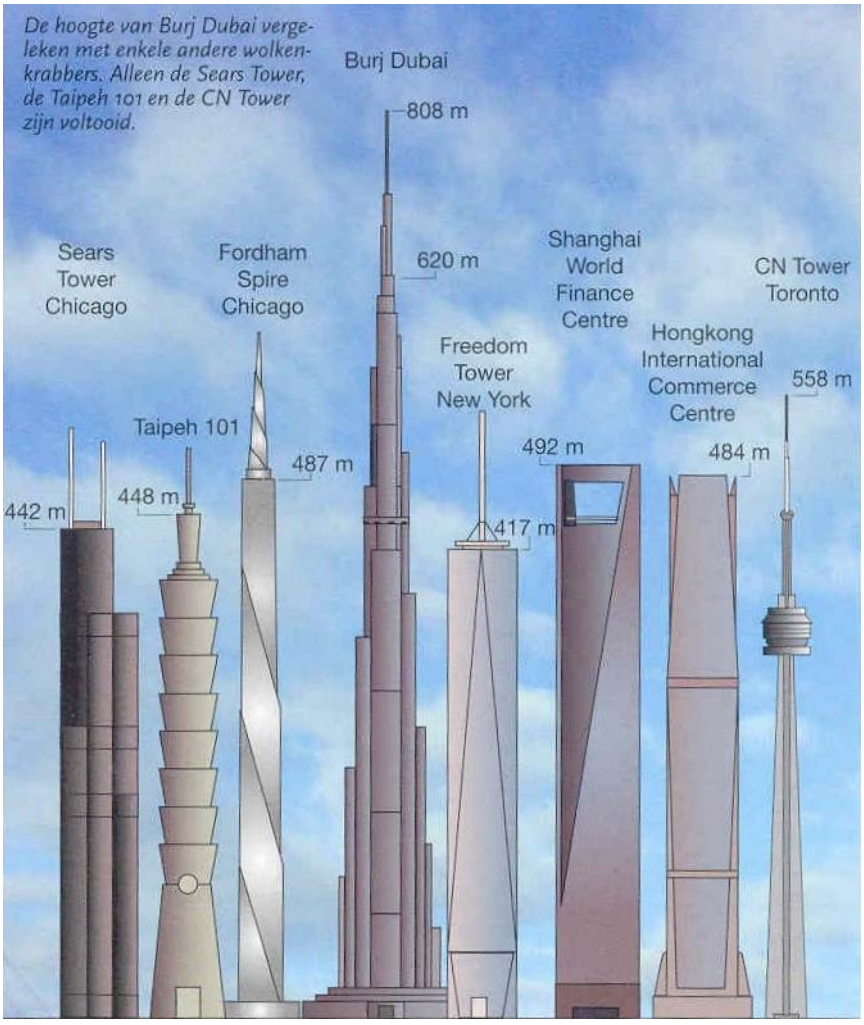
trilling per seconde. Een eigenfrequentie van 0,1 Hz wil dus zeggen dat één volledige trilling (= bewegen uit evenwichtsstand naar links, dan naar rechts en dan terug naar evenwichtsstand) 10 seconden duurt!



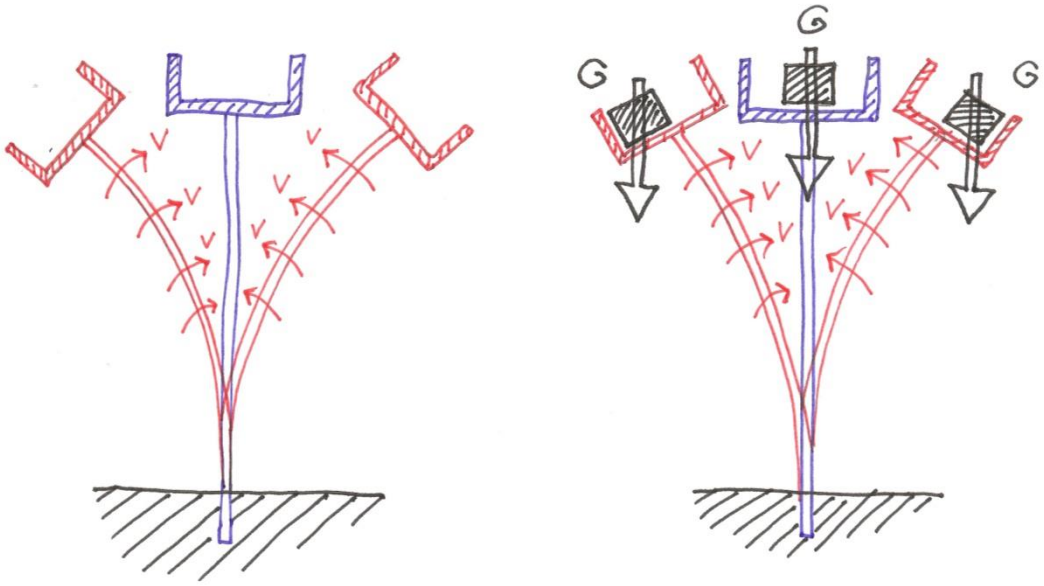
Eigenfrequentie van hoge gebouwen en torens.

De hoogbouw staat dus heel langzaam tijdens de windstoten van een zware storm heen en weer te zwaaien. Het vervelende van deze beweging is dat er niet veel energie voor nodig is en dat de constructie van nature weinig dempt door inwendige wrijving in het materiaal, slechts globaal zo'n 3%. De beweging kan dus heel lang duren en dat voelen de mensen en daarover klagen ze. Ze vinden het een angstig makend gevoel. Onterecht want spanning-technisch gebeurt er niets. De toelaatbare spanning wordt in de verste verte niet benaderd. Toch zitten er een paar negatieve consequenties aan het begin van een gebouw in de eigenfrequentie. De eerste is gewoon discomfort. Het is vervelend als alles steeds aan het bewegen is, ook al is het minimaal. De tweede consequentie is ernstiger. Het kan gebeuren dat de frequentie waarmee de windvlagen tegen een gebouw aan botsen de zelfde is als de eigenfrequentie van het gebouw. In dat geval gebeurt er hetzelfde als bij de dikke dame op de schommel. Door op het juiste moment een zetje te geven kunnen we de dikke dame tot duizelingwekkende (voor haar dan) hoogte brengen! Zo zouden ook die opeenvolging van windvlagen de hoogbouw, door op het juiste moment een zetje te geven, zover laten doorbuigen dat de hoogbouw toch afbreekt aan de onderkant.
Dit verschijnsel noemt men opslingeren. Een horror scenario natuurlijk maar het zou kunnen. Denk aan de brug over de Tacoma Narrows in Amerika die ook door de wind in eigen trilling werd gebracht en zichzelf kapot verdraaide in dit geval. Daarom moeten we hoogbouwen hoe hoger ze worden steeds stijver maken. Dat wil zeggen stijver dan volgens de Norm noodzakelijk is (1/500 x de hoogte) om uit de buurt van het opslingeringsgevaar van de eigenfrequentie te blijven. De frequentie van de windvlagen varieert tussen de 0,1 en 0,3 Hz en gelukkig zijn de windvlagen nooit zo groot als een gebouw. Met allerlei moeilijke, zogenaamd dynamische berekeningen valt er wel wat aan te rekenen, met de onontbeerlijke hulp van de computer, maar meestal houden we aan dat de eerste eigenfrequentie van een gebouw niet lager mag zijn 0,5 Hz.

Dat betekent dat we de hoge gebouwen nog vele malen stijver moeten uitvoeren door allerlei staven, kolommen en wanden toe te voegen of zwaarder te maken. Echte hoogbouw is dus een frustrerende en oneconomische aangelegenheid. Hoogbouw is dan ook een status symbool voor mensen die er geld voor over hebben om juist op die plek een spectaculair en daardoor de aandachttrekkend project te bouwen. Was het eerst Amerika op het eiland Manhattan (New York; World Trade Center, Empire State Building) en de binnenstad van Chicago (Sears Building) waar de hoogste gebouwen stonden, later verschoof dit naar Maleisië, Kuala Lumpur (een tweede wereldstad; de Petronas Towers) toen naar Taipei, Taiwan (de 101 Tower) en vervolgens naar Dubai, de geldmagneet van Arabië waar nu de Burj Khalifa staat van 808 meter hoog. Met dus een eerste eigenfrequentie van (zie figuur) 40/808 is 0,05 Hz of te wel een trillingstijd van 20 seconden!



Natuurlijk is de stijfheid opvoeren door veel meer materiaal in de constructie te stoppen een beetje domme manier om een constructie die eigenlijk sterk en stijf genoeg is nog stijver te maken om een voelbare trilling weg te halen. Dat kan slimmer door de trilling zelf te bestrijden. Daarom moet er meer demping (= energie verloren laten gaan) in de constructie gebracht worden. Dit kan op twee manieren. De eerste manier is het inbouwen van rubber blokken of echte schokbrekers in de constructie. Deze elementen vertragen de beweging effectief maar moeten in grote hoeveelheden ingebouwd worden en zijn duur.
De tweede manier is het aanbrengen, hoog in het gebouw, van een grote massa, de zogenaamde mass tuned damper (MTD) in het Engels.

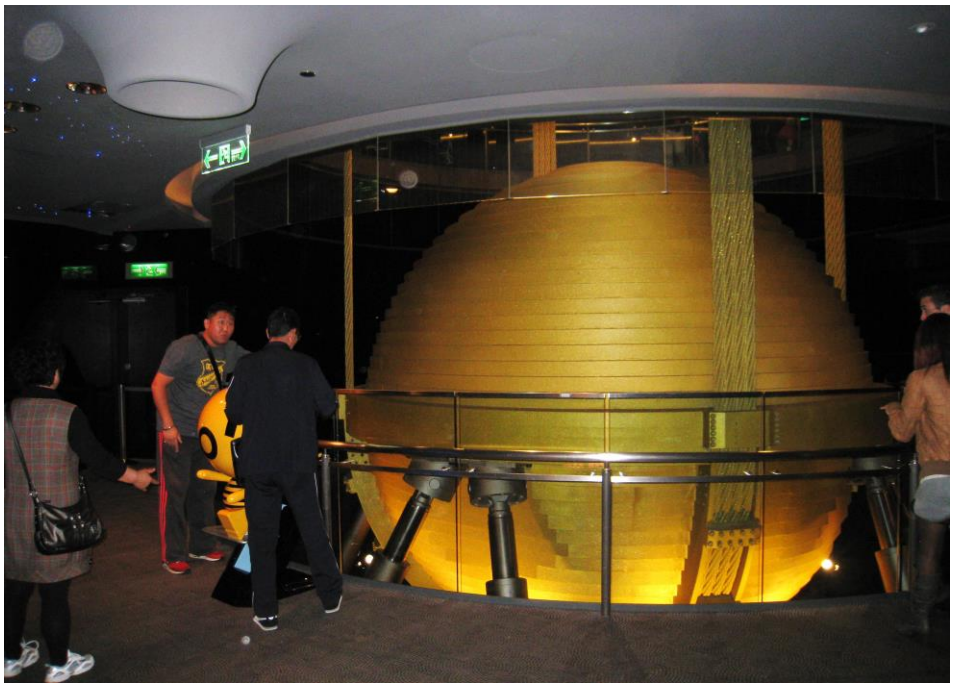


In het bovenstaande figuur is de werking van de massa boven in het gebouw toegelicht. Zonder massa of gewicht in het bakje zal het torentje na aanstoten in zijn eigenfrequentie blijven bewegen. Steeds weer zullen de terugveer krachten v, die door vervorming worden opgeroepen de toren terug naar zijn oorspronkelijke plaats terugduwen. Daarbij schiet het torentje door zijn evenwichtspositie in het midden heen, buigt weer door naar de andere zijde, komt tot stilstand en wordt weer door de terugveerkrachten v terug geduwd en zo gaat het maar door.
Voegen we nu een massa (gewicht) in het bakje toe en zorgen we ervoor dat de massa makkelijk kan verschuiven in het bakje (lage wrijving) dan gebeurt er het volgende na een windstoot. De toren moet doorbuigen onder invloed van de windstoot maar het gewicht verschuift in de bak naar de zijkant. Als de terugveerkrachten de toren terug willen duwen zorgt het excentrisch geplaatste gewicht G ervoor dat hij de toren eigenlijk verder wil laten buigen. De (terug-)veerkrachten worden eigenlijk tegen gewerkt. Deze tegenwerking zorgt ervoor dat de beweging snel uitdempt.
Bij diverse hoogbouwen in de wereld zijn dergelijke mass tuned dampers ingebouwd onder andere in de Taipeh 101, het één na hoogste gebouw ter wereld. Hier hangt een massief stalen bol (goud geverfd!) met een diameter van circa 4 meter aan een lange kabel als een gigantisch gewicht, circa 300.000 kg!, te slingeren en compenseert op dezelfde wijze als het glijdende gewicht de bewegingen van het gebouw.

In de Burj Khalifa zijn de voorzieningen wel genomen maar is de massa niet aangebracht. Pas als er klachten komen zal de MTD daar geïnstalleerd worden want vergeet niet; het is een behoorlijk gewicht dat aangebracht moet worden, 2- 4% van het gewicht van het bewegende deel van het gebouw. Maar ook de computer gestuurde controle over de bewegingen van het gewicht vereist een grote investering.



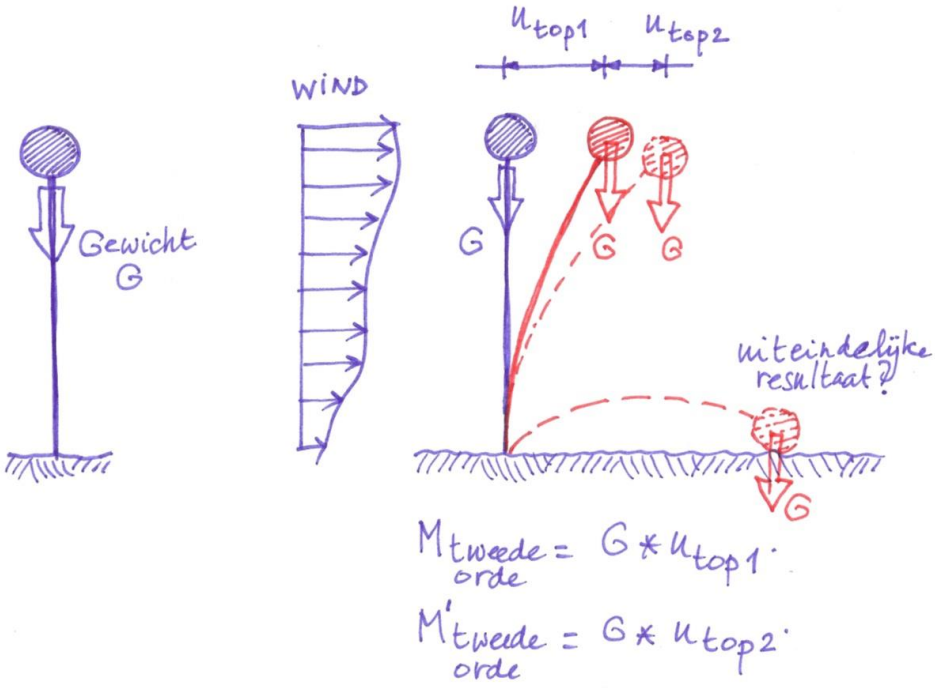
De een na hoogste wolkenkrabber op aarde de Taipei 101, met de antenne erbij 501 meter hoog; bovenin een mass tuned damper in de vorm van een slingerend gewicht.



De gouden slinger-bol van de mass tuned damper van de Taipei 101.

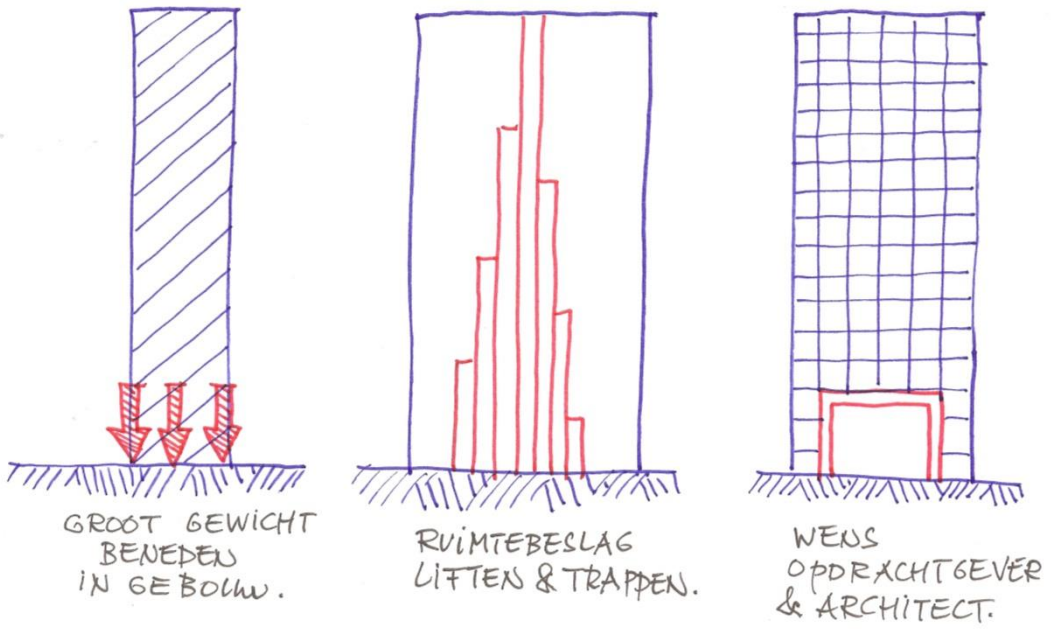
6.6 Het tweede-orde effect

Zoals eerder vermeld, komt stabiliteit neer op het afdoende weerstand kunnen bieden aan horizontale krachten. En zoals ook is geleerd alleen door te vervormen, door te buigen kan er weerstand tegen de belasting geboden worden. Dat betekent dat als een behoorlijke storm tegen een hoogbouw aanblaast het gebouwhorizontaal zal moeten doorbuigen. Maar door die uitbuiging komt het gebouw scheef te staan en zal daardoor de neiging vertonen verder om te vallen, kijk maar naar het figuur hieronder. Hierin wordt het tweede orde effect met behulp van een ingeklemde staaf met een gewicht aan de top gedemonstreerd.



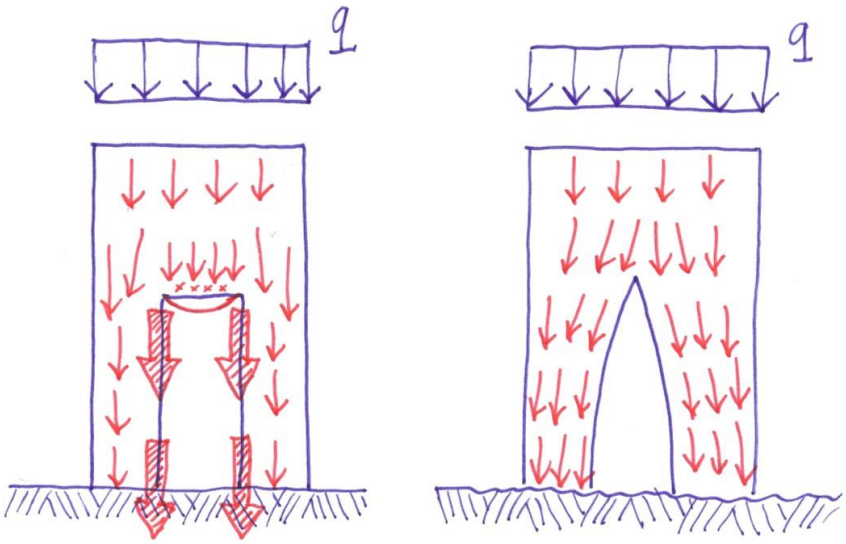
Dat ziet er vervelend uit. Door die steeds maar toenemende doorbuiging, iedere keer maar meer, zou je verwachten dat dit torentje uiteindelijk 'vanzelf' op de grond komt te liggen. Gelukkig is dit alleen maar zo bij een slap systeem dat meteen al een grote doorbuiging te zien zal geven. Anders geldt wat zo mooi de paradox van Zeno heet: waarom Achilles de schildpad nooit kan inhalen.
Dit verhaal gaat zo. Er was in het oude Griekenland een wedstrijd georganiseerd tussen de beroemde held en uitstekende atleet Achilles en een schildpad, een legendarisch langzaam dier. De reden voor die wedstrijd was dat de Griekse filosoof Zeno beweerde dat als een schildpad 50 meter voorsprong kreeg Achilles de schildpad nooit meer zou kunnen inhalen over een race over 100 meter. Want, zei Zeno, als Achilles begint te rennen als de schildpad bij het 50 meter punt is aangekomen dan duurt het even voordat Achilles bij dat 50 meter punt aankomt; in de tussentijd is de schildpad alweer verder gelopen en moet Achilles dus weer verder om de door de schildpad afgelegde afstand in te halen. Daar aangekomen ziet hij dat de schildpad onderhand weer een stukje heeft afgelegd, etc., etc. De schildpad blijft Achilles dus altijd voor en zal als eerste de eindstreep passeren.
Logisch eigenlijk, alleen maken we één denkfout. De som van de oneindige reeks 1 + ½ + ¼ + 1/8 + 1/16 etc. etc. is geen oneindig groot getal maar een gewoon eindig getal. Achilles, en dat weten we allemaal natuurlijk ook, zal de schildpad na bijvoorbeeld 51,2 meter inhalen. Dat zelfde geldt ook voor het tweede-orde effect bij een afdoend stijve constructie. Al snel dempt de aangroeiing af tot een heel klein te verwaarlozen getal. Toch moet bij een hoogbouw met dit tweede orde effect serieus rekening gehouden worden. Bij hoge gebouwen kan dit effect resulteren in een 15-20% hoger buigend moment.

6.7 De zwaartekracht en het verticaal transport

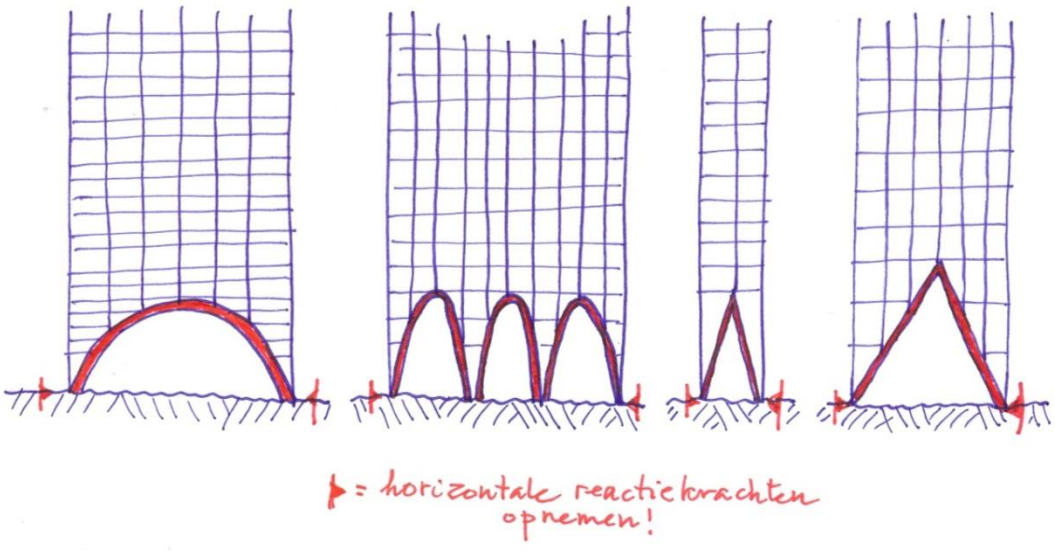


De zwaartekracht en het verticaal transport zijn twee vaak vergeten hoogbouwcriteria. In alle beschouwingen over stabiliteit zal iedereen het altijd over horizontale krachten hebben. Die zijn namelijk het meest kritisch voor een hoogbouw. Maar vergeet niet het effect van steeds meer op elkaar stapelen. Op de onderste lagen loopt de druk in de kolommen en wanden enorm op. Daar staat het hele gebouw en alles wat er inzit bovenop! En juist onderin een gebouw willen de opdrachtgevers en de architecten een grote ontvangsthal, een

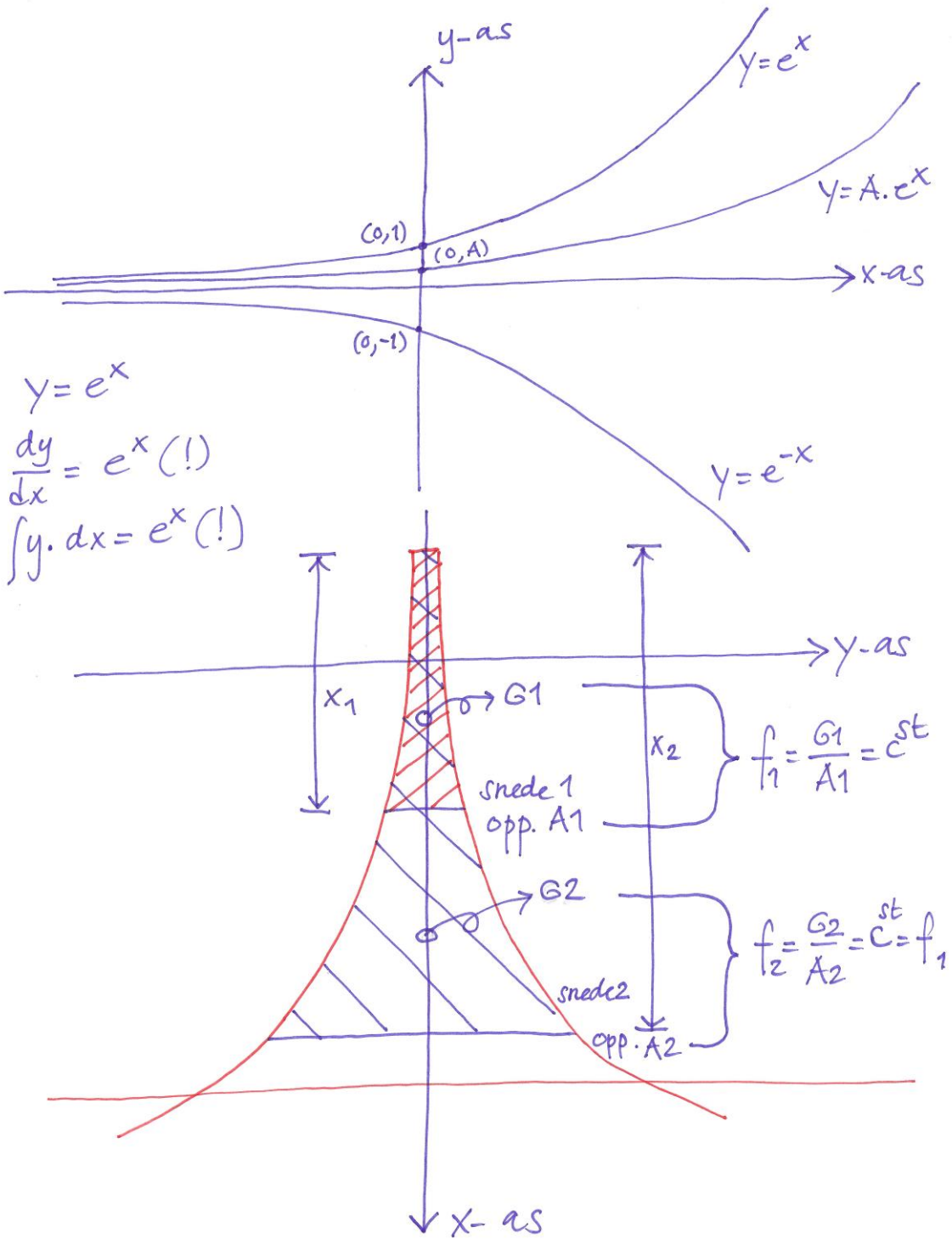
hotellobby of een grote openbaar toegankelijke ruimte. Dus of die vervelende kolommen niet boven de begane grondvloer kunnen stoppen.
Daarbij komt nog een ander typisch hoogbouw probleem: het verticaal transport van mensen of te wel liften en (nood)trappen. Al die mensen die ’s ochtends omhoog en ’s avonds omlaag willen op ongeveer dezelfde tijd. Dit betekent, als de wachttijd voor de lift niet te veel mag oplopen, grote hoeveelheden liften. Sinds de ramp van 9-11 geldt de keiharde eis: wat er ook gebeurt, het noodtrappenhuis moet altijd, en brandveilig!, blijven staan. Met al die mensen in het gebouw betekent dat weer een behoorlijk groot geval. Die liften en noodtrappenhuizen moeten naar de begane grondvloer en nemen dus ook een groot deel van de plattegrond in beslag.
Al deze eisen betekenen een grote aanslag op de constructie. Door het hele grote gewicht, de resulterende kolomlasten kan een kolom niet meer met een balk worden opgevangen. Hiervoor moet naar een vloeiender verloop gezocht worden. De oplossing ligt weer in het vlak van de boogwerking.



Interessant is om te zien dat onze gotische bouwmeesters intuïtief de juiste oplossing voor de steeds groter wordende ramen in de steeds hoger wordende kathedralen hebben gevonden. Ook hier moeten de zware daklasten om de ramen (openingen) geleid worden en met een spitsboog gebeurd dat (bijna) vanzelf.



Dezelfde tactiek (boogvormige overdracht) moeten we toepassen om ons grote gewicht-probleem en de wens naar grote open ruimtes onderin de hoogbouw te combineren.

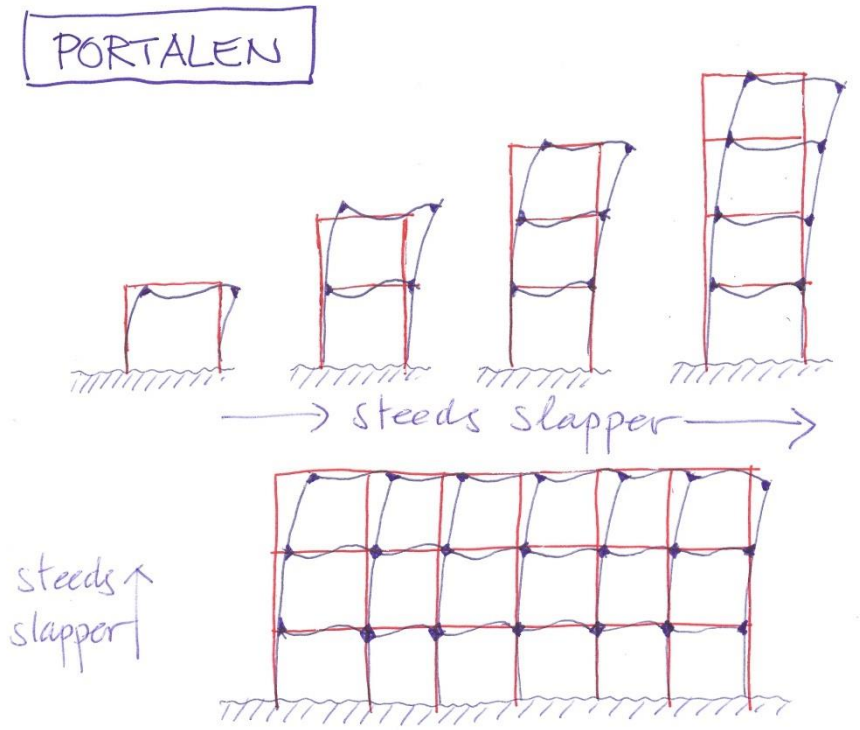


Ruimte kunnen we dus creëren maar hoe zit het met die heel hoog oplopende drukkrachten? Hoge sterkte beton en staal kunnen enorme drukspanningen en dus ook drukkrachten opnemen. Maatgevend is altijd het knikgevaar en dus de kniklengte. Dat betekent dat er plompe, niet slanke kolommen nodig zullen zijn onderin een hoogbouw.
Een interessante mogelijkheid biedt het uit laten lopen van het gebouw naar beneden toe. Denk daarbij aan een boom die naar beneden toegaand een steeds dikkere stam te zien zal

geven en ook bij de grond waar de wortels beginnen versneld breder wordt maar kijk ook eens goed naar de Eiffeltoren die dezelfde taps uitlopende vorm te zien geeft. Het (wiskundige) geheim hierachter is de e-macht of te wel het getal e^x (zie ook hoofdstuk 4 bij het onderdeel kabels en kettingen). Van deze functie e^x weten wij dat zowel de geïntegreerde als de gedifferentieerde functie de zelfde waarde is e^x! Dat betekent dat de toename in de hoogte gelijkmatig stijgend is, eigenlijk eenparig versneld. Dat betekent weer dat als ik op hoogte x een doorsnede maak en het oppervalk daar deel door het gewicht er bovenop ik een spanning y krijg. Neem ik een doorsnede op een geheel andere hoogte x_2 en deel ik weer het oppervalk van de doorsnede door het gewicht wat bovenop hoogte x_2 staat dat ik dan dezelfde spanning y vindt!!! Dus als ik bij de Eiffeltoren op 10 meter van de top de spanning in de doorsnede daar uitreken, vind ik dezelfde spanning als ik een doorsnede 1 meter boven de grond neem.
Daar kunnen we in het ontwerp van onze hoogbouw rekening mee houden door de vorm af te stemmen op de e-macht (e^x) en let maar eens op de vorm van het nu hoogste gebouw van de wereld, de Burj Khalifa.

6.8 Overzicht Hoogbouw Strategieën

Hoogbouw strategie 1: Portalen
Dit is de strategie waar je niet hoog mee komt. Boven de dertig meter gebouwhoogte wordt het vrijwel onmogelijk om de knopen zo stijf uit te voeren dat de weerstand tegen vervorming die moet ontstaan, afdoende is om het gebouw stijf genoeg te maken voor een zware storm of aardbeving. Beter is het om vakwerken of volle wanden te maken die voor de stabiliteit zorgen. Soms loont het toch de moeite om alleen een skelet van balken en kolommen (met buigvaste verbindingen) te gebruiken om de stabiliteit van lage gebouwen te verzorgen. Belemmeringen in het gebruik voor de functie van het gebouw door vakwerkkruizen of volle wanden zijn dan immers niet aanwezig.

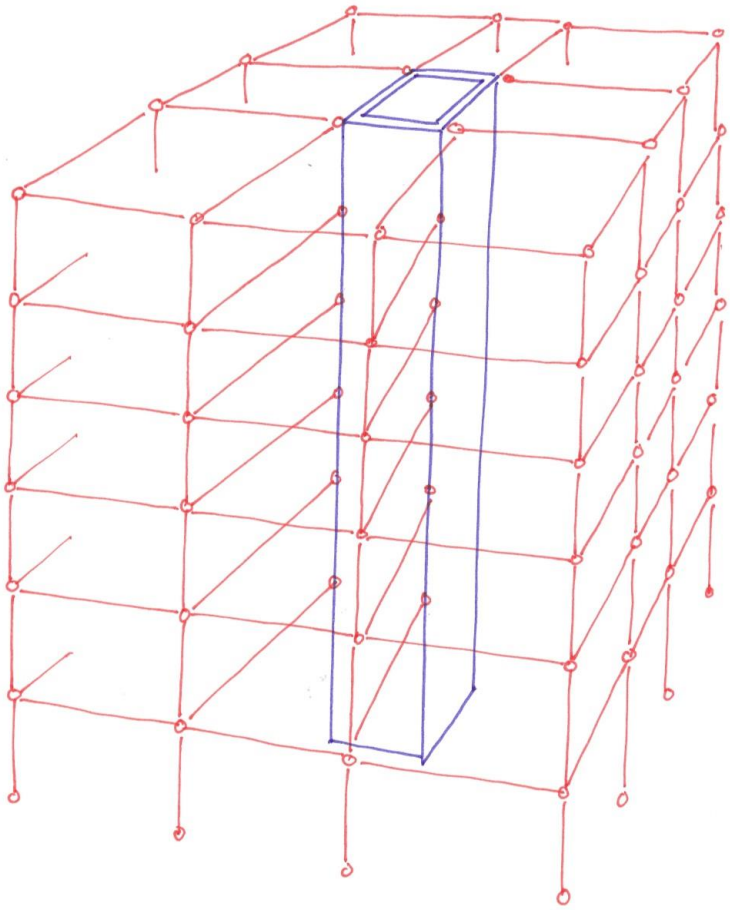


Besef wel dat het feit dat de knopen buigstijf moeten zijn zware eisen aan die knopen stelt. Er zal veel materiaal nodig zijn en ook is er veel arbeid, dus kosten nodig om de knoop goed

in elkaar te zetten. De stijve knopen zorgen er wel voor dat niet alleen de buigstijfheid van de kolommen gebruikt wordt maar ook de buiging in de balken wordt gemobiliseerd, let maar op de vervormingsdiagrammen hierboven getekend. Ook de balken buigen door de horizontale belasting ten gevolge van bijvoorbeeld de wind en daardoor leveren ze ook een bijdrage aan de weerstand van het portalen frame in zijn geheel. Het zwakke punt blijven de stijve knopen. Boven 5 tot 6 bouwlagen moeten ze zo sterk worden uitgevoerd dat ze te aanwezig, te groot worden en ook veel bouwkosten betekenen. In Nederland wordt dit systeem om een gebouw te stabiliseren dan ook alleen in lage en brede woon- of kantoorgebouwen gebruikt. Boven de dertig meter eigenlijk niet meer realistisch.

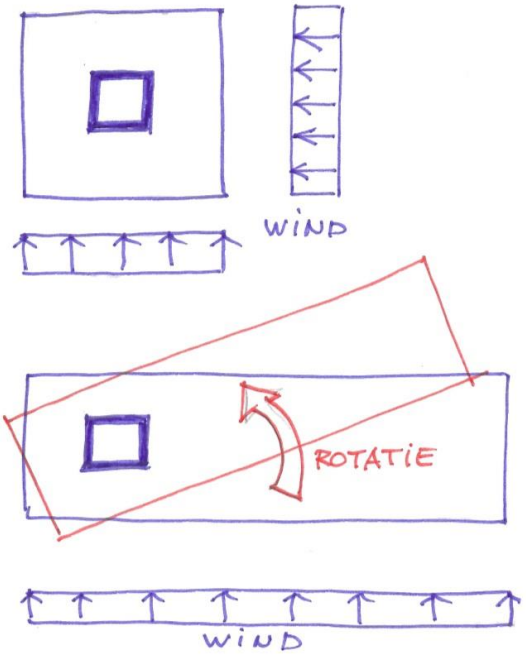
Hoogbouwstrategie 2: Kern

Dit is de manier waarmee vrijwel alle gebouwen in de wereld van 30 tot 200 meter hoogte mee stabiel gemaakt worden. Want in ieder gebouw moeten liften, trappen en leiding-schachten voor de kabels, leidingen en luchtkanalen worden gebruikt. Ook is hier geen daglicht of uitzicht vereist zodat plaatsing binnenin een gebouw slim en gebruikelijk is. Omdat er volle wanden rond de liften, de trappen en schachten nodig zijn voor geluids-isolatie en, vooral brandwering, ontstaat vanzelf de stevige schacht in het midden die de stabiliteit verzorgd. De wanden kunnen uit beton gestort worden of als stalen vakwerken uit kruizen, balken en kolommen samengesteld worden. Altijd is er aandacht nodig voor de openingen zoals deuren en noodzakelijke toegangen. De gaten in de wanden verzwakken de hoofddraagstructuur.

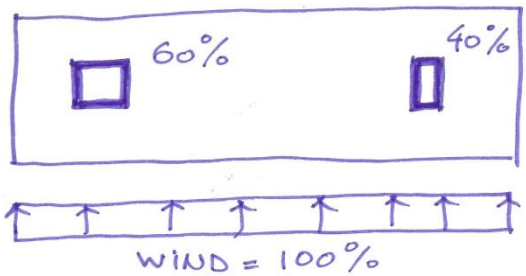


De hoofddraagstructuur van een door een kern gestabiliseerd gebouw bestaat uit twee gedeeltes. Ten eerste de kern zelf die als een stevige in de fundering (verend) ingeklemde staaf het gebouw overeind houdt. Ten tweede het zogenaamde kaartenhuis van balken,

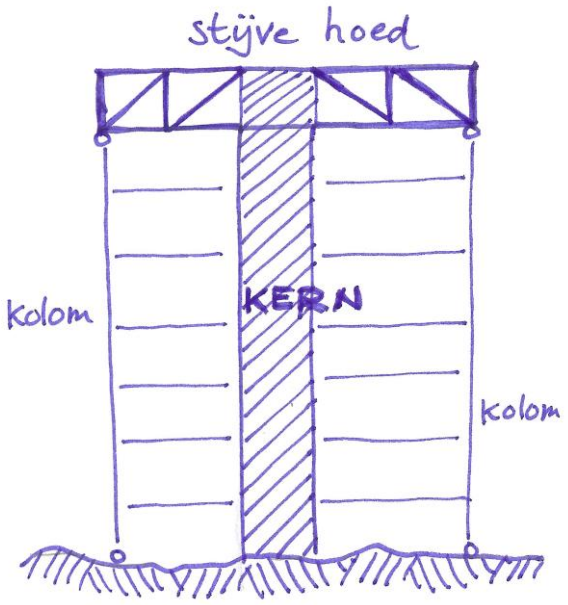
vloeren en kolommen daarom heen die, inderdaad als een kaartenhuis zouden omvallen als de kern er niet was. Voordeel van een kaartenhuis is wel dat er geen constructieve aandacht aan de ontmoeting balk - kolom gegeven hoeft te worden. Een stijve hoek is niet nodig en dat maakt de uitvoering eenvoudiger en goedkoper. Het kunnen eigenlijk allemaal scharnieren zijn. Tot 200 meter is er prima met dit kernprincipe te werken.
Houdt wel in de gaten dat een gezonde breedte - hoogte verhouding ongeveer 1 op 7 is. Dat betekent dat een kern met een breedte van 10 meter een 70 meter hoog gebouw goed moet kunnen dragen qua horizontale krachten zoals de windbelasting. Met wapening en voorspanning is nog wat slanker dan 1 op 7 mogelijk en ook veel gebouwgewicht op de kern laten dragen, werkt gunstig. Het op de kern rustende gebouwgewicht zorgt immers voor een constante drukspanning in de wanden van de kern en die drukspanning moet eerst door trekspanningen opgeroepen door buiging ten gevolge van de windbelasting 'opgegeten' worden voordat er trekspanning in de wanden van de kern ontstaat waar weer veel wapening voor nodig is. Als alle positieve invloeden worden gemobiliseerd is 1 op 10 de grens van het mogelijke. Een gebouw van 200 meter hoog heeft dan een kern met een breedte van minimaal 20 meter nodig.



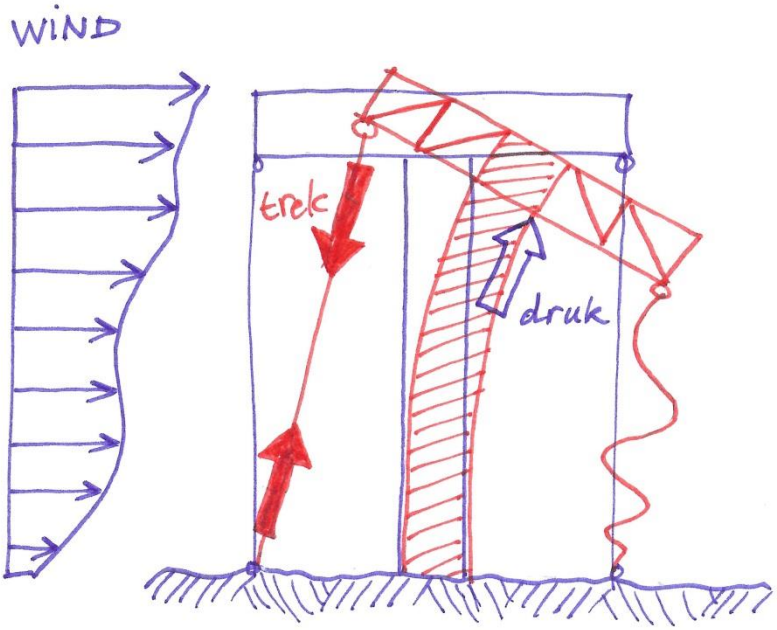
Een vierkant gebouw heeft aan één kern genoeg, het liefst zo centraal mogelijk geplaatst. Een, in plattegrond langwerpig gebouw kan meerdere kernen hebben, dit vooral om rotatie ten gevolge van de windbelasting te vermijden. Ook hoeft niet één kern alle windbelasting te dragen maar wordt dit, afhankelijk van de stijfheidverhoudingen van de kernen, netjes verdeeld over alle kernen.



Hoogbouwstrategie 3: de Outrigger

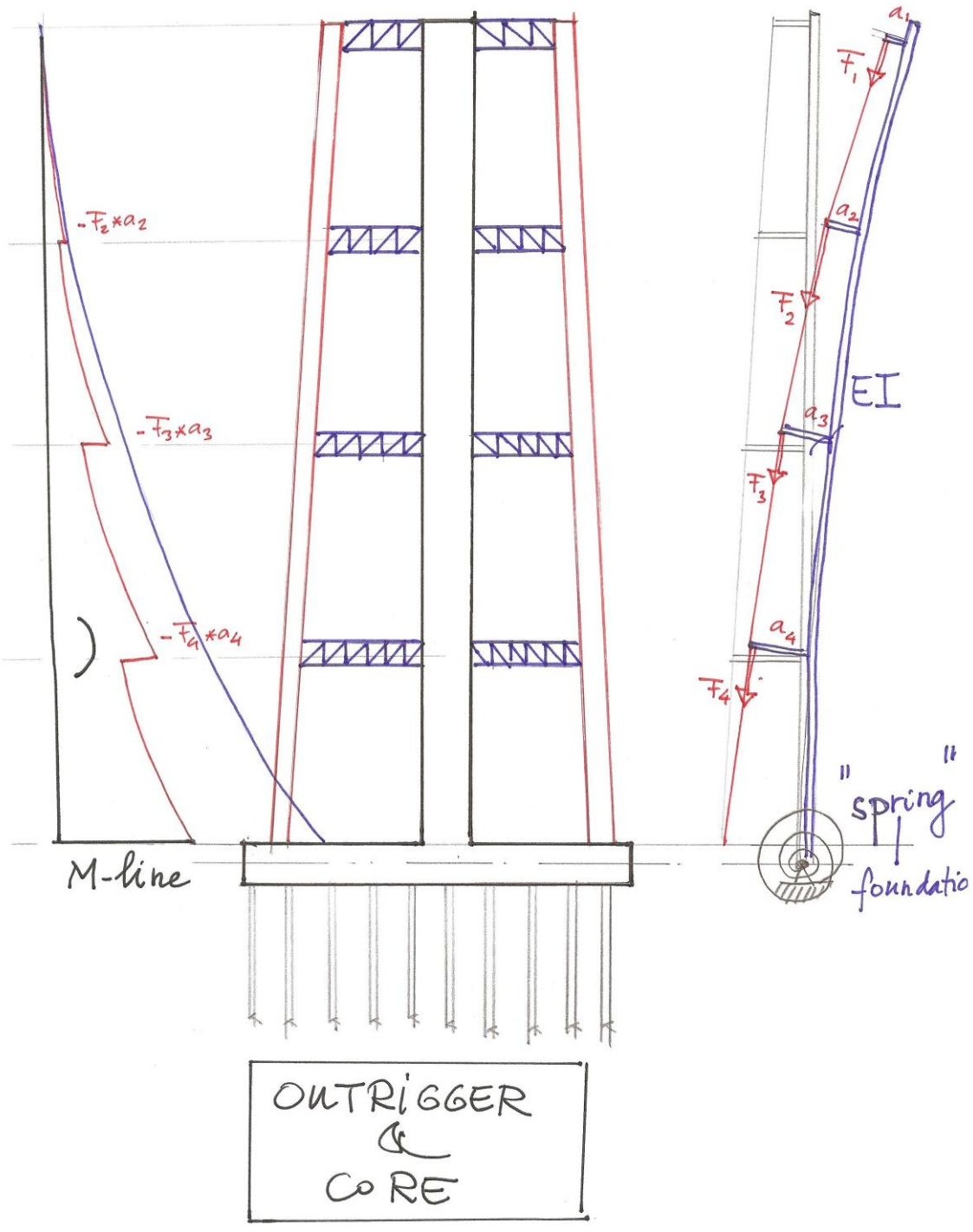


Boven de 200 meter wordt het heel moeilijk om met alleen een kern een gebouw stabiel te maken. Daarom moeten we als we met een kern hoger willen bouwen een 'truc' uithalen. We moeten het outrigger systeem te hulp roepen. Hierbij zetten we een stijve hoed op de kern en maken de gevelkolommen goed hieraan vast.



Wil het gebouw nu in een zware storm uitbuigen dan zorgt de stijve hoed ervoor dat aan één kant de gevelkolommen onder trek komen te staan en daardoor als het ware de kern gaan terug trekken (of helpen) de windbelasting op te nemen. Je zou ook kunnen zeggen dat de hefboomsarm van de kern (beschouw de kern als een uitkragende balk / kolom) van de kernbreedte naar de gebouwbreedte vergroot wordt. Dus in plaats van 7 keer de breedte van de kern kunnen we nu tot 7 keer de breedte van het gebouw hoog gaan! Zoals aan alles zit hier ook een prijs aan vast en dat zijn de extra kosten voor de stijve hoed boven op het gebouw en het versterken van de kolommen ten einde ze in staat te stellen de trekkrachten bij de outrigger werking op te nemen.

Tot slot een belangrijke opmerking. De meest efficiënte plek voor de stijve hoed van een outrigger systeem is bovenop het gebouw maar ook op lagere niveaus kan dit systeem werken. Vaak wordt een installatie verdieping gebruikt om een outrigger systeem in onder te brengen. Daar zullen de diagonalen van het vakwerk van de stijve hoed minder hinder geven dan op een gewone verdieping. In een hoogbouw is het gebruikelijk om de 20 verdiepingen een installatie verdieping aan te brengen. Zodat je meestal ziet dat ook om de 20 verdiepingen een outrigger systeem wordt ingebouwd.



Constructie-schema van de in aanbouw zijnde 630 meter hoge Shanghai Tower.

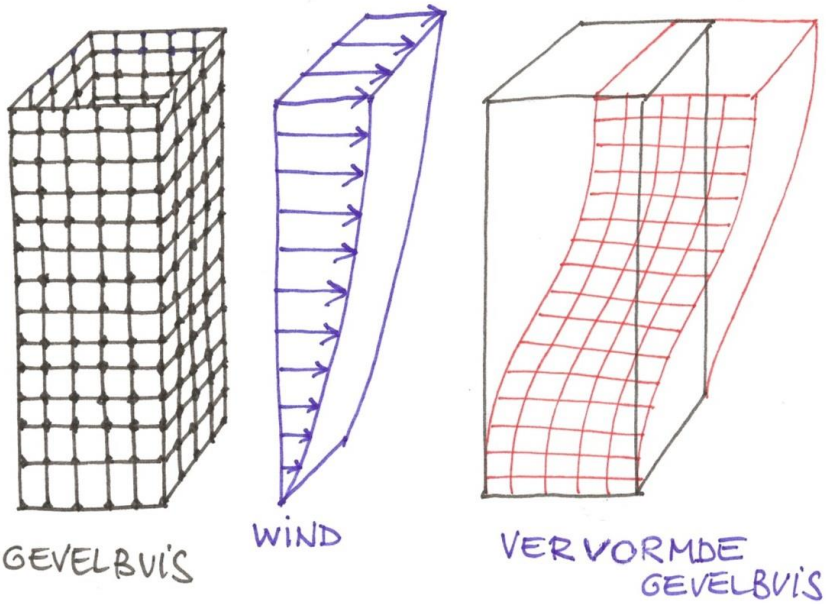


Het Pudong district, het Manhattan van Shanghai, met drie hoge torens; vanaf links: de nu in aanbouw zijnde Shanghai Tower (630 meter), de Jin Mao toren (420 meter) en het Shanghai Financial Centre (470 meter).

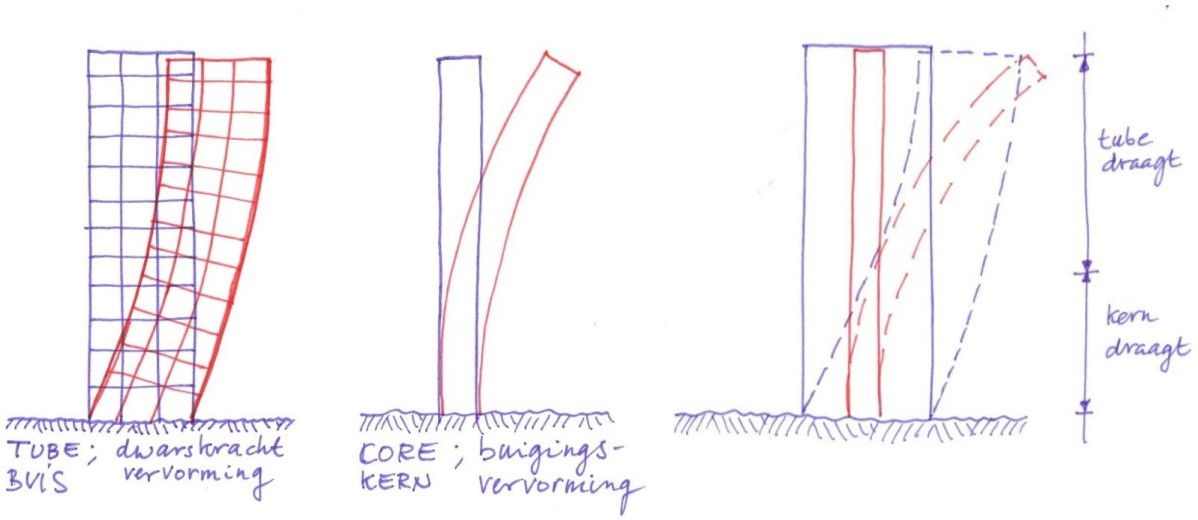
Hoogbouwstrategie 4: de Buis

Bij de hoogbouwstrategie 'de Buis' wordt eigenlijk de kern tot het hele gebouw gepromoveerd. De wanden van de kern vallen samen met de gevels van het gebouw. Het gebouw is kern geworden en de kern is gebouw geworden. De stijfheid van de Buis komt uit de Vierendeelwerking van de balken en kolommen in het vlak van de gevel. Dat betekent dat alle verbindingen tussen de balken en kolommen momentvast of buigstijf moeten zijn. Dwarskrachtvervorming is dus net als bij de Vierendeel-ligger van groter belang dan buigingsvervorming.

Hierna een plaatje van de werking van het gevelbuis principe. Het blijft een relatief slap systeem met een grote kosten component in de buigstijve hoekaansluitingen (= veel arbeid!). Voordeel van een buis, een drie dimensionaal werkende constructie, is dat er altijd minimaal twee vlakken worden aangesproken om de windbelasting te verwerken. Ook is verdraaiing of torsie van de buis vrijwel onmogelijk.



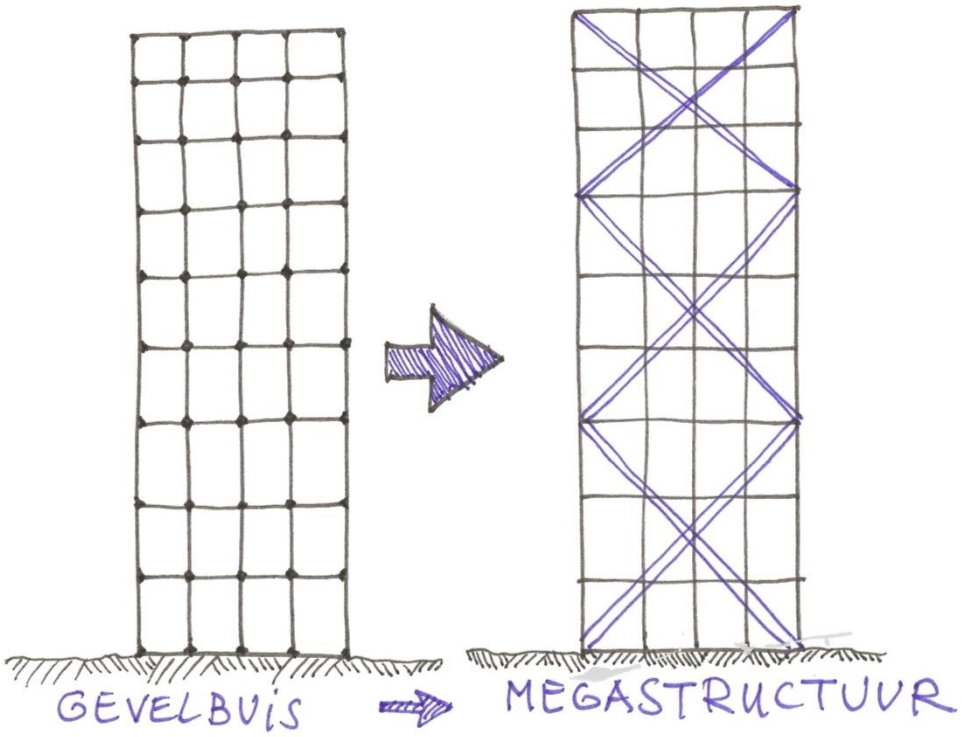
Een bijzonder omstandigheid treedt op wanneer we in de gevelbuisconstructie nog een buigsterke kern aanbrengen. Dit zal bij de meeste gebouwen normaal zijn aangezien er altijd liften, noodtrappen en verticaal transport-kanalen aanwezig zullen zijn in een gebouw. Die weer in een brandveilige kern (meestal van beton dus) ondergebracht moeten worden. De buigsterke kern gaat dan samenwerken of concurreren met de buigslappe gevelbuis. Dit levert een aardige mix op die veelal ook materiaal-economisch is. De te slappe gevelbuis wordt goed geholpen door de buigstijve kern. Er ontstaat echter wel een bijzonder samenspel tussen de kern en de gevelbuis waarbij het vervormingsgedrag maatgevend zal zijn.



Dat laat zich aardig zich in het vervormingspatroon, onderin parabolisch toenemend maar naar boven toe gaat de vervorming steeds rechtlijniger lopen. Dit maakt het lastig om een Kern (=buigingsligger) te combineren met een Buis. Immers onderin is de Buis stijver, bovenin de Kern. Door te variëren met de stijfheid (of afmetingen) kan je ze toch gaat laten samenwerken en elkaar versterken. Dit systeem wordt Tube in Tube of Buis in Buis genoemd.

Hoogbouwstrategie 5: de Megastructuur

Als we nog hoger willen bouwen zullen het gevelbuisprincipe moeten versterken/ verstijven. Daartoe moeten we het zwakste onderdeel van de gevelbuis aanpakken en dat is de stijve hoekverbinding tussen de balken en kolommen van het Vierendeel krachtsoverdracht schema.
De meest effectieve verbetering is af te stappen van de rechthoekige opbouw met stijve hoeken en te streven naar een opbouw met driehoeken (diagonalen) die, zoals we inmiddels weten, zeer stijf is (een driehoek is eigenlijk onvervormbaar)



De stijfheid neemt enorm toe door de grote diagonalen van de driehoeken en met dit systeem, dat we een Megastructuur noemen, kunnen we behoorlijk hoog bouwen. Ook kan je in de architectuur de meestal enorme diagonalen een duidelijk verhaal laten vertellen, zo van zie je goed dat ik er ben om dit gebouw overeind te houden? Besef wel dat de diagonalen van boven naar beneden toe, steeds zwaarder belast worden door de zich accumulerende windbelasting. Onderin is die kracht het grootst en moet de diagonaal meestal gigantisch van afmeting zijn. Twee meter als doorsnede is geen uitzondering.



John Hancock Building in Chicago, 400 meter hoog, rond 1975, architect S.O.M.

Om ook aan de strenge eisen van brandwerendheid te voldoen kiest men meestal voor een hybride constructie. De kolommen worden gevormd door zware staalprofielen, veelal aaneengelast uit dikke stalen platen, ingestort in betonnen. Het staal neemt het grootste deel van de krachten direct op, het beton verzorgt de bescherming tegen brand maar voorkomt ook instabiliteitsverschijnselen zoals plooien en knikken van de stalen platen.

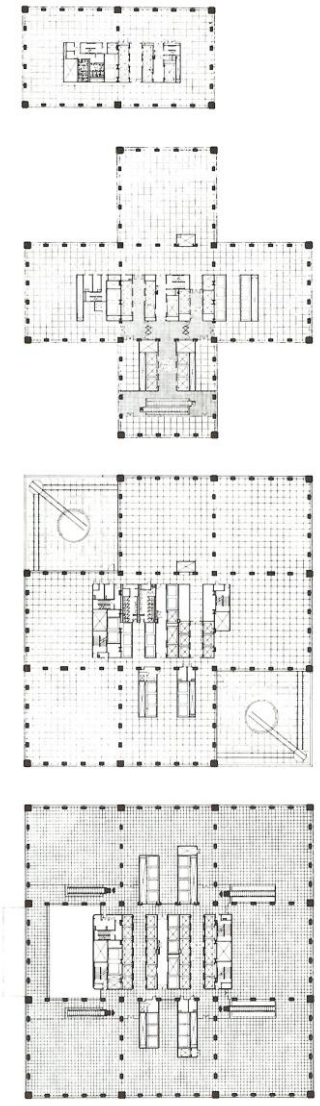


Bank of China te Hongkong, 350 meter hoog, rond 1990, architect I.M. Pei.

Hoogbouwstrategie 6: Hoe Hoog kunnen we bouwen?

Zoals je bij de Eiffeltoren vorm strategie met de e^x-grafiek heb kunnen zien, kun je onbeperkt hoog bouwen mits je aan die e^x-grafiek als opgelegde vorm houdt. Dus breed beginnen en steeds sneller steeds minder breed worden. Vrijwel alle echt hoge gebouwen hebben deze vorm, ook de huidige wereldkampioen de Burj Khalifa in Dubai (828 meter hoog). Daar is ook nog een ander slimmigheid toegepast, eigenlijk is de Burj Khalifa een aantal torens tegen elkaar aan geschoven. Ook de wereldkampioen van de vorige eeuw (tot 1992), de Sears Tower in Chicago (442 meter hoog) maakte van deze strategie gebruik.

Bij de Sears Tower (nu Willis Tower, naar de nieuwe eigenaar) werden negen torens tegen elkaar aangeschoven (en aan elkaar horizontaal vastgemaakt). Op 150 meter stopte toren 1 en 2 (aan de buitenkant), op 200 meter toren 3 en 4, op 250 meter toren 4 en 5, op 300 meter toren 5, 6 en 7 en toren 8 en 9 (centraal gelegen) gaan door tot de grootste hoogte. Met deze strategie slaan we twee constructieve vliegen in één klap. Iedere stoppende toren aan de buitenkant draagt zijn deel van de windbelasting, dat dus niet op de binnenin gelegen, doorgaande torens komt te staan. Daarnaast hebben we de gewenste taps toelopende vorm van de Eiffeltoren: de e^x grafiek.



Kenmerkende platte gronden; van onder tot boven: begane grond, 50ste, 67ste en 91ste verdieping

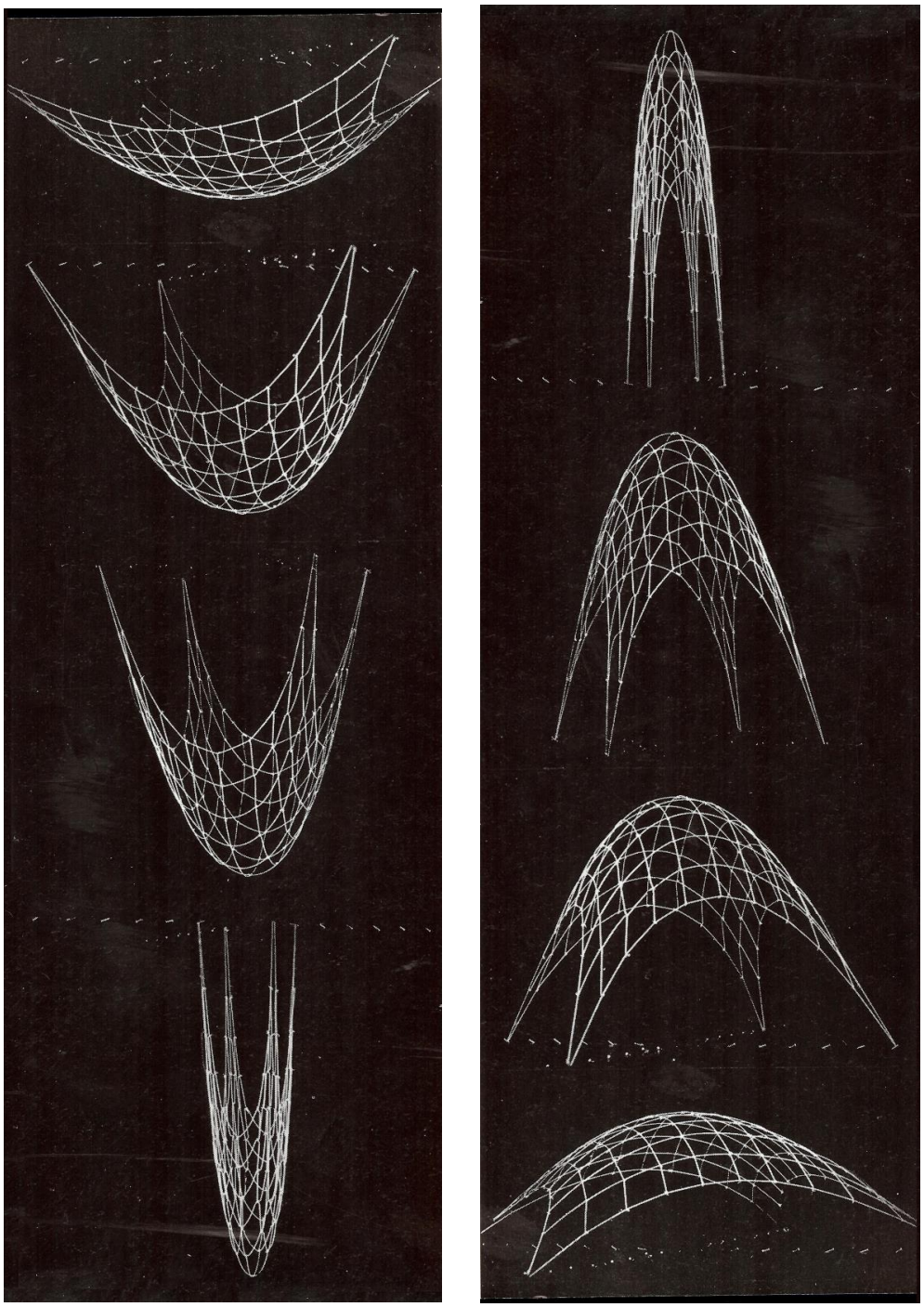
We kunnen dus in principe onbeperkt hoog bouwen mits we maar breed genoeg beginnen. Maar besef dat hoog bouwen een kostbare aangelegenheid is; hoe hoger je komt des te meer kraaninzet en bouwtijd, dus geld, is nodig. Ook praktische beperkingen zoals reeds eerder aangehaald: het aantal benodigde liften en noodtrappenhuizen plus het ruimtelijke beslag op de plattegrond van de constructie-elementen, denk aan kolommen van 2 bij 2 meter in een grit van 7 bij 7 meter op de begane grond, hebben een sterk negatieve invloed.



Sears of Willis Tower in Chicago, tot 1995 het hoogste gebouw ter wereld; 442 meter hoog. Op de voorgrond een, in Amerikaanse ogen, klein gebouwtje van 250 meter hoog.

7 Schalen

Schalen zijn bijzondere constructievormen, enkel gekromd (één richting vlak, daar loodrecht op gekromd) of dubbel gekromd (in twee onderling loodrechte richtingen gekromd). Door die kromming kunnen ze op druk belast als een 'boog' gaan werken of op trek belast als een 'kabel'. Weer geldt hier het 'omkeer'-principe: als we het op trek belaste kabelnet omkeren, ontstaat de ideale 'boog'-vorm. Dit geldt overigens alleen voor gelijkmatig verdeelde belasting, NIET voor puntvormige belastingen!



De zwaartekracht zorgt ervoor dat het kabelnet in de correcte schaal vorm gaat hangen.

Zoals te zien is in de afbeelding zijn *Schalen* familie van *Tenten*, net zoals *Bogen* familie zijn van *Kabels*. Eigenlijk de drie-dimensionele constructies (Schalen, Tenten) versus de twee-dimensionale constructies (Bogen, Kabels). Belangrijk verschil tussen Schalen en Tenten is dat Schalen uit een drukvast materiaal zoals beton, staal of hout vervaardigd worden en Tenten uit een materiaal dat vrijwel alleen trek kan opnemen: het membraan.

We onderkennen vijf hoofdtypes bij de Schalen:

- vouwschalen,
- enkel gekromde, translatie schalen,
- dubbel gekromde, translatie schalen,
- rotatie schalen en
- regelvlakken.

7.1 Vouwschalen

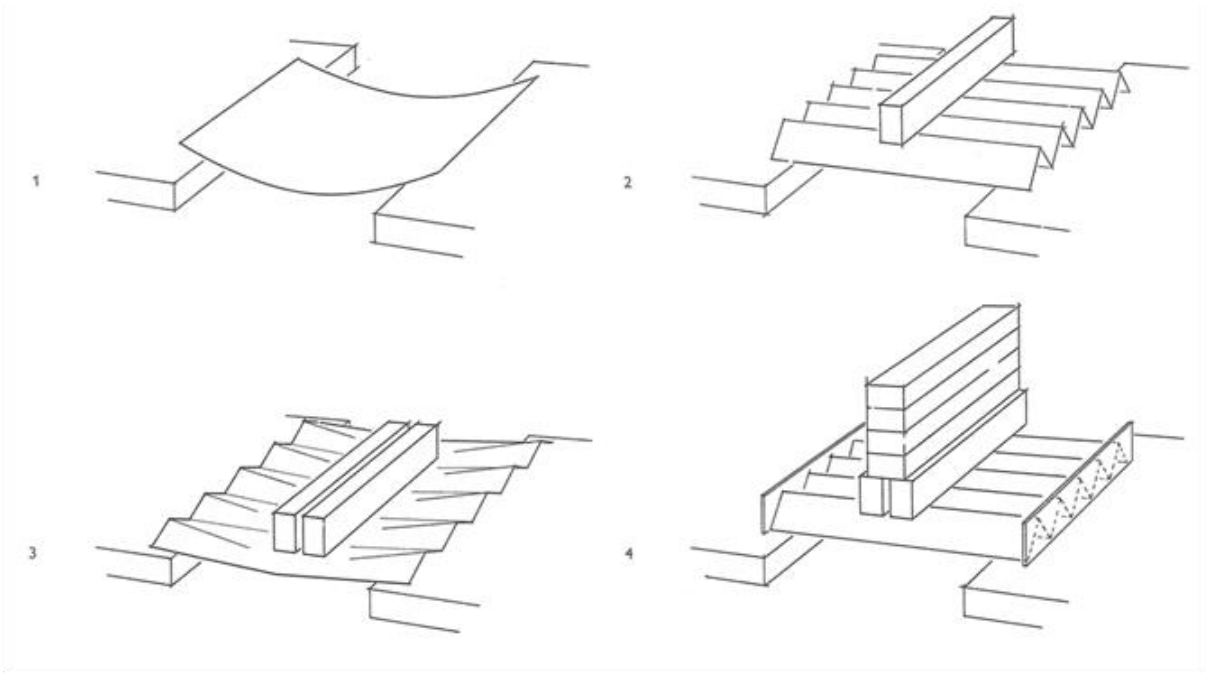
Vouwschalen zijn het enige type schaal dat niet gekromd is maar uit vlakke stukken materiaal bestaat. Vouwschalen zijn al eerder in de collegestof langsgekomen in de vorm van de gevouwen staalplaat. Het experiment met het gevouwen blaadje papier waarbij werd aangetoond dat door een plat stuk papier een paar keer te vouwen de totale stijfheid enorm toenam, kan ook op grote schaal worden toegepast door platen beton, staal of hout tegen elkaar aan te zetten en goed te verbinden.



Balkenstructuur van een vouwschaal; de balken worden op zogenaamde dubbele buiging belast: zowel loodrecht op de balk als in zijn vlak.

Laten we eens goed kijken naar de ruimtelijke werking van een gevouwen plaat. Hieronder is dit effect stapsgewijs afgebeeld. Stap 1 is een niet gevouwen plaat bijvoorbeeld een blaadje papier. Dit heeft ten gevolge van de zeer geringe dikte geen capaciteit om buiging op te nemen. Zelfs het eigen gewicht geeft al een enorme vervorming. Maar als ik, in Stap 2, hetzelfde blaadje papier een paar keer vouw dan stijgt het draagvermogen enorm en kan zonder problemen het gewicht van een blokje opgenomen worden.
Verhoog ik echter het erop rustende gewicht door er een tweede blokje op te leggen dan bezwijkt het gevouwen plaatje toch door lokaal uitknikken van de schuine balkstructuur. Eigenlijk gedraagt ieder vlak stuk zich als een balk en steunen ze horizontaal tegen elkaar aan om wegschuiven te vermijden. Hoe rechter op, hoe sterker de balk en dus de hele constructie is.

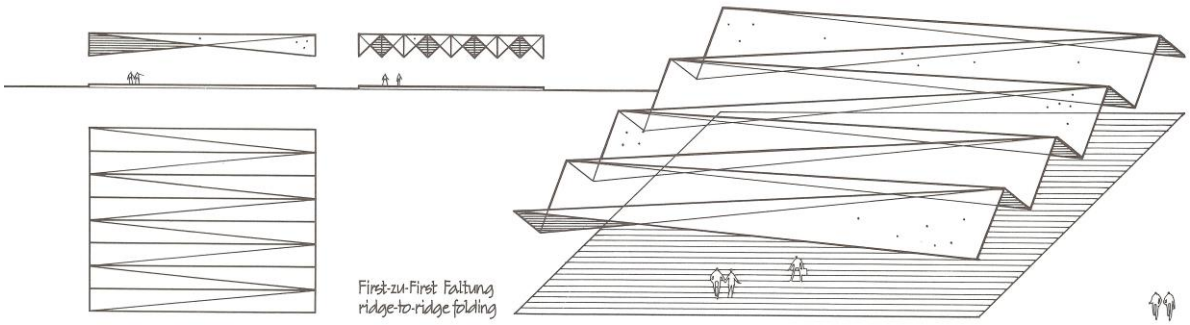
Nu komt er, voor de uitleg van de schaalwerking, iets bijzonder belangrijks. We voegen aan de gevouwen plaat een stijve rand toe; een zogenaamd kopschot. Opeens is het draagvermogen van de verder niet veranderde gevouwen plaat weer veel hoger geworden, zelfs een factor 4 à 5!!! Dit komt omdat uitknikken van de scheve balken niet meer kan optreden; de kopschotten 'bevriezen' de definitieve vorm en voorkomen daardoor bezwijken.



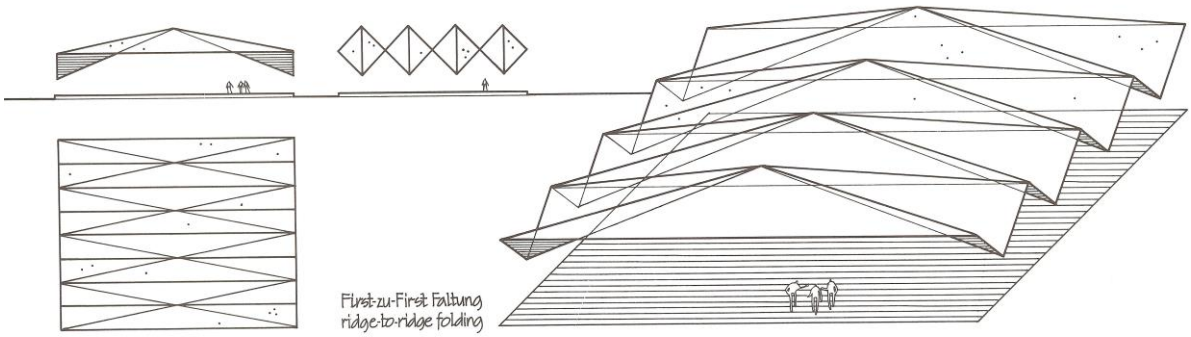
Visuele uitleg waarom een kopschot de buigstijfheid van een gevouwen blad papier (=schaal) enorm verhoogd.

<u>Belangrijke les: kopschotten verhogen het draagvermogen van een schaal enorm!</u>

Door verschillende vormen 'vlakken' te combineren kan een bijzonder vormgegeven dak of vloer ontstaan. De tekeningen hieronder geven een aantal goede voorbeelden .

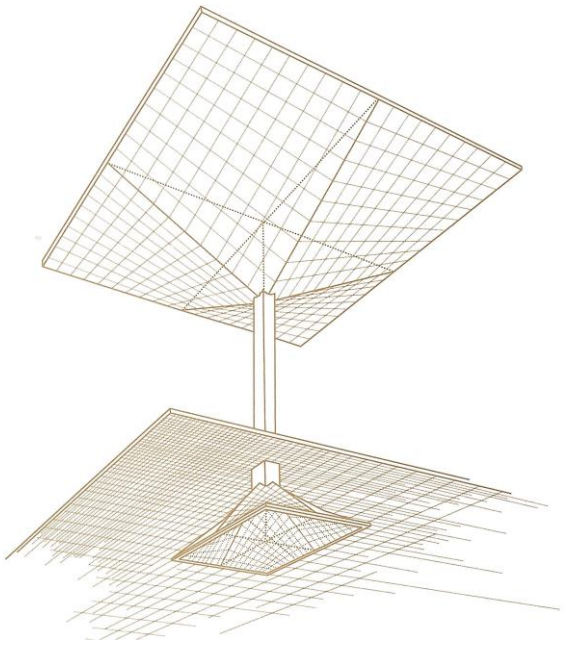


Rechte vouwschaal dakvorm.



Geknikte vouwschaal dakvorm.

Een bijzonder type vouwschaal is het omgekeerde piramide dak. Door genoeg hoge vouwen aan te brengen loopt niet alleen het regenwater snel weg maar is ook de stijfheid voldoende om met een dunne betonlaag, denk aan 50 tot 100 mm dikte, een groot piramide vlak van 7 bij 7 meter te overkappen rustend op één centrale kolom.
In zuidelijke landen zijn veel 'schaduw'-markten op deze wijze vervaardigd.



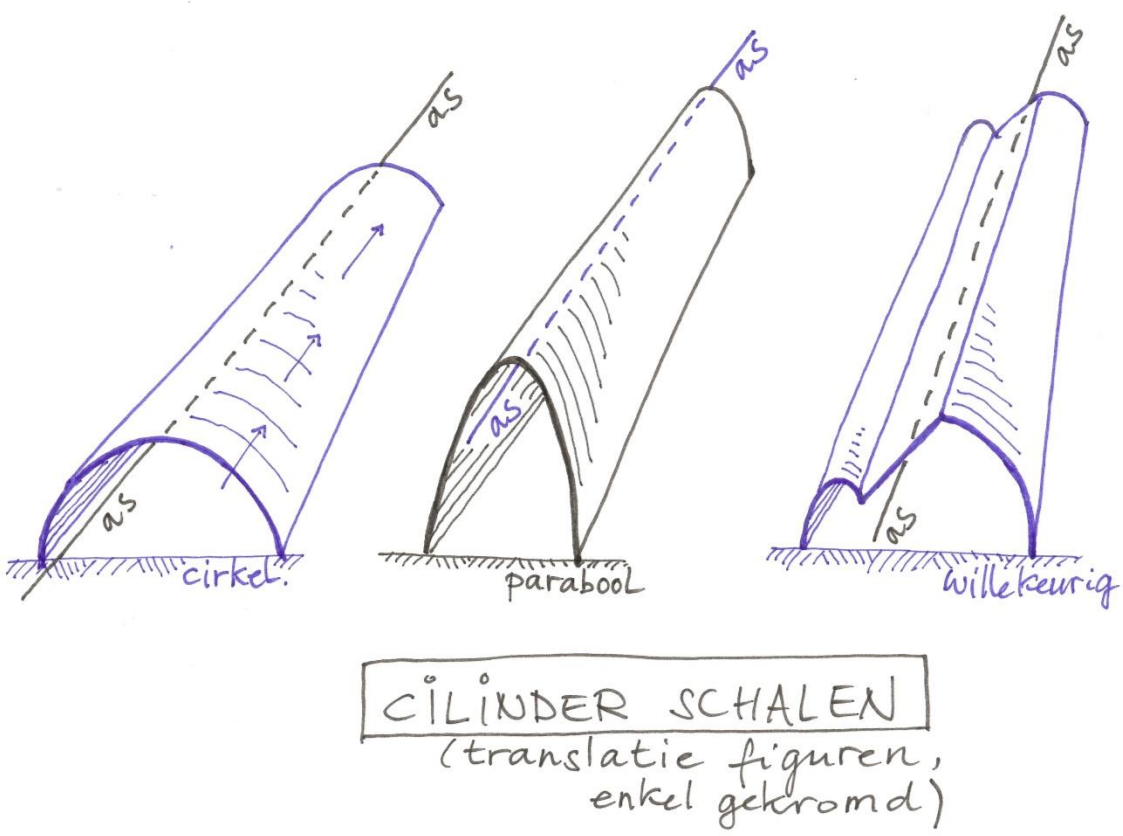
Omgekeerde piramide met ook piramidevormige fundering.



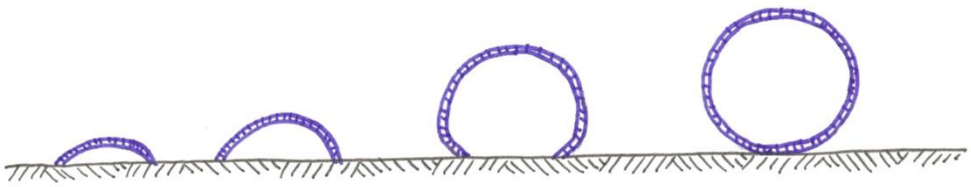
Piramide dak van de Anahuac Markt in Mexico City van Felix Candela rond 1956.

7.2 Enkel gekromde, translatieschalen

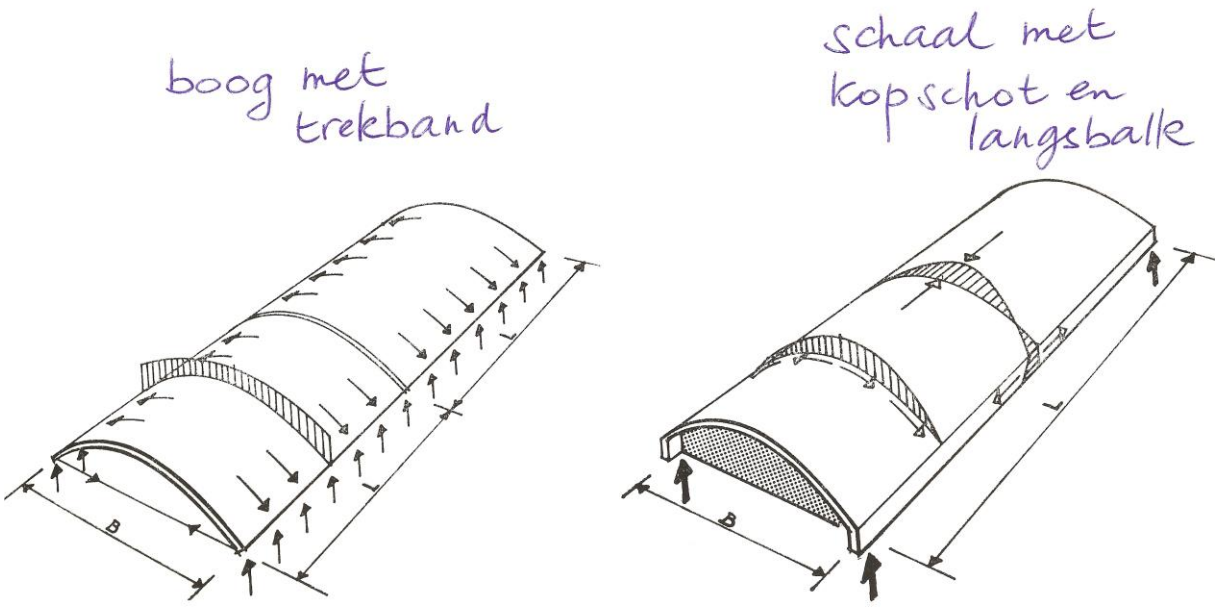
Dit type schaal ontstaat als we een gekromde lijn over een horizontale rechte as laten verschuiven. Er vormt zich dan een enkele gekromde schaal. We noemen dit verschijnsel een Translatie. De as waarover de andere lijn glijdt noemen we in de wiskunde de directrix, de lijn die over de directrix glijdt de generatrix. De kromme lijn kan een wiskundige kromme zijn zoals een cirkel, een parabool, een ellips etc. etc. maar eigenlijk voldoet iedere lijn. Er ontstaat dan een cilinder-schaal.



Ook kunnen we de gekozen figuur zo maken als we willen, bijvoorbeeld een deel van een cirkel, een halve cirkel, een driekwart cirkel of een volledige cirkel. Alhoewel de laatste twee figuren constructief niet zo slim zijn. Ze zakken, bij de gebruikelijke dunne wanden voor een schaal, al bij het minste geringste gewicht in elkaar.



De krachtswerking in cilinderschalen kunnen op twee, theoretisch verschillende, manieren verklaren. Ten eerste bij een gelijkmatig aan de randen ondersteunde cilinderschaal kunnen we ieder stukje boog (als plakje van de cilinderschaal) als een zelfstandige boog beschouwen. Dit betekent opname spatkrachten van de boogwerking in de ondersteunende muur of fundering waar de cilinderschaal op rust of een trekstang aanbrengen.
In de bogen/ cilinderschaal heerst alleen een drukspanning. Let ook op het zeer grote belang van de kopschotten bij dit type schaal! Daardoor kan de schaal zich zo sterk en stijf gedragen; anders was hij allang uitgeknikt of geplooid.

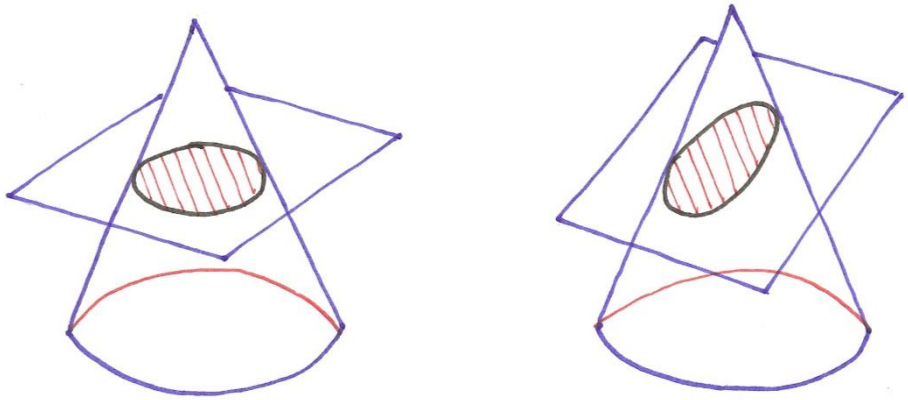


Boogschaal in twee constructief verschillende vormen, lees de tekst hieronder.

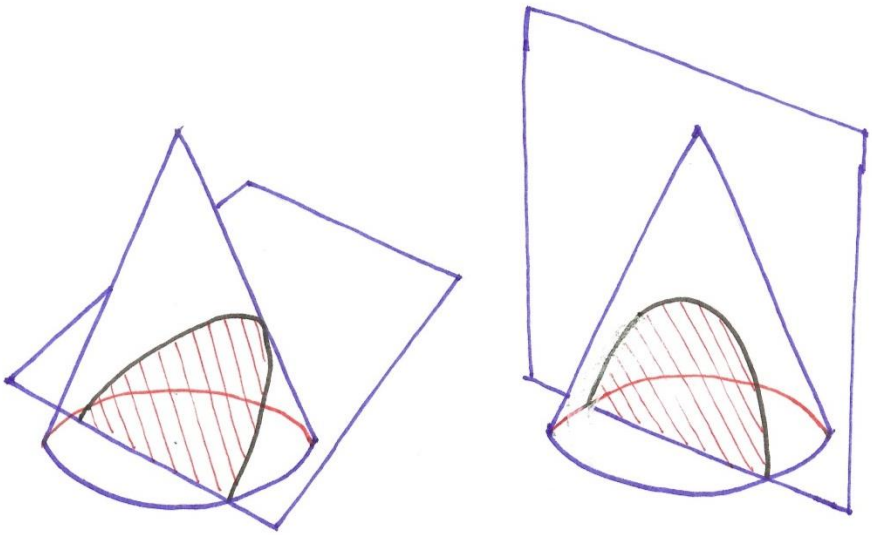
De tweede methode waarbij de cilinderschaal op kolommen aan de uiteinden staat, is als een grote ligger te zien die de boogkrachten als een grote, min of meer platte ligger, afvoeren. In het vlak van de cilinderschaal treedt dan, net als bij een echte ligger, een trek- en een drukzone op. De geconcentreerde trekzone kan het best door een balkachtig element langs de rand opgenomen worden.

7.3 Dubbel gekromde, translatieschalen

De volgende categorie is de dubbel gekromde schaal. Hierbij is de translatie-as niet meer een rechte lijn maar een gekromde lijn. Bijvoorbeeld een deel van een cirkel of een ellips, een parabool of een hyperbool, allemaal wiskundige figuren die ook bekend staan als kegelsneden.

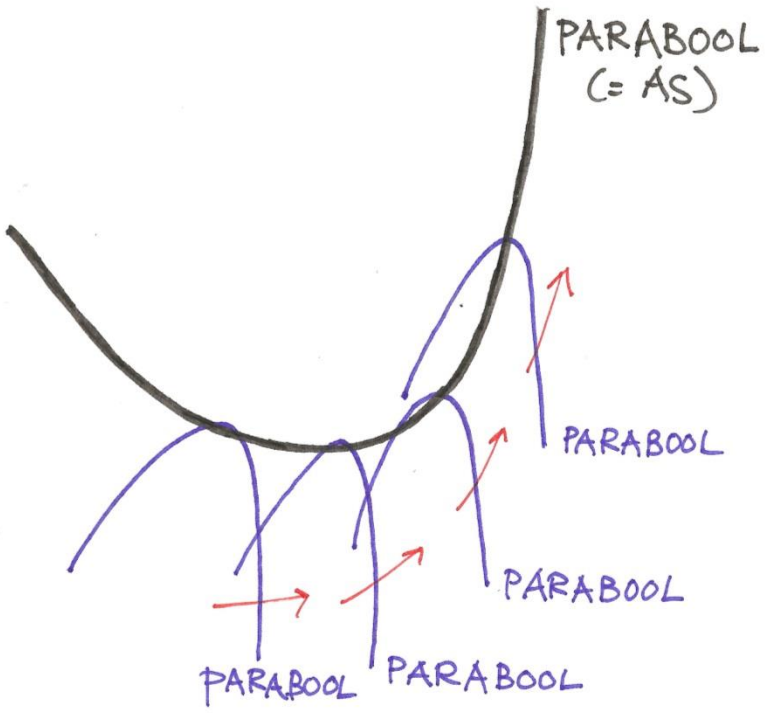


Kegelsneden; een cirkel *bij doorsnijden van de kegel met een vlak evenwijdig aan het grondvlak en een* ellips *bij het doorsnijden van de kegel met vlak onder een hoek met het grondvlak.*



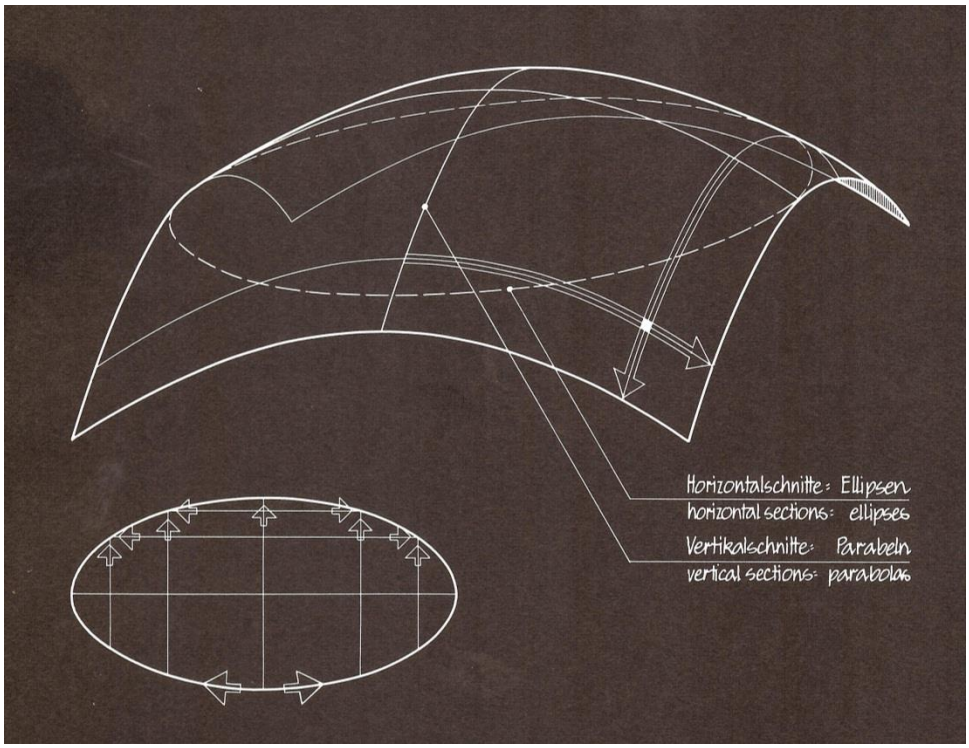
Kegelsneden; een parabool *bij doorsnijding van de kegel met een vlak in de kegel onder een hoek met het grondvlak en een* hyperbool *bij doorsnijding van de kegel met een vlak in de kegel loodrecht op het grondvlak.*

Aardig om te constateren is dat een cirkel eigenlijk een 'ideale' ellips is en een hyperbool de 'ideale' parabool. Er zijn zeer vele vormen van een ellips en er zijn vele vormen van een parabool.
Als we nu een gekromde lijn van het type parabool of hyperbool over elkaar laten schuiven ontstaan er een paar interessante schaalvormen.

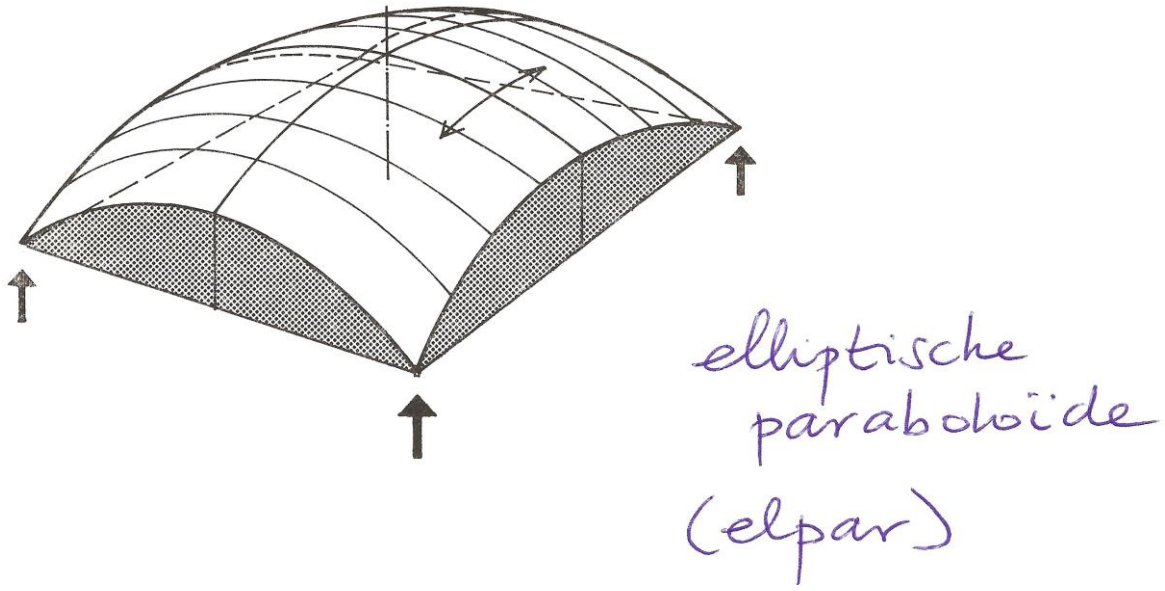


Translatie parabool over parabool, er ontstaat een elliptische paraboloïde (elpar).

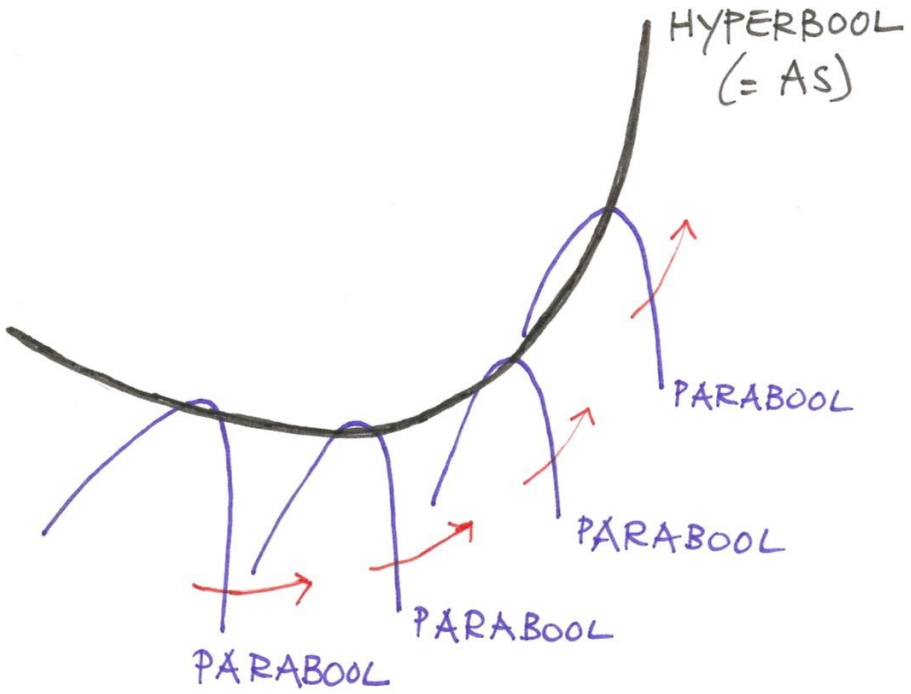
Als we een parabool over een parabool als as laten schuiven ontstaat een elliptische paraboloïde ook wel Elpar genaamd. De ellips is te zien als we een horizontale doorsnede van de schaal nemen. Wiskundigen noemen een elpar ook wel een parabolische paraboloïde. De paraboolbogen die in twee onderling loodrechte richtingen te zien zijn als we de elpar schaal loodrecht doorsnijden, werken in het echt ook als bogen (op druk belaste elementen). Let dus op de mogelijkheid de spatkrachten uit deze bogen in de ondersteunende constructie als muren of afgetuide kolommen op te nemen.



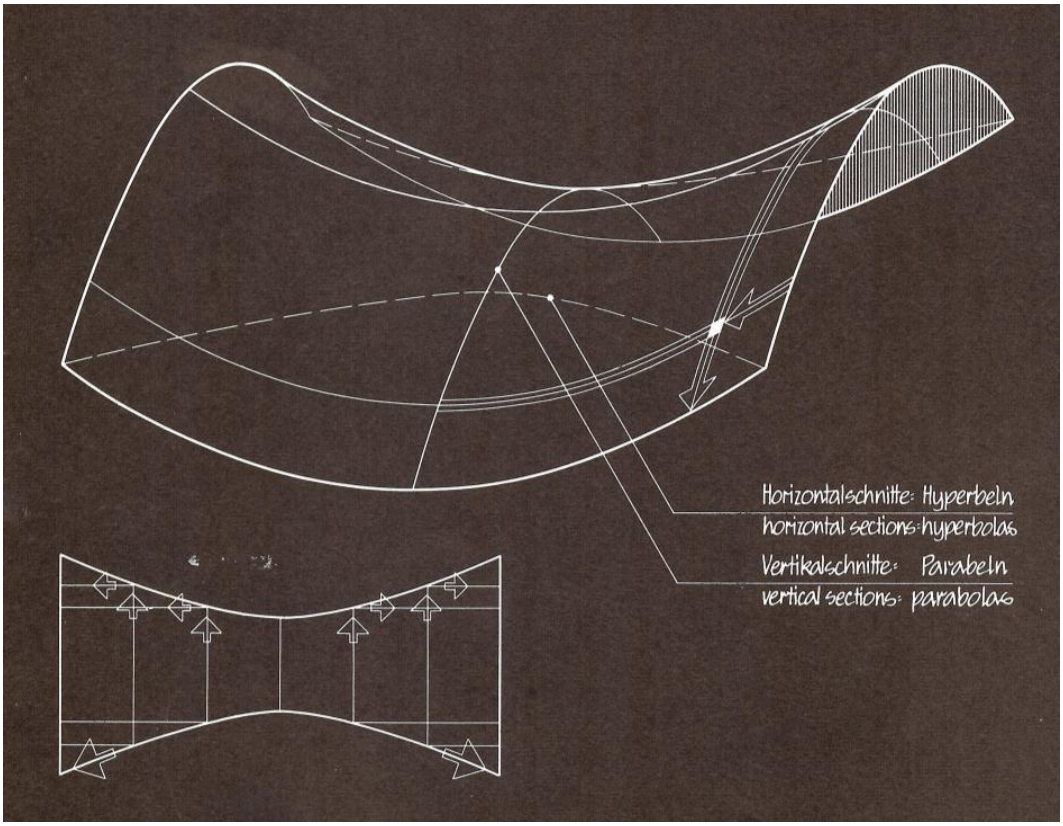
De Elliptische paraboloide (Elpar).



De volgende schaalvorm ontstaat als we een hyperbool als as gebruiken en er allemaal parabolen over heen laten schuiven. Dan ontstaat een hyperbolische paraboloïde oftewel een hypar. Ook het woord zadelvlak wordt wel eens gebruikt.



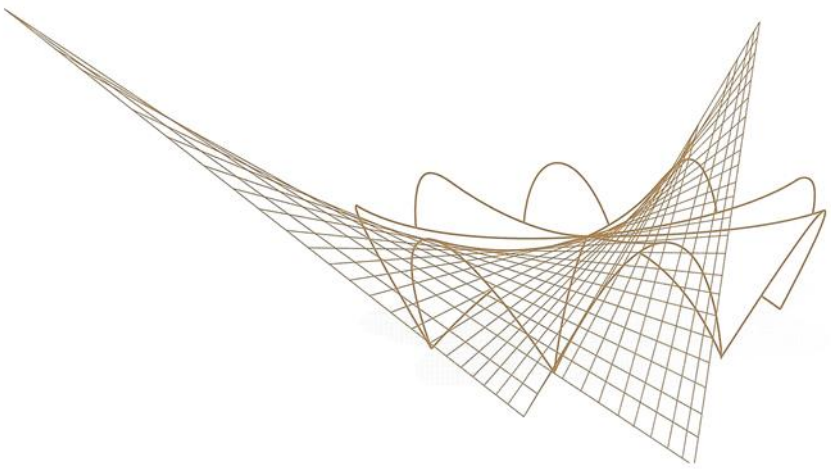
Translatie van parabolen over een hyperbool, er ontstaat een hyperbolische paraboloïde (hypar).



Bij een hypar werken de omhoog wijzende parabolen als bogen (drukspanningselementen) en de hyperbolen als kabels (trekspanningselementen). Wel worden alle op de hypar schaal werkende krachten weer (zoals het bij een schaal ook hoort) in het vlak van de schaal afgevoerd.
Een mooi voorbeeld van een hypar dak is het restaurant las Manantialas, in de wijk Xochimilco in Mexico-City. Hierbij heeft de architect/ constructeur Felix Candela rond 1958 een elegant samenstelsel van hypar schalen tegen elkaar aan gezet om een mooi gebouw en een bijzondere vorm te maken. En dat met een beton schaaldikte van 40 mm!!! Door de krommingen is dit voor de schaalwerking afdoende dikte.



Restaurant Las Manantiales in Mexico-Stad.

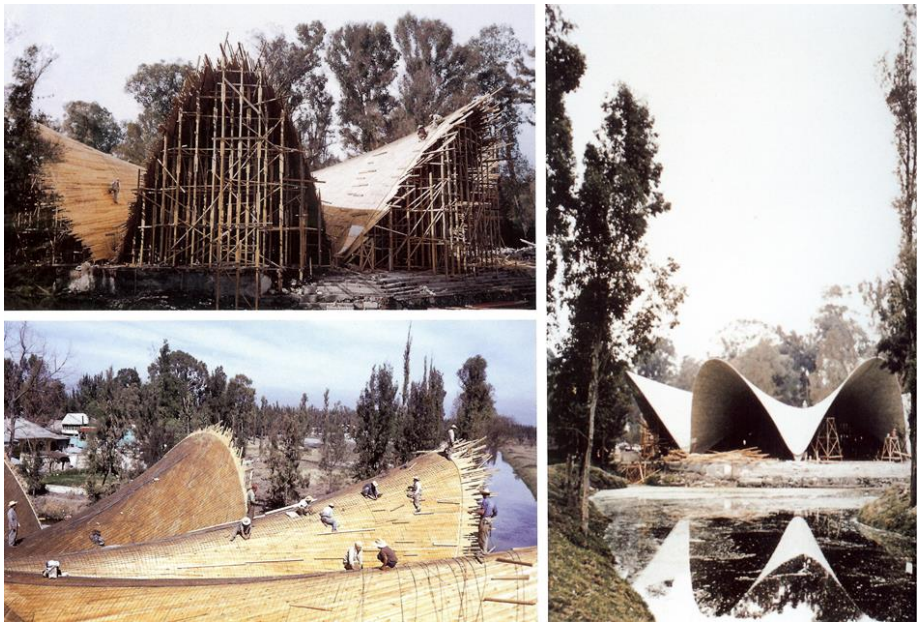


Ieder van de acht tegen elkaar aan staande 'koepels' is een hyperbolische paraboloïde.



Interieur beeld van Las Manantiales.

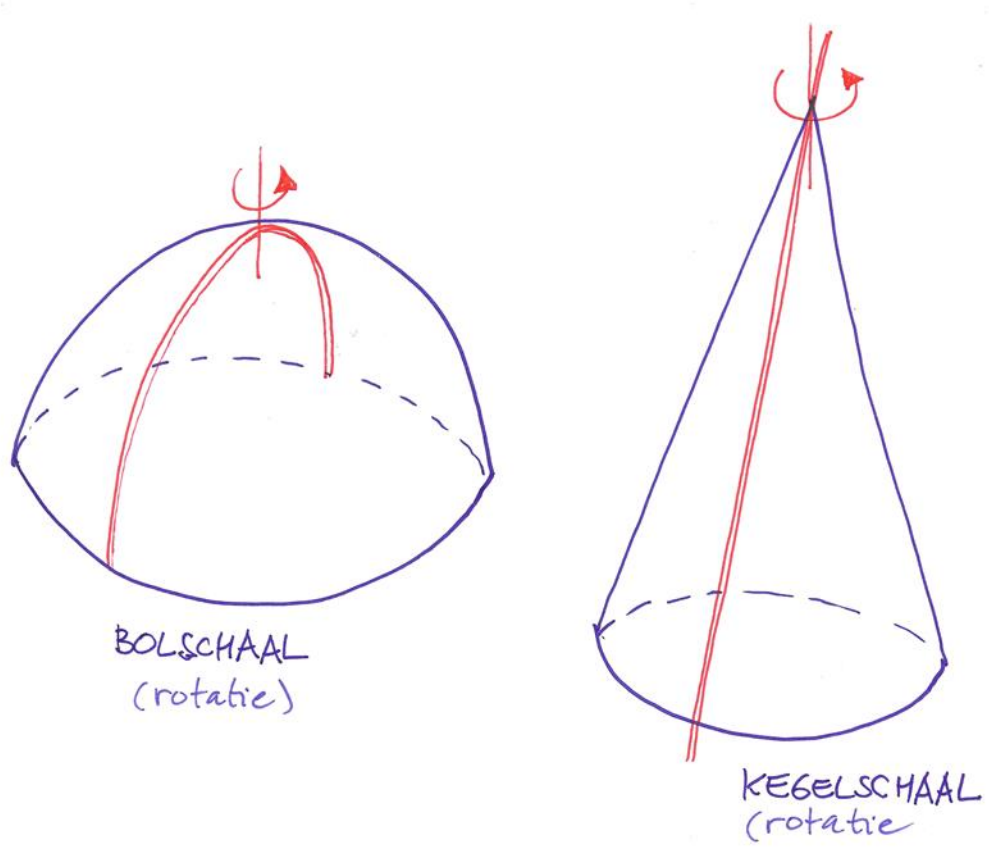
Men zou zich kunnen afvragen waarom zijn er niet veel meer van dit soort prachtig vormgegeven gebouwen gebouwd? De reden hiervoor is dat het zeer moeilijk te maken en daardoor veel arbeidsloon vergende constructies zijn. Ook moet je eerst een zeer complexe houtconstructie als bekisting in elkaar zetten die je later weer afbreekt en niet meer gebruikt, terwijl je er wel voor moet betalen! Het wapening vlechten is ook zeer arbeidsintensief door de vele krommingen en het beton storten is bijna stukadoorswerk geworden. Er zijn momenteel studies gaande om deze, financieel, vervelende bijwerkingen van de schaalvormen te kunnen corrigeren. Zo probeert men opblaasbare 'kussens' als bekisting en andere eenvoudig op te zetten, af te breken en weer her te gebruiken (tijdelijke) constructies.



De moeilijke bekisting van de hypar schalen van Las Manantiales.

7.4 Rotatieschalen

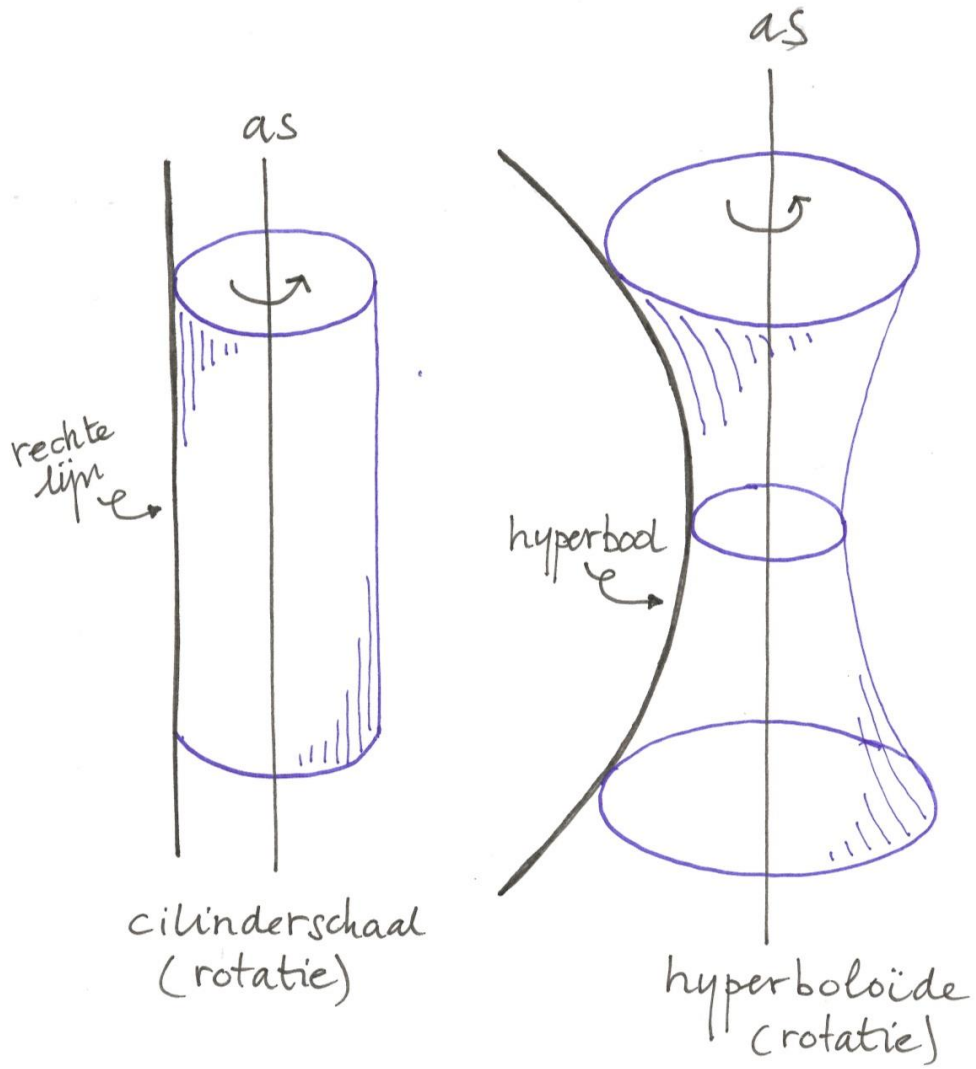
Rotatieschalen worden ook wel omwentelingslichamen genoemd. Zij ontstaan als we een lijn om een punt of om een as laten draaien. Afhankelijk van de gebruikte lijnsoort ontstaan zo: een bolschaal of koepel (bol als de 'ideale' ellips want de ellips kan ook) als we een cirkel (of ellips) gebruiken; een kegel als we een schuine rechte lijn laten ronddraaien, een cilinder als we een loodrecht staande lijn laten ronddraaien en, als we een hyperbool (de 'ideale' parabool want de parabool zou ook kunnen) laten ronddraaien, een hyperboloïde.



Rotatieschalen: de bol (koepel) en de kegel.

De bol is weer een dubbel gekromde schaal en de kegel is, let op!, enkel gekromd.
Bij de volgende twee rotatieschalen of omwentelingsfiguren is het verschil tussen een cilinderschaal, eigenlijk ook translatie schaal, en de hyperboloïde ook weer het verschil tussen enkel gekromd (de cilinderschaal) en dubbel gekromd (de hyperboloïde). Dit verschil is constructief belangrijk omdat dubbel gekromde schalen veel sterker en stijver zijn dan enkel gekromde schalen. In de richting van de enkele kromming ontstaan veel sneller buigspanning en daardoor plooi- of knikverschijnselen. Enkel gekromde schalen zijn ook veel gevoeliger voor deuken ontstaan ten gevolge van geconcentreerde krachten (puntlasten) op de schaal.

Tot slot kunnen we nog melden dat ieder vorm van lijn, hoe willekeurig ook, om een punt of om een lijn of as geroteerd kan worden. Er ontstaat dan altijd een 'omwentelingslichaam'.

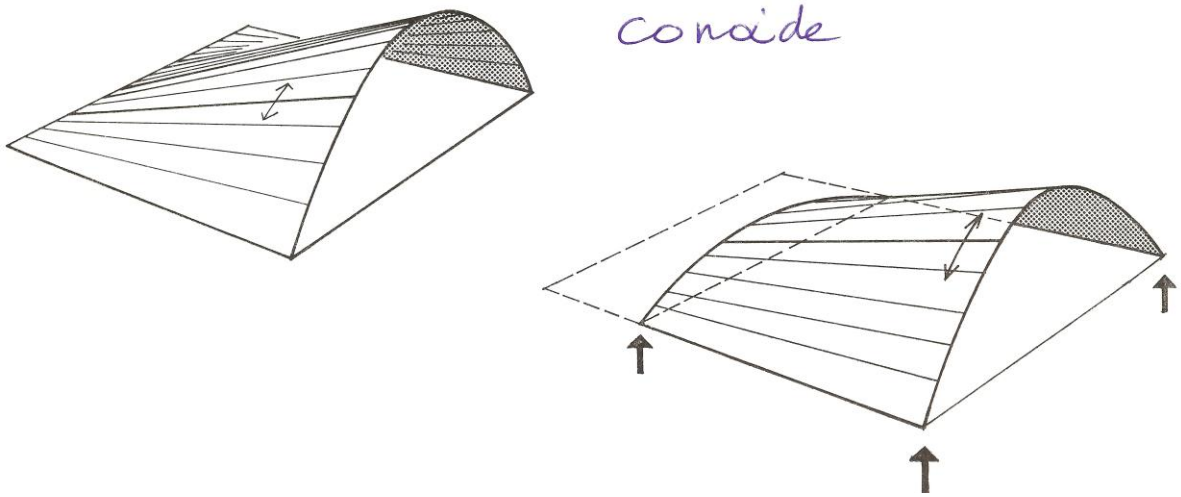


Rotatieschalen: de cilinder en de hyperboloïde.

7.5 Regelvlakken

Zoals al te merken is lopen de definities van alle schaalvormen een beetje in elkaar over. Zo is een cilinderschaal zowel een translatie-schaal (een cirkel schuift over een rechte lijn) als een rotatie-schaal (een rechte lijn draait on een vaststaande rechte lijn heen). Zo ook de regelvlakken, daar zulle we ook weer een paar bekenden zoals de hyperbolische paraboloïde (hypar, een translatievlak ontstaan uit parabolen (de generix-en) die over een hyperbool als directrix geschoven wordt) en de hyperboloïde, een rotatie-schaal, waarbij een hyperbool om een rechte lijn heen draait.
Het bijzondere aan regelvlakken is dat het gekromde oppervlak met rechte lijnen dus rechte balken te beschrijven is. Dat is heel bijzonder omdat alleen bij regelvlakken deze verrassende eigenschap geldt dat op een gekromd oppervlak rechte lijn: dus ook rechte balken!!!, liggen.

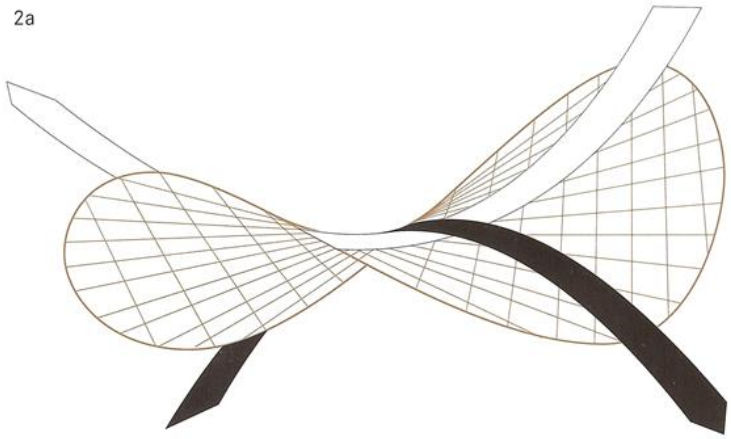
De meest eenvoudige vorm van een regelvlak is de conoide. Hierbij kan ik een enkel gekromd vlak maken met rechte balken. Dat doe je door balken aan één zijde op een platte muur of op de grond te leggen en de balken aan de andere zijde op een boog. Als vanzelf ontstaat dan de schaal die we conoide genoemd hebben.

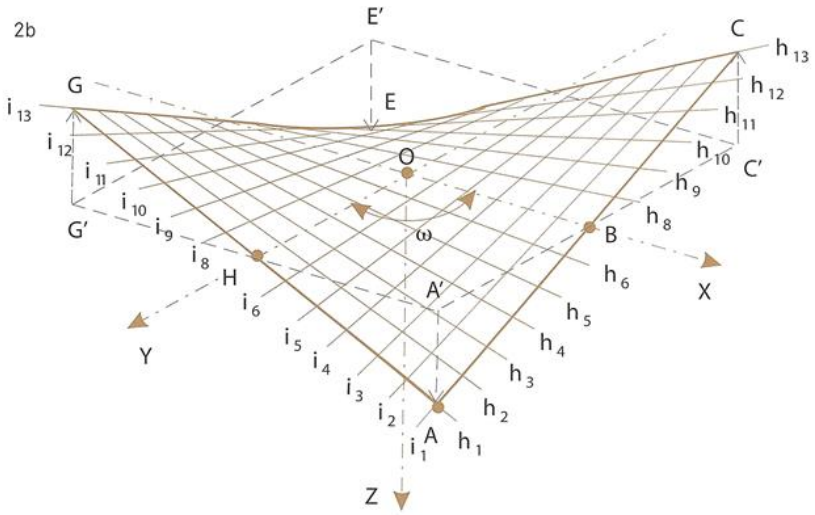




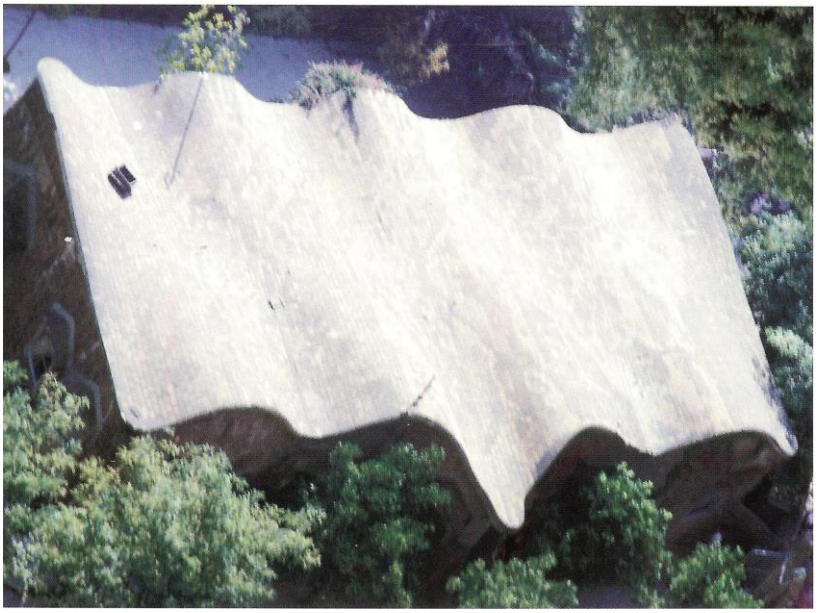
Conoides op dak Stevin-laboratorium Civiel TU Delft.

Maar ook hyparschalen zijn regelvlakken! Ook hier liggen kruislings rechte lijnen in het vlak van de hypar. Kijk maar eens goed naar het volgende plaatje.



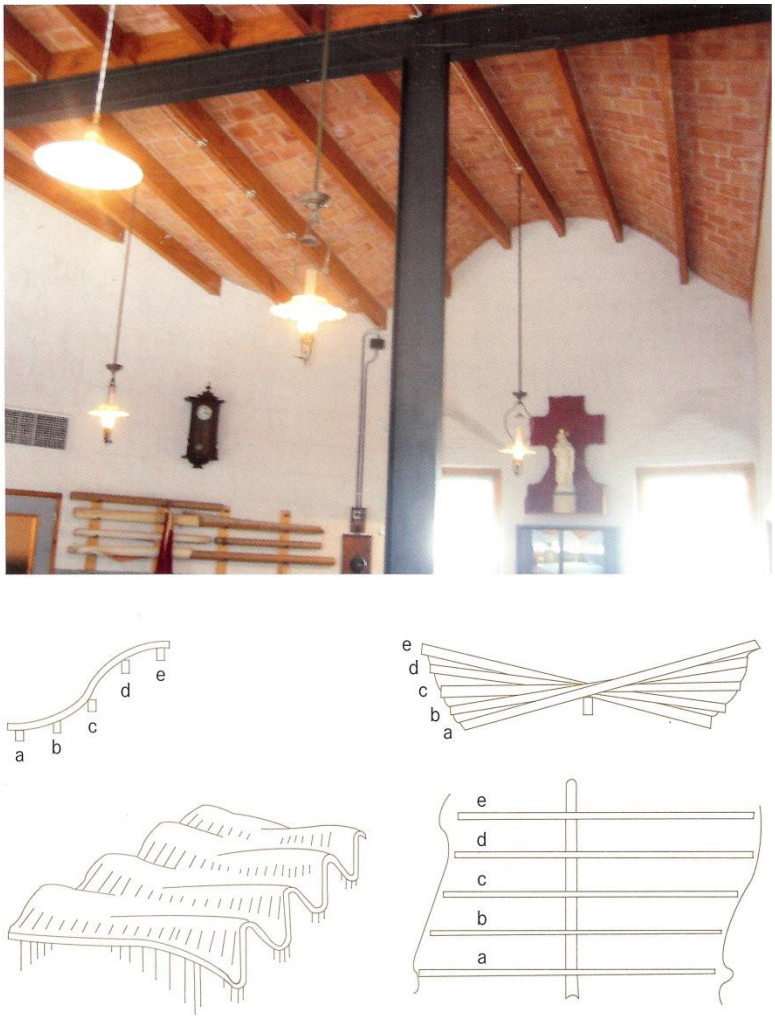


De rechte lijnen op een, dubbel gekromd, hyparvlak.



Bovenaanzicht dak schooltje van Gaudi bij de Sagrada Familia in Barcelona, rond 1900.

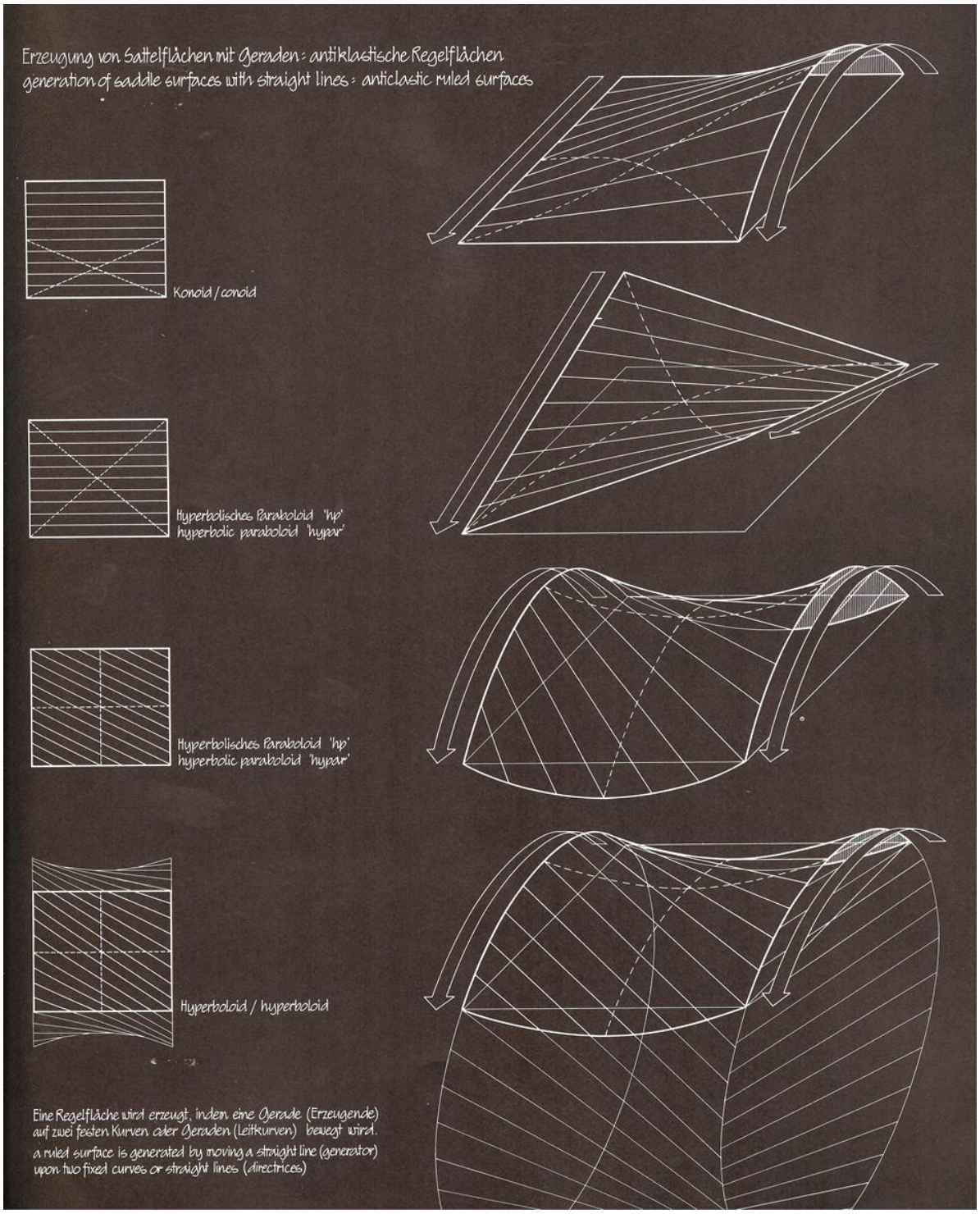
Een nog aardigere variant op de conoide; de balken optil-truc, is gemaakt door de architect Antoni Gaudi, begin 1900, voor een schooltje bij zijn beroemdste werk, de kerk Sagrada Familia in Barcelona. Hierbij metselde Gaudi twee muren tegen over elkaar als lange gevelmuren en zorgde ervoor dat de top van de golvende bovenkant van de ene muur precies tegenover het dal van de golvende muur aan de overkant zat. Door nu rechte balken van de ene muur naar de andere muur neer te leggen ontstond als vanzelf een, in dit geval dubbel gekromd vlak: een hypar. Regenwaterafvoer was geen probleem meer en met rechte elementen, houten balken en bakstenen en relatief weinig meer arbeid ontstond een mooie vorm.



Interieur en constructie opzet schooltje van Gaudi.

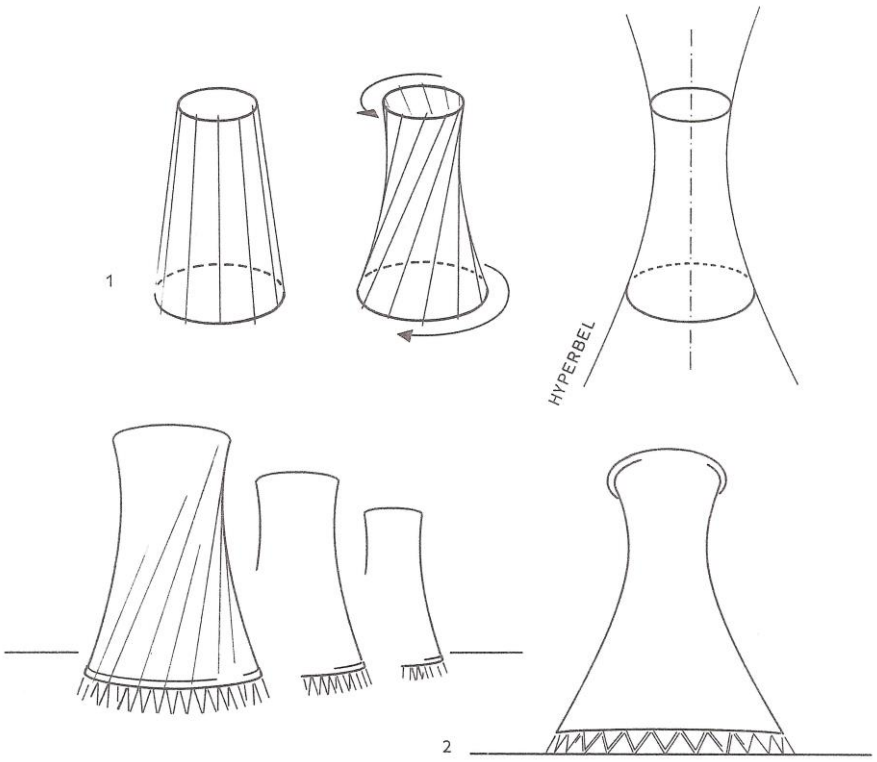
Van de rechte lijnen op een hyparvlak bestaan twee varianten, waarbij in geval één de rechte lijnen recht oversteken en in het tweede geval de rechte lijnen diagonaal oversteken. Het verschil ontstaat tussen deze twee doordat in geval één de (richt)as (de hyperbool) in de diagonaal geplaatst is en de parabolen daar over heen schuiven terwijl in het andere geval de (richt)as recht oversteekt.

In het volgende plaatje zijn de hoofdregelvlakken de conoide, de hyperbolische paraboloïde (hypar) en hyperboloïde uitgetekend en wordt aangeven waar de rechte lijnen op het gekromde vlak liggen. Hierna zullen we het laatst vermeldde regelvlak, de hyperboloïde nader bekijken.



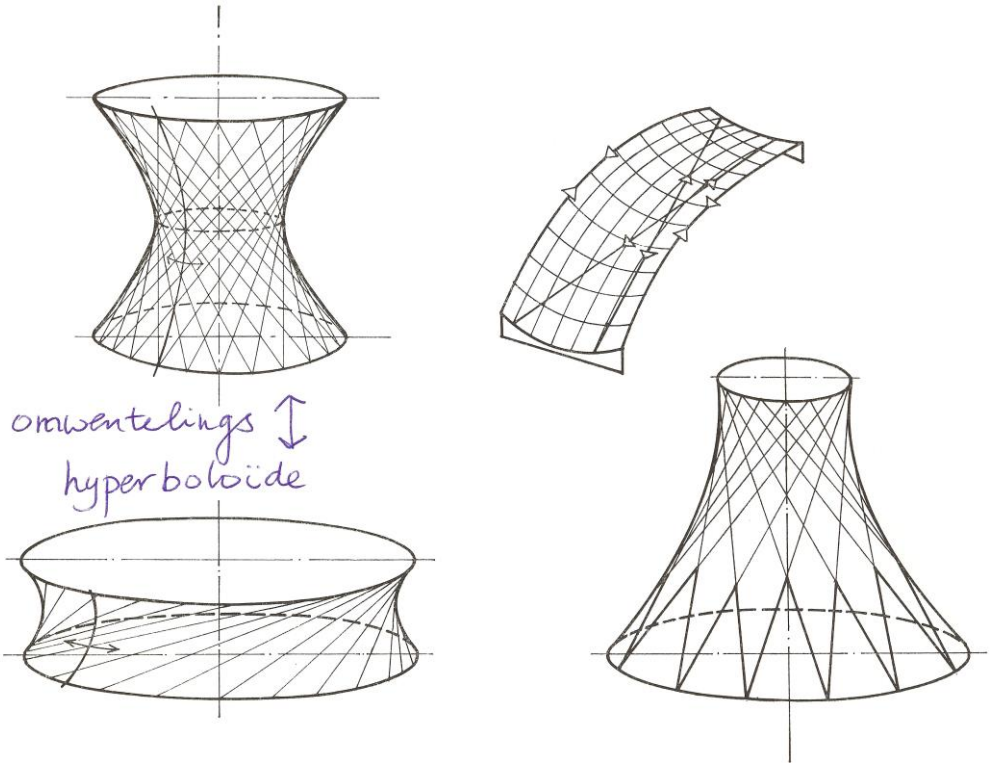
Overzicht regelvlakken.

Het laatste regelvlak dat we bespreken is de hyperboloïde. De hyperboloïde is eigenlijk een combinatie van een rotatie-schaal, gevormd door een hyperbool die om een rechte as heen draait en een translatie-schaal met een hyperbool als (richt)as en er overschuivende, in diameter toenemende cirkels. Er ontstaat ook een regelvlak met erin liggende rechte lijnen of balken. In een gedachte experiment waarin we beginnen met twee cirkels met verschillend diameter onder en boven en rechte lijnen ertussen en hier vervolgens een draai aan te geven ontstaat een hyperboloïde (hyperbel in Duits op het onderstaande plaatje).



Afleiding hyperboloïde als regelvlak en de toepassing als koeltorens.

De hyperboloïde vorm wordt vooral gebruikt voor koeltorens bij electriciteitscentrales, waarbij stoom gebruikt bij de aandrijving van de generatoren afgekoeld moet worden. De vorm van de hyperboloïde geleidt de stoom mooi omhoog en koelt hem al opstijgend in een 'schoorsteen' af.



Diverse uitsnedes uit een hyperboloïde, elke deel uitsnijding is weer een regelvlak.

Het gewicht wordt als druk in de regels opgenomen, de (horizontale) windbelasting als trekkrachten in de schuine regels. We hebben dus twee schuine richtingen nodig om de wind uit alle richtingen op te kunnen nemen.

De dubbel gekromde vorm van de hyperboloide neemt de winddruk- en zuiging tijdens een storm goed op zodat met een geringe wanddikte volstaan kan worden. Dit moet niet te gek worden zoals in Engeland in de jaren 1960 toen een 200 meter hoge koeltoren met een wanddikte van 150 mm beton instortte. Een windvlaag zorgde voor een dusdanig hoge lokaal puntvormig gebied dat de koeltorenvorm indeukte en daardoor zijn vorm verloor en bezweek.



Koeltoren in Schmehausen (Duitsland).

7.6 Wiskundige formules van schalen

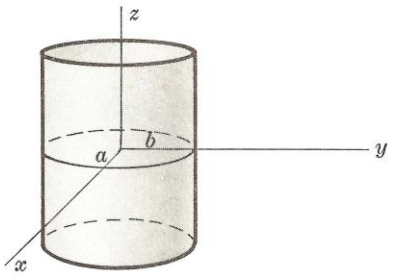
De meest complexe figuren die hiervoor uit translatie- en rotatie modellen zijn ontwikkeld, kunnen op verrassend eenvoudige wijze met wiskundige formules omschreven worden. Hieronder een overzicht. Let op dit zijn formules voor de varianten met een ellips met assen a en b, als we niet van ellipsen uitgaan maar van cirkels is a gelijk aan b (de straal r van de cirkel dus).

ELLIPTIC CYLINDER WITH AXIS AS z AXIS

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

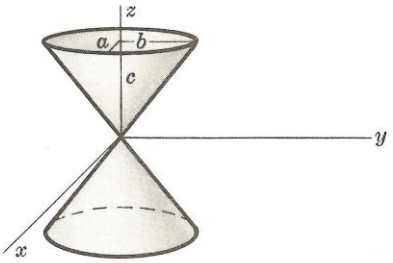
where a, b are semi-axes of elliptic cross section.

If $b = a$ it becomes a circular cylinder of radius a.



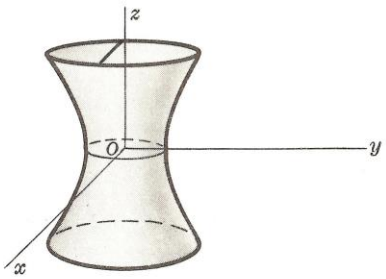
ELLIPTIC CONE WITH AXIS AS z AXIS

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2}$$



HYPERBOLOID OF ONE SHEET

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

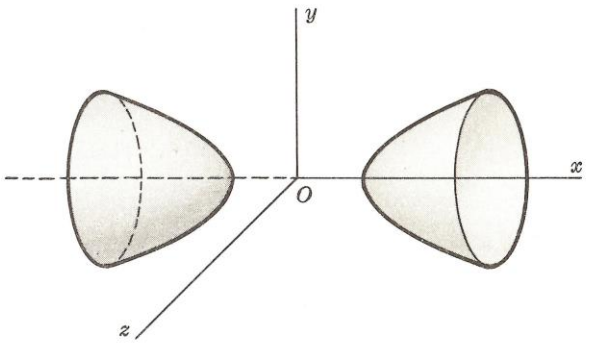


De wiskundige formules voor een Cilinder, een Kegel en een Hyperboloïde (let wel op basis van een ellips! Bij cirkel: a = b = r (straal cirkel).

HYPERBOLOID OF TWO SHEETS

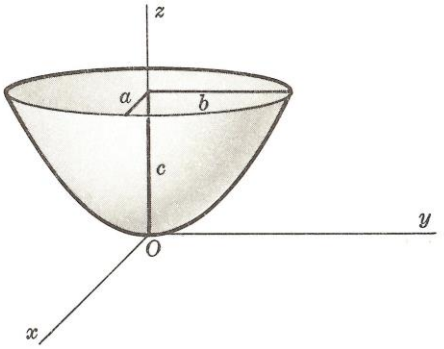
$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Note orientation of axes in Fig. 12-14.



ELLIPTIC PARABOLOID

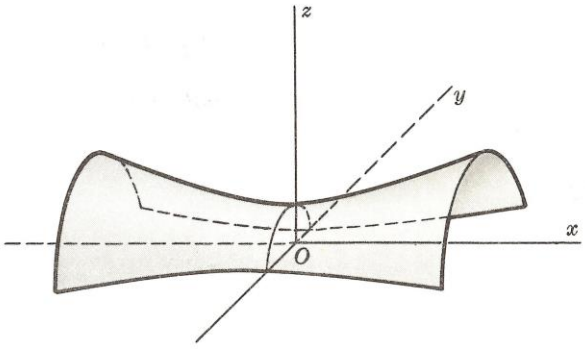
$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{z}{c}$$



HYPERBOLIC PARABOLOID

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = \frac{z}{c}$$

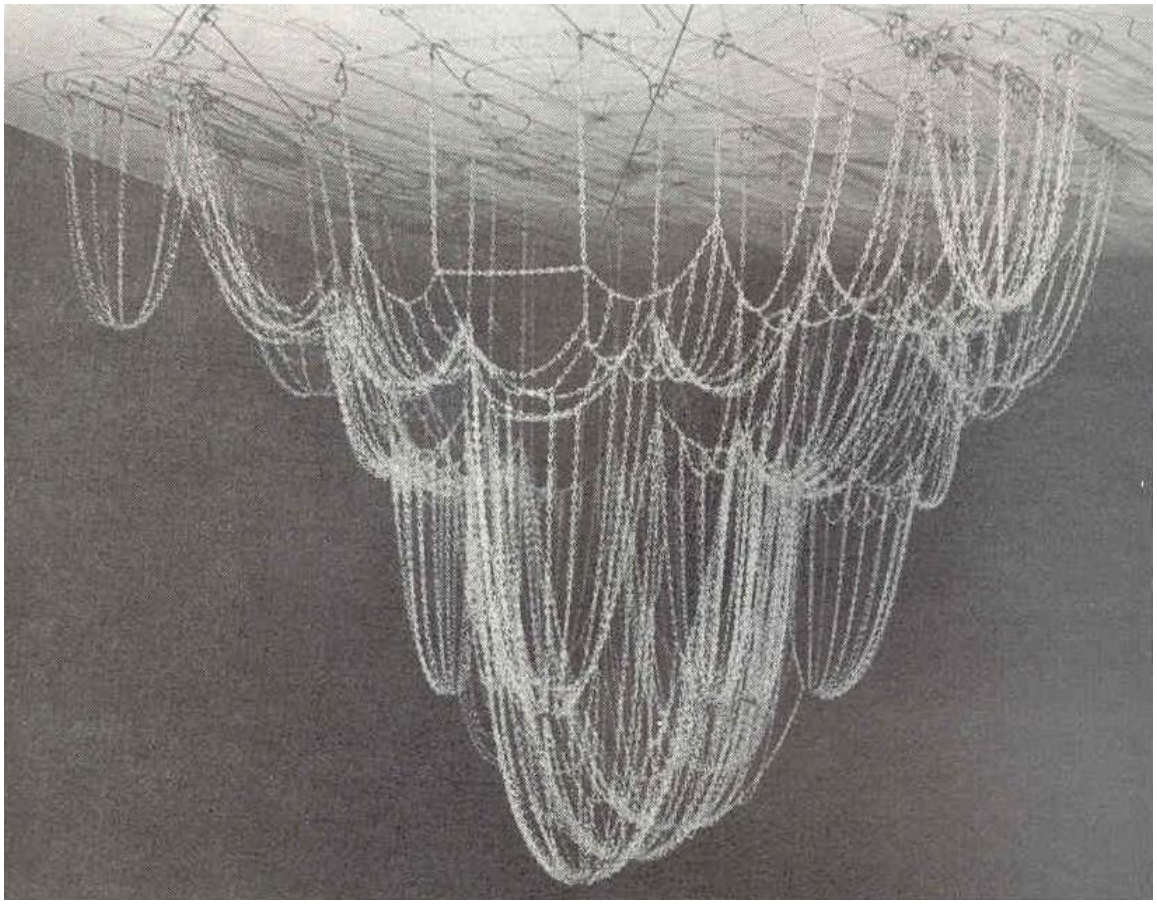
Note orientation of axes in Fig. 12-16.



De wiskundige formules voor een Hyperboloïde uit twee losse delen, een Elliptische Paraboloïde (Elpar) en een Hyperbolische Paraboloïde (Hypar).

8 Tenten

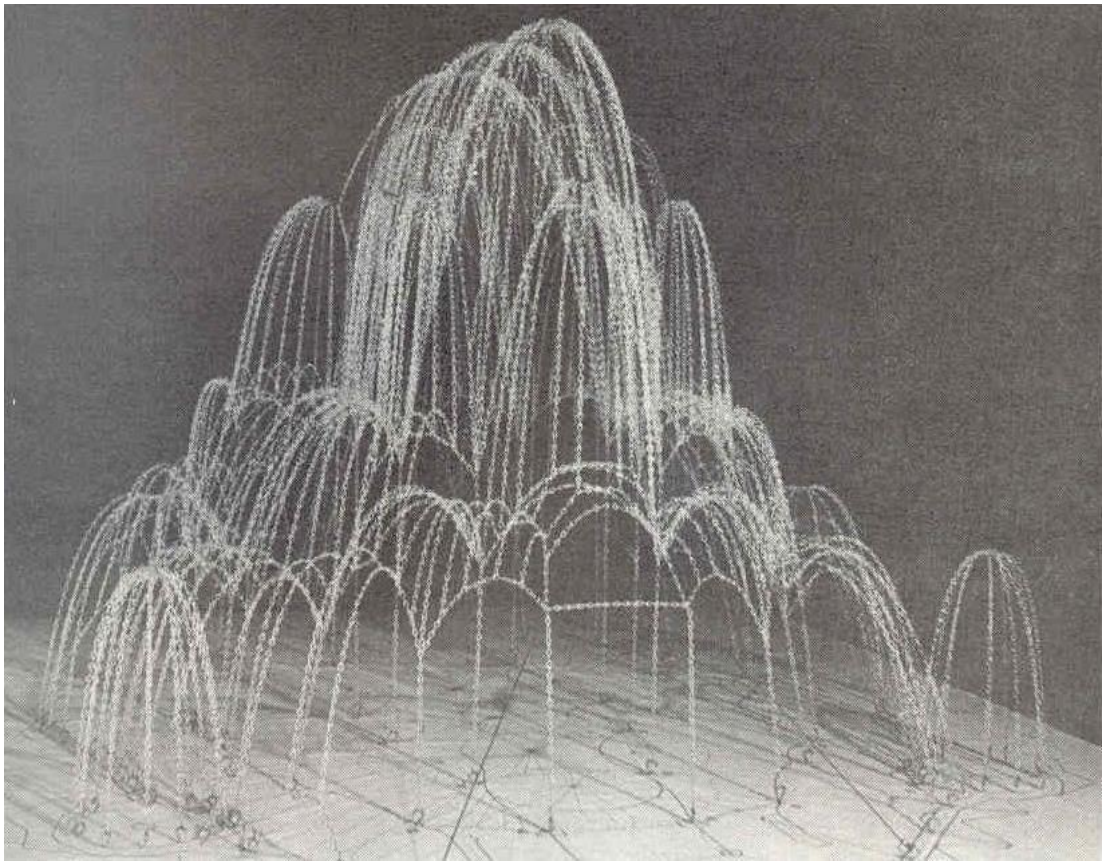
Tenten zijn de tegenhanger van schalen zoals kabels tegenhanger zijn van bogen. Tenten en kabels brengen de belasting die erop uitgeoefend wordt hoofdzakelijk over via trekspanningen in het vlak van hun constructie; Schalen en bogen transporteren de belasting erop uitgeoefend wordt hoofdzakelijk via drukspanningen, waarbij aangetekend moet worden dat schalen en bogen, in tegenstelling tot tenten en kabels ook capaciteit hebben om trekspanningen op te nemen.
Onderstaand plaatje illustreert weer mooi de letterlijke en figuurlijke 'omkeerbaarheid' van constructies belast op druk en constructies belast op trek.



Het op trek belaste kettingenmodel ontworpen door Antoni Gaudi, de zwaartekracht zorgt er voor dat de kettingen precies 'goed' hangen want zij kunnen alleen trekkrachten opnemen, geen druk of buiging.

Een (hangend) model met kettingen gemaakt door Antoni Gaudi rond 1900 voor de bouw van een kerk. Door de kettingen zo te plaatsen en te verbinden ontstond er voor de architect een mooie vorm. Door de zwaartekracht hangen de ketting precies in de juiste vorm om zonder buiging (dat kan een ketting niet opnemen) het gewicht van de kettingen af te voeren. Gaudi mat de door hem uiteindelijk goedgekeurde vorm zorgvuldig op en . . . draaide het geheel om! De zwaartekracht werkt nu 180 graden gedraaid, voor kettingen zou dit niet gaan. De hele constructie zou in elkaar storten want kettingen kunnen geen drukkrachten opnemen. Maar voor bogen die juist wel goed drukkrachten kunnen opnemen is het de meest ideale vorm.

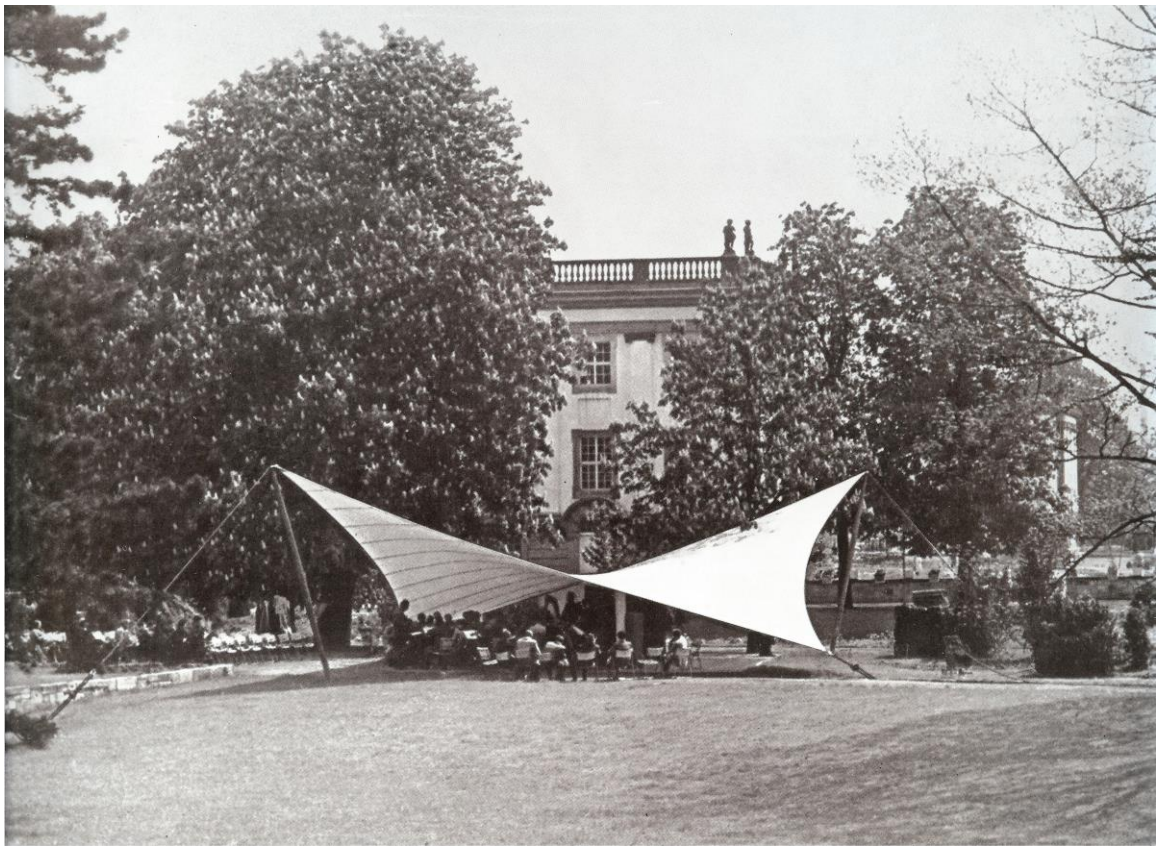
Door het omdraaien veranderde alleen trek in alleen maar druk, beide zonder enige buiging. Gaudi had door zijn experimentniet alleen de mooiste esthetische vorm gemaakt die hij kon vinden maar ook de constructief meest ideale vorm, die alle verticaal werkende krachten (voornamelijk de zwaartekracht natuurlijk) zonder buiging of trekspanning afvoert naar de fundering. Natuurlijk veroorzaken wind en aardbeving horizontale krachten die wel door de totale constructie via buiging door trekspanningen moeten worden afgevoerd. Maar door het ontstaan van drukspanningen in alle constructie-onderdelen moet de bijvoorbeeld door de wind ontstane trek ten gevolge van buiging eerst deze drukspanning 'opeten' voordat het materiaal echt merkt dat er trek op komt te staan.



De op alleen op druk belaste kerk van Antoni Gaudi.

Dat 'omkeren'-principe geldt zeker ook voor tenten en schalen. Het is zelfs zo dat bepaalde vormen die bij schalen zijn omschreven bij tentconstructies in de zelfde vorm terug komen. Alleen vindt de belastingoverdracht bij een tent plaats via trek in het tentdoek en de belastingoverdracht bij een schaal voornamelijk via drukspanning.

Een mooie toepassing hiervan is een tentconstructie van Frei Otto in Stuttgart (D). Het is de vorm van een hyperbolische paraboloïde (hypar), in de meest elementaire vorm.
Om te voorkomen dat een tentconstructie gaat klapperen in de wind is het essentieel dat de tentconstructie aangespannen wordt. Dat wil zeggen dat het doek constant onder spanning staat. Een onder spanning staand doek noemen we een membraan. Het bijzondere van een membraan is dat door de constante spanning in het doek een membraan in staat is een puntlast loodrecht op het doek op te nemen. Weliswaar met beperkte capaciteit en veel vervorming maar het kan en, belangrijk, het is een elastisch proces: als de puntlast weggehaald wordt veert het membraan terug in zijn oorspronkelijke stand.



Tentconstructie.

De Tent is het meest gebruikte type textielconstructie. Een gebouw gemaakt uit een aantal kolommen (stokken als je dat zo wilt noemen), kabels of touwen en een groot stuk doek of textiel in een zeer specifieke vorm.



Nomadententen van Iraniërs, Indianen, Mongolen en Berbers.

Tenten behoren tot de oudste bouwconstructies die de mensheid ontwikkeld heeft. Na bewoning in grotten en in uit hout, klei en takken opgebouwde hutten zal de eerste tent uitgedacht en opgebouwd zijn. Een nomadisch bestaan, voldoende kennis voor het kunnen maken van verbindingen en een relatief mild klimaat zullen de voorwaarden geweest zijn, die de eerste opzet en ontwikkeling van tenten mogelijk hebben gemaakt. Ook nu nog zien wij bij allerlei volkeren op uitgebreide schaal toepassing van tenten, meestal opgebouwd uit huiden of linnen doeken, houten palen en touwen.

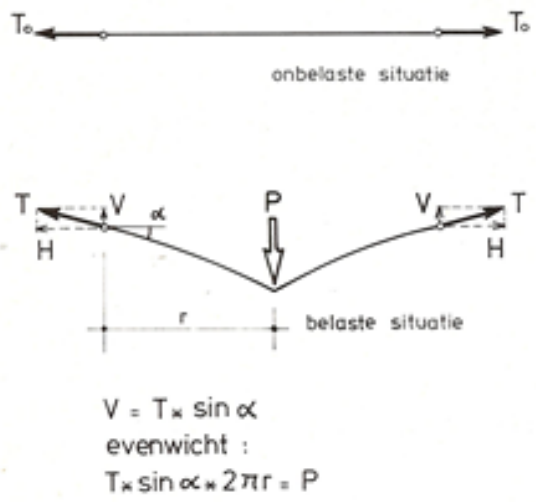
De wigwam bij de Indianen en de bedoeïentent zijn hier voorbeelden van. In onze westerse cultuur is het tentprincipe niet verder uitgewerkt. Slechts tijdelijke, eenvoudige te (de)monteren tenten zijn ontwikkeld. De legertenten en de circustenten zijn hiervan de belangrijkste exponenten. De matige bouwfysische eigenschappen en de, ten gevolgde van de toegepaste materialen, korte levensduur werkten dit in de hand.

De vervaardiging van grote doeken, de uitwerking van de verbindingen (naden) en het snijden van de deelvlakken werden echter wel energiek aangepakt. De steeds in omvang en raffinement groeiende zeilscheepvaart stimuleerde dit in hoge mate.

De chemische industrie, die na de tweede wereldoorlog nieuwe, belangrijk verbeterde materialen ontwikkelde en de nog steeds aanwezige interesse van architecten in de vele fascinerende vormen, die met behulp van tenten mogelijk zijn, leidden er na 1960 toe dat het onderzoek naar en de ontwikkeling van tentconstructies belangrijk gestimuleerd werd. Deze ontwikkelingen hebben geleid tot een volwaardige, nieuwe constructiemethode: de textielconstructies (textiles Bauen, textile structures).
Een en ander bevindt zich nog wel in de eerste fase van toepassing. Speciale aandacht voor bouwfysische eigenschappen, vooral bij permanente toepassing, en de windbelasting in relatie met de teruggang in de materiaalsterkte is een vereiste.

Textielconstructies bieden, kort samengevat, de volgende mogelijkheden en, vergeleken met traditionele bouw voordelen:
- Mogelijkheid tot spectaculaire vormgeving,
- Volledige prefabricage mogelijk,
- Eenvoudig te transporteren,
- Lichte fundering,
- Korte bouwtijd,
- Eenvoudige montage,
- Eveneens eenvoudig te demonteren, waardoor mobiele toepassing mogelijk is.

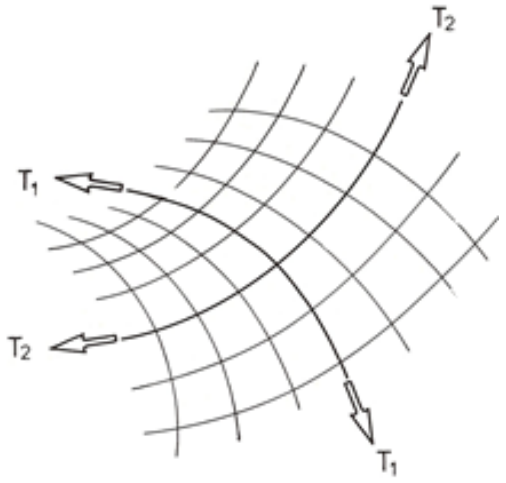
Gezien de spectaculaire vormgevingsmogelijkheden vormen tenten, of beter textielconstructies, een interessant gebied, waarin nog veel ontwikkeld en gebouwd zal worden.
Als voorbeelden van recent gerealiseerde textielconstructies noemen wij:
- Het dak van het Olympisch stadion in Montreal, Canada;
- De Hajj Terminal van het Jeddah Airport, Saoedi Arabië;
- Het laboratorium van Schlumberger Cambridge Research Ltd. in Engeland.



Afleiding trekspanning in een rond *membraan door een uitwendige puntlast P.*

Theoretische achtergrond
Het essentiële mechanisme voor textielconstructies is het fenomeen 'membraanwerking'. Hieronder wordt verstaan het vermogen tot het dragen van krachten loodrecht op een membraan door middel van een kunstmatig opgewekte voorspanning in het vlak.
Een als plat vlak, gespannen membraan is in principe buigslap; de buigstijfheid (EI) is nihil. Voor de opname van een kracht P loodrecht op het membraan moet dit eerst vervormen. Pas dan kan zich een nieuw evenwicht instellen: de verticale component van de membraanspanning T zal evenwicht maken met P.

Het vervormen van het membraan roept echter rekken in het vlak van het membraan op en aldus neemt T navenant toe. Dit, positief werkende, tweede orde effect wordt meestal verwaarloosd, maar vergroot wel het draagvermogen en de veiligheid.
Een als plat vlak gespannen membraan biedt dus in allereerste instantie weinig weerstand tegen krachten loodrecht op het vlak. Er is immers voor de ontwikkelen van het draagvermogen een vervorming nodig. Op zich geen nadelige zaak, maar bij windbelasting kan dit ten gevolge van wervels e.d. resulteren in 'klapperen'.
Door uit te gaan van een dubbel tegengesteld gekromd vlak ontstaat de mogelijkheid ruimtelijk voor te spannen (zie figuur). Dan kan elke belasting worden opgenomen zonder grote bijkomende vervorming. Een dergelijk vlak in de ruimte noemt men anti-klastisch; dit is tevens het enige gekromde vlak dat in twee richtingen onder trek voorgespannen kan worden met behoud van zijn vorm.

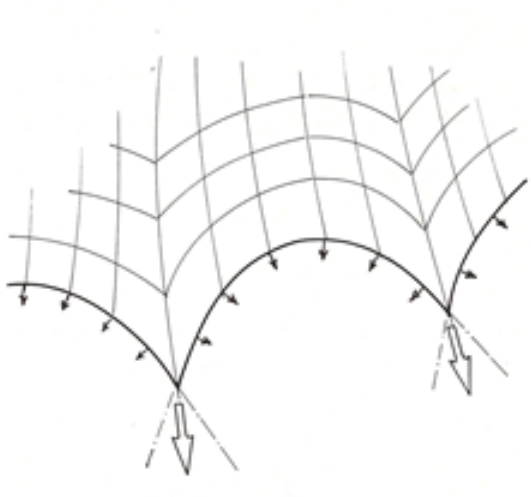


Een zogenaamd anti-klastisch vlak, gekromd in twee richtingen (tegengesteld gericht: hol en bol), hier een hyperbolische paraboloïde (hypar).

Het onder spanning staan van een dergelijk membraan heeft de volgende belangrijke constructieve effecten:

Loodrecht op het vlak
Belasting loodrecht op het vlak in de vorm van wind of sneeuw, resulteert in een reductie van de spanning in het membraan in de ene richting en een toename in de andere richting. Met andere woorden, indien men kan aantonen dat de uitwendige krachten ten gevolge van wind of sneeuw en dergelijke nooit tot een opheffen van de voorspanning in het doek aanleiding zullen geven, is berekening van een textielconstructie een triviale zaak. Immers, zolang er een trekspanning blijft bestaan is de vormvastheid en daarmee de standzekerheid van de textielconstructie gegarandeerd!

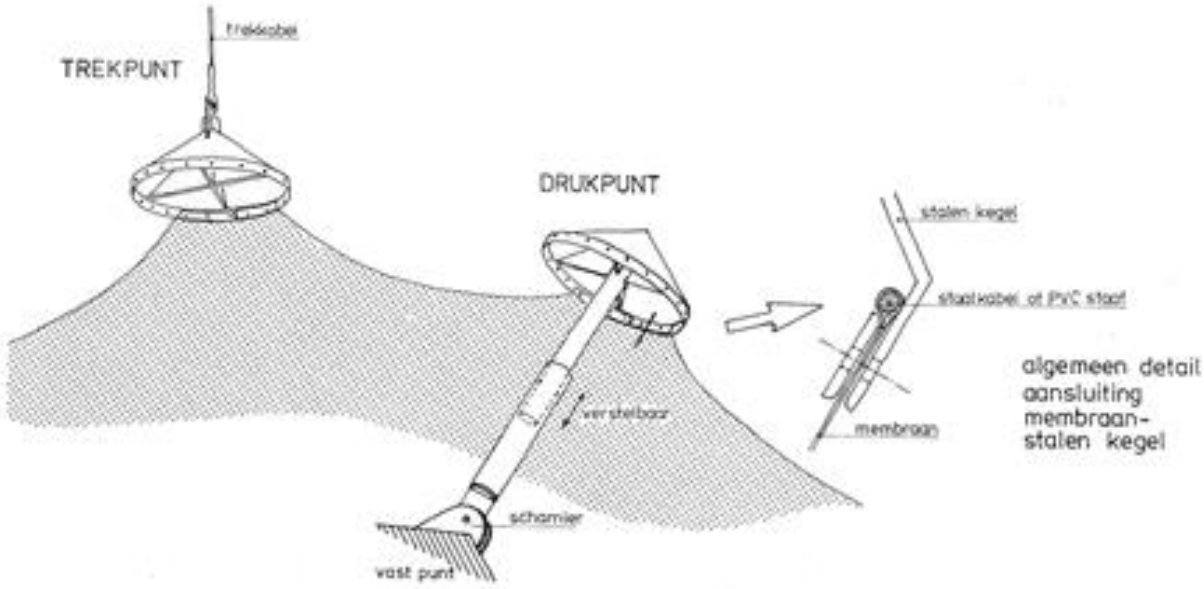
Dynamisch
De grootte en de richting van de windbelasting heeft een dynamisch karakter. Dit leidt tot vervelende verschijnselen, zoals resoneren en het 'klapperen' in de wind van de textielconstructie.
De voorspanning in een anti-klastisch vlak introduceert een belangrijke vermindering van dit klapperen door de reductie van de bewegingsvrijheid van het doek. De eigenfrequentie neemt door de voorspanning belangrijk toe en komt buiten het frequentiebereik van de windbelasting.
Dit laatste aspect kent echter de volgende beperking:
In (bijna) elke door de ontwerper gewenste vorm zullen, vooral bij de bevestigingen, nagenoeg platte vlakken optreden en zal dus het 'klapper-probleem' ontstaan. Daar ter plekke is het valk immers nauwelijks meer anti-klastisch! Men kan dan de volgende maatregelen nemen: een deelvlak eruit snijden, de randen verstevigen met een kabel en zodoende aanwezigheid van membraanspanningen langs de rand garanderen (zie figuur).



Voorspannen van een anti-klastisch oppervlak door (stalen) randkabels aan te spannen.

Deze kabels dienen echter aan een uitwendig vast punt bevestigd te worden, bijvoorbeeld aan een zogenaamd 'trekfundament'.
Een andere mogelijkheid is een bepaald punt loodrecht op het membraan te verplaatsen en zodoende een dubbel gekromd vlak te vormen . Dit kan op twee wijzen:

- Een 'drukpunt' creëren door een punt van het membraan tegen een stijve ondergrond af te duwen of
- Een 'trekpunt' vormen door een kabel aan het membraan te bevestigen en een trekkracht uit te oefenen.



Voorbeeld van een trekpunt en een drukpunt om een antiklastisch vlak te formeren. Let ook op het aansluitdetail membraan en kegel door middel van een ingenaaide kabel aan de doekrand.

Deze kabels kunnen over een vrijstaande kolom of pyloon heen gevoerd worden, die door tenminste drie kabels gestabiliseerd moeten worden. De invoer van trek- of drukkrachten naar het membraan dient zorgvuldig te geschieden. Een geëigende methode hiervoor is de krachtinvoer met behulp van een kegelvormige staalplaat, waarbij de puntvormige kracht-invoer in de top via de staalplaat gelijkmatig verdeeld aan de onderrand op het membraan wordt overgebracht (zie figuur).
Het zal duidelijk zijn dat enkel en alleen een uitwendig stabiel geheel van membraan, kabels en kolommen een verantwoorde textielconstructie vormen. Afzonderlijke elementen zullen nooit een stabiel geheel vormen.

Een aparte opgave is het verzorgen van de opnamecapaciteit bij een excentrisch aangrijpend (wind) belasting of bij het wegvallen van bijvoorbeeld een kabel c.q. kolom. Essentieel is het aanbrengen van een element dat de rotatiestabiliteit verzorgt. Dit kan geschieden door met kabels in drie richtingen af te spannen of door diverse punten van het doek met behulp van verbanden (stijve driehoeken) te fixeren.
De belasting op de fundering wordt nauwelijks bepaald door het eigen gewicht van de textielconstructie maar vooral door de benodigde voorspanning, de wind- en de sneeuw-belasting.
Drukkrachten zijn meestal goed af te voeren door middel van palen of een fundering op staal, trekkrachten vereisen meer aandacht. Men kan kiezen voor een compensatie fundering door een 'dood gewicht' aan te brengen, groter ($\gamma = 1{,}2$) dan de maximaal te verwachten trekkracht, of voor actieve opname in de ondergrond door trekpalen of groutankers. De keuze wordt voornamelijk door economische overwegingen bepaald. De opname van trekkrachten vormt, kostentechnisch gezien, een belangrijk onderdeel van het totaal.



Textiel constructie (Tent) van het bevrijdingsmuseum in Groesbeek, ontwerp A.G.M. Croonen, rond 1985. Met behulp van stalen kabels (bij de uitsnijdingen onderin), stalen kegels als drukpunten (onderste rij kegels) en stalen kegels als trekpunten (bovenin) aan kabels en bijbehorende kolommen rondom verbonden, wordt het doek onder spanning gezet en anti-klastisch gemaakt.

Membranen

Hiervoor is duidelijk geworden dat het onder trekspanning staande membraan een belangrijk, integrerend onderdeel van de textielconstructies vormt. Daarnaast dient het bouwfysische taken te vervullen, de waterdichtheid, de winddichtheid en de warmte-isolerende werking.

De chemische industrie levert twee typen weefsels, die als membraan in aanmerking komen, de polyesterweefsels met polyvinylchloride (PVC) coating en de glasvezelweefsels met een polytetrafluorethyleen (PTFE) (lees: Teflon) coating. Beide typen hebben verschillende eigenschappen. Een nieuwe ontwikkeling vormt het weefsel gevormd uit polyaramide vezels (de zogenaamde superweefsels Twaron (Akzo) of Kevlar(Dupont de Nemours). De, nog, zeer hoge prijs staat momenteel een commerciële toepassing in de weg.

Uit een gekozen membraan zal nu een textielconstructie moeten worden opgebouwd. Uitgaande van een gegeven vorm vastgelegd in een model of wiskundige beschrijving kan door daarin gespecialiseerde firma's de toe snijding van het doek bepaald worden.

Ten gevolge van de later in te brengen trekspanning (in de orde van 400- 2.000 N/5 cm) zullen de naden zorgvuldig uitgevoerd moeten worden. Ervaring in de zeilmakerij (stiknaden) en latere ontwikkelingen, zoals lassen door middel van hoogfrequente stroom, het hete lucht lassen, het verlijmen óf het mechanisch klemmen met stalen platen en bouten bieden afdoende mogelijkheden om dit goed op te lossen.



Doorsnede typisch membraan doek opbouw: schering en inslag (weefwerk) van een sterke vezel gemaakt; aan de buitenkant een weersbestendig membraan, aan de binnenzijde bekleed met een waterdicht vlies.



Textielconstructie van het King Fahd Stadium in Riad (Saudi Arabië). Binnen loopt een (hangende) trekring waaraan het doek ook wordt opgespannen.



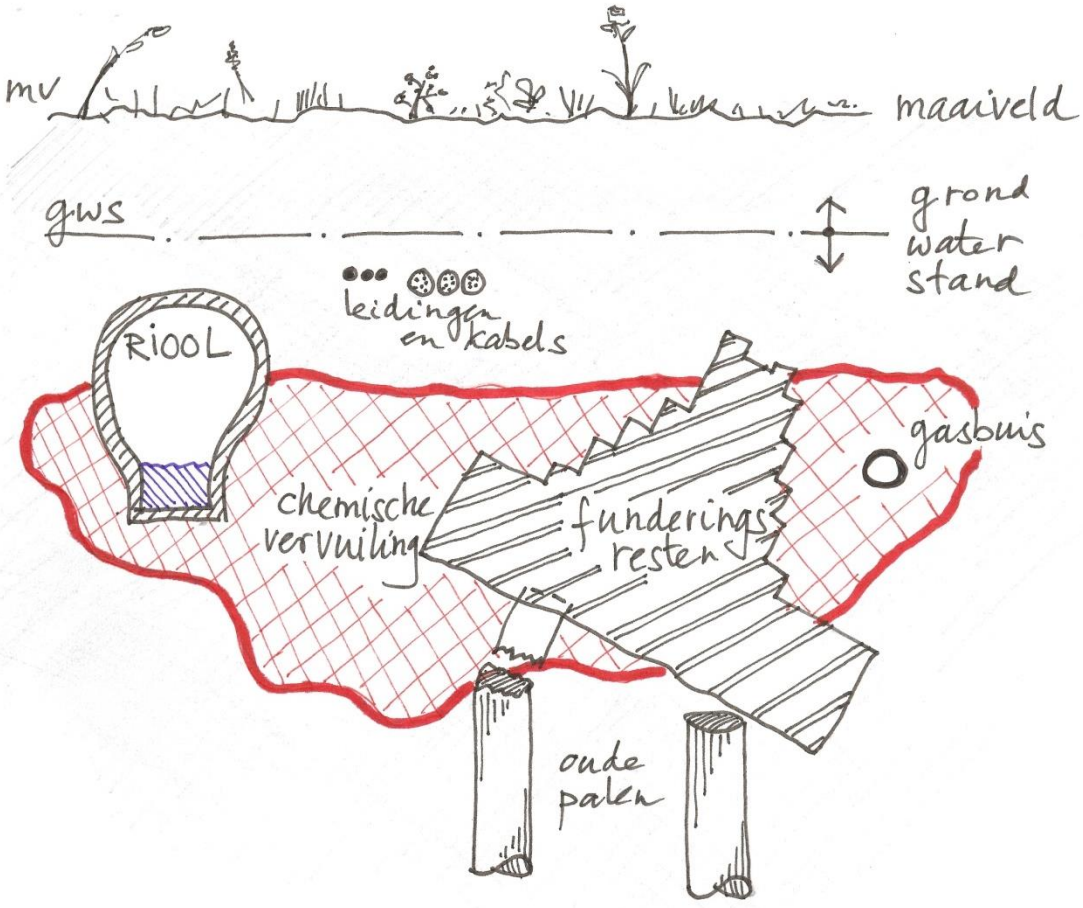
Interieur beeld van het King Fahd Stadium in Riad. De effectieve zonwering en ventilatiemogelijkheden van een textielconstructie in een dergelijk warm klimaat zijn duidelijk.

9 Funderingen

De fundering is een belangrijk onderdeel van een gebouw. Je ziet er niet veel van, het kost een hoop geld en tijd om de fundering te maken maar als dat niet goed of onvoldoende gebeurt zijn de problemen groot. Ernstige verzakkingen met bijbehorende grote scheurvorming, waaruit instortingsgevaar kan voorkomen, zullen het gevolg zijn.
In dit hoofdstuk zullen een aantal constructieve mogelijkheden gegeven worden om zelfs in zeer slappe en dus niet draagkrachtige bodem een hoog en zwaar gebouw neer te zetten. Ook worden de technische mogelijkheden gegeven om een grote bouwput te maken. Een bouwput is een tijdelijk gat in de grond waarin een ondergronds gebouw(-deel) zoals bijvoorbeeld een parkeergarage gemaakt kan worden.

9.1 Onderzoek op de beoogde bouwlocatie

Heeft men een bouwlocatie voor het te bouwen gebouw gevonden dan is het zaak een aantal zaken goed te onderzoeken en daar conclusies uit af te leiden.
De eerste vraag die beantwoord moet worden is: is de locatie bouwrijp? Dat wil zeggen, kan de bouw meteen beginnen zonder dat er nog voorbereidend werk moet gebeuren.



Wat we allemaal in de ondergrond kunnen aantreffen, zoals: oude gebouw- en funderingsresten, chemische vervuiling, kabels, leidingen, riool en . . . het grondwater.

In het kort samengevat:

- Is het terrein toegankelijk/begaanbaar; is de maaiveldlaag voldoende draagkrachtig of moet er nog een aanvulling met zand plaats vinden?
- Staat er nog bebouwing of begroeiing op de bouwlocatie, die verwijderd moeten worden?
- Zitten er gebouw- of funderingsresten in de ondergrond? zeker in de historische binnensteden geen overbodige vraag.
- Liggen er nog leidingen, kabels en/of rioolleidingen in de ondergrond, die in de weg kunnen zitten?
- Op wat voor diepte staat het grondwater en is dit over het jaar gezien constant of fluctueert dit?
- Is de grond misschien (chemisch) vervuild?
- Zijn er archeologische resten?

Dit alles zal door onderzoek en navragen bij bevoegde instanties uitgezocht moeten worden voordat men onbezorgd met de bouw kan aanvangen.

De tweede vraag die beantwoord moet worden is: hoe is de draagkracht van de ondergrond? Kan ik het beoogde gebouw zo neer zetten of moet ik bijvoorbeeld eerst lange palen aanbrengen. Om hier zekerheid over te krijgen is een grondonderzoek noodzakelijk. Hierbij maakt men op de bouwlocatie in een grid van circa 20 bij 20 meter allemaal 'prikken' tot in de diepe ondergrond. Dat 'prikken' noemt men sonderingen maken. Een sondering maakt men door een stalen staaf met een kegelvormig uiteinde langzaam in de grond te duwen. Onderwijl wordt geregistreerd welke weerstand (= puntweerstand) de conus (kegelkop) ondervindt terwijl hij steeds dieper weggedrukt wordt. In Nederland volstaat voor gewone gebouwen een onderzoek diepte tot 25 meter. Ook meet men net boven de conus welke wrijvingsweerstand de stalen staaf langs de schacht ondervindt. Uit het verloop van de puntweerstand en de wrijvingsweerstand tijdens de weg naar beneden kan een deskundige goede uitspraken doen over de samenstelling en draagkracht van de grond en, vooral tot welke diepte men moet funderen om een gezond functionerend gebouw neer te kunnen zetten. Om dit nog beter te kunnen doen maakt men soms nog een paar boringen door een holle buis in de grond te duwen door middel van pulsen tot de gewenste onderzoek diepte. Op de vooraf vastgestelde dieptes kunnen ongeroerde grondmonsters worden genomen met behulp van een steekapparaat. Deze monsters worden in de holle buis mee omhoog gehaald en kunnen nader worden onderzocht in een laboratorium voor grondmechanica.

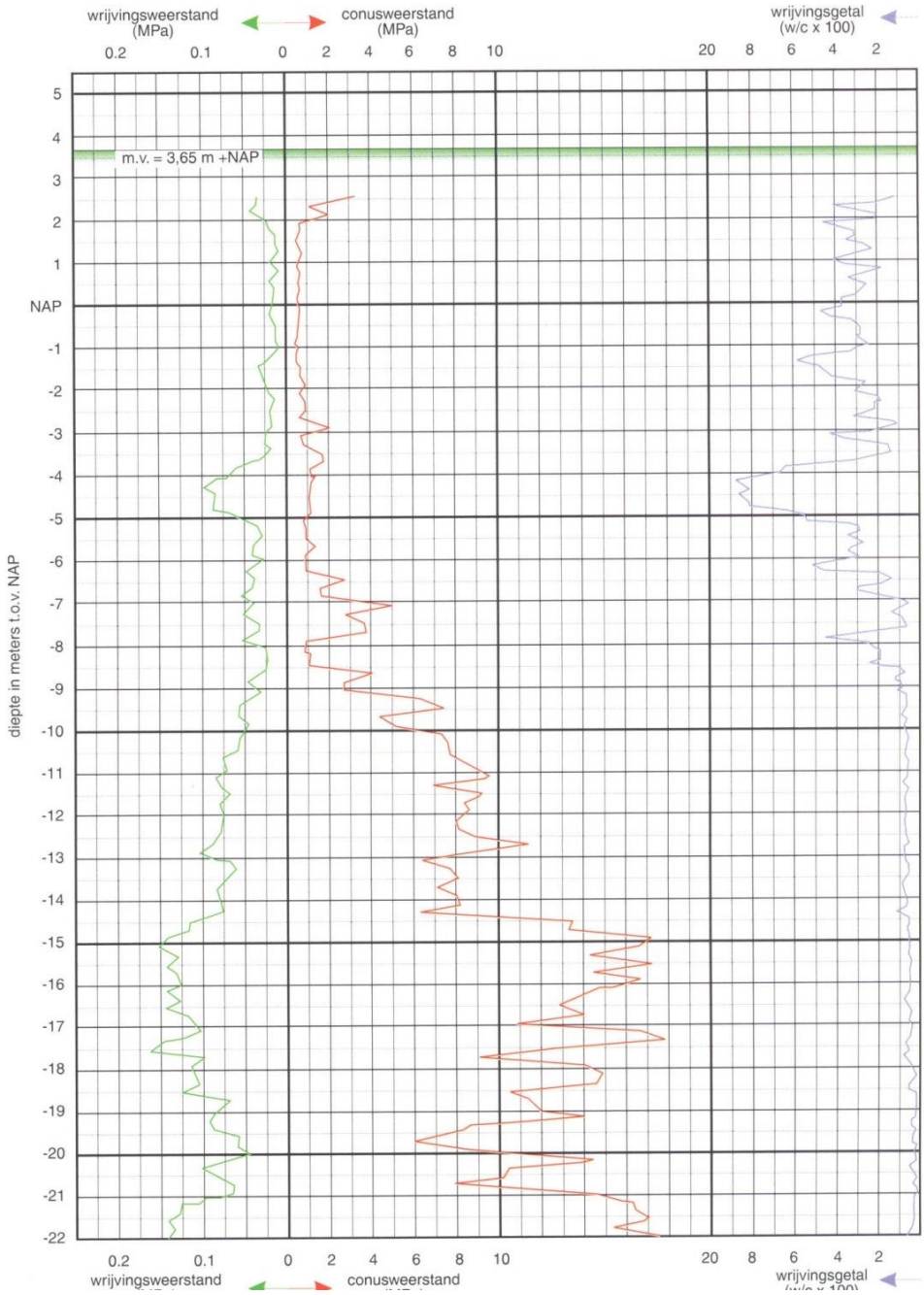
Laten we wat nader naar het verschijnsel grond kijken. Grond is eigenlijk allemaal kleine deeltjes van verschillende soorten door elkaar gemengd. We onderkennen vier hoofdsoorten in Nederland:

Zand: vermalen of verbrijzelde rots van heel fijn tot zeer grof (grind).

Klei: bezinksel vanuit zee of de rivier, dat zich in stilstaand water tot lagen vormt. Het bestaat uit zeer fijne kleimineralen.

Leem: mengsel van fijn zand en klei dat door de grote druk van gletschermassieven in de ijstijd samengeperst is.

Veen: bezinksel uit zoet water, eigenlijk rottende plantenresten die langzaam in de tijd tot een min of meer vaste massa zijn samengekoekt, uiteindelijk, na miljoenen jaren, wordt dit steenkool / aardolie.

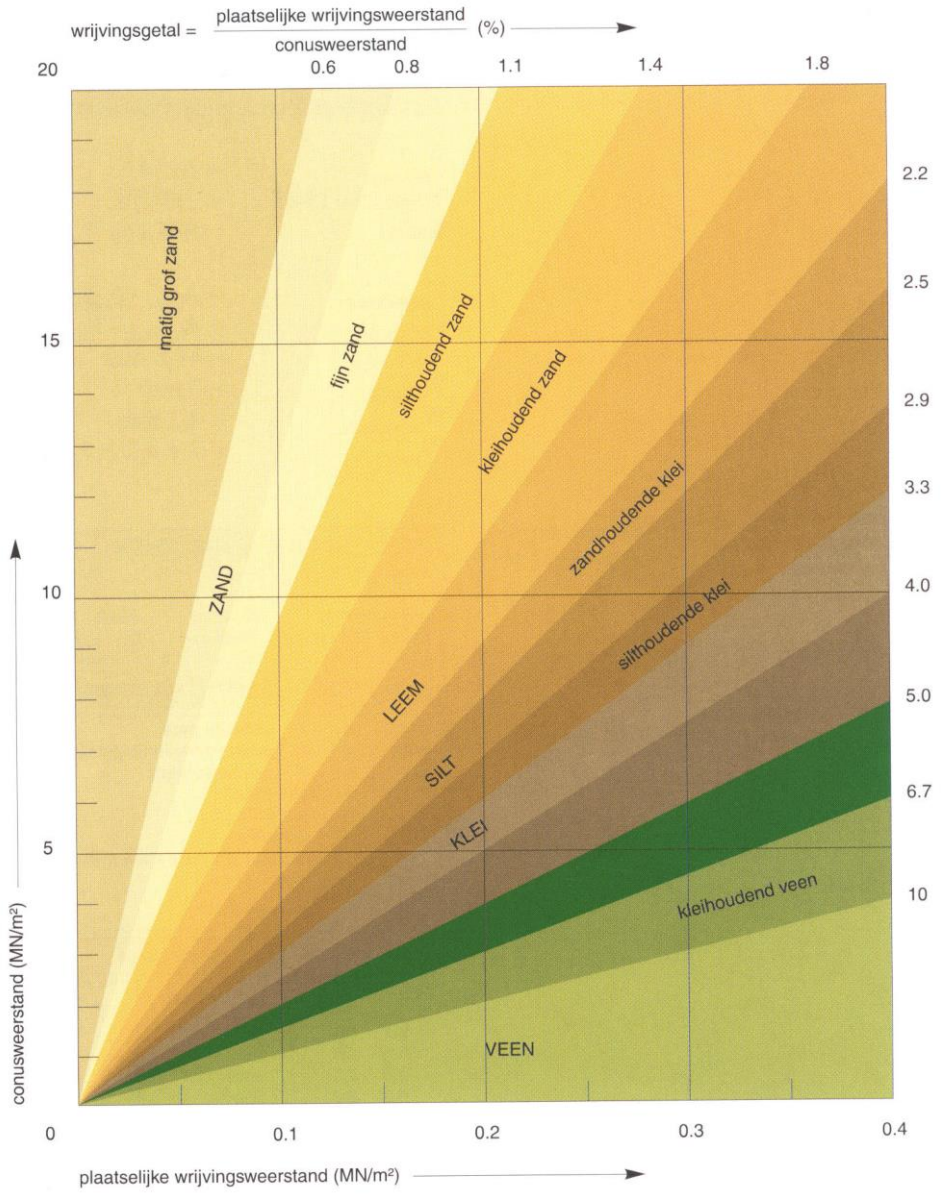


Sondering. Geregistreerd wordt de tegendruk en de wrijving die de conuskop van het sondeerapparaat ondervindt als hij langzaam naar beneden gedrukt wordt. In dit geval blijkt dat op circa 15 meter diepte de draagkrachtige zandlagen beginnen: daar kan de paalfundering op staan.

Zand is vrij stevig en meestal, wanneer niet te los gepakt, een goede funderingsgrondslag. Klei en leem zijn ook wel stevig, veel minder overigens dan zand, maar deze twee worden in de loop van tijd samengeperst: plastische vervorming of kruip en zijn daardoor minder geschikt om op te bouwen. Veen is een zeer slechte funderingsgrondslag, we noemen het wel eens dikke soep, totaal ongeschikt om een gebouw op te zetten.

Meestal komen deze vier soorten in lagen in onze ondergrond voor. Diep (meer dan 15 tot 20 meter) liggen de zandlagen in de IJstijd neergelegd door de rivier of de wind in de

geologische periode Pleistoceen. Daarboven ,afwisselend, lagen klei, veen en weer zand neergelegd door de rivieren in de warme tijd (het Holoceen). Ook kunnen de vier soorten vermengd zijn; zie figuur, de eigenschappen zijn dan ook een mix. Altijd vormt zich een korrelskelet (bij veen minder) dat redelijk drukkrachten kan opnemen en doordat het korrels zijn, slecht trekspanningen opnemen.



De verschillende mengsels grond uitgezet tegen hun sonderingswaarden.

9.2 Hoofdtypes fundering

Na de analyse van de ondergrond hierboven omschreven weten we waar de draagkrachtige lagen zich bevinden in de ondergrond. Dat kan enorm variëren, van stevige granietrotsen op maaiveldniveau (bijvoorbeeld Manhattan, New York, één van de redenen dat hier de eerste echte hoogbouw ter wereld verrees) tot dikke, samengeperste zandlagen 60 meter onder maaiveld (bijvoorbeeld in Pudong Shanghai, waar in de delta van de rivier pas zo diep genoeg draagkrachtig lagen grond, zand in dit geval, zitten om de nu in aanbouw zijnde Shanghai Tower, een hoogbouw van 630 meter, te dragen).

Afhankelijk van de ligging van de draagkrachtige lagen ten opzichte van de onderkant van het gebouw (onderkant laagste kelder) hebben we de volgende keuze mogelijkheden voor de fundering:

1. Draagkrachtige laag direct onder de onderkant van het beoogde gebouw.

In dit geval kan men na het graven van een gat voor het gebouw, de bouwput, met bouwen beginnen. We noemen dit funderen op staal, een verwarrende naam want er is geen staal te zien. Het is eigenlijk een oud Hollands woord, verwant aan het woord stal (voor dieren) en betekent 'zoals het eruit ziet': goed aangestampte grond.

2. Draagkrachtige laag tot max. 2 à 3 meter onder de onderkant van het beoogde gebouw.

Als dit het geval is moeten we overwegen of het de moeite loont om de slechte grond weg te halen en te vervangen door draagkrachtig zand tot niveau onderkant gebouw. Dit zand moet in lagen van circa 30 centimeter aangebracht worden en steeds weer, per laag goed afgetrild worden om zakkingen uit te schakelen. Wij noemen deze funderingsmethode grondverbetering.

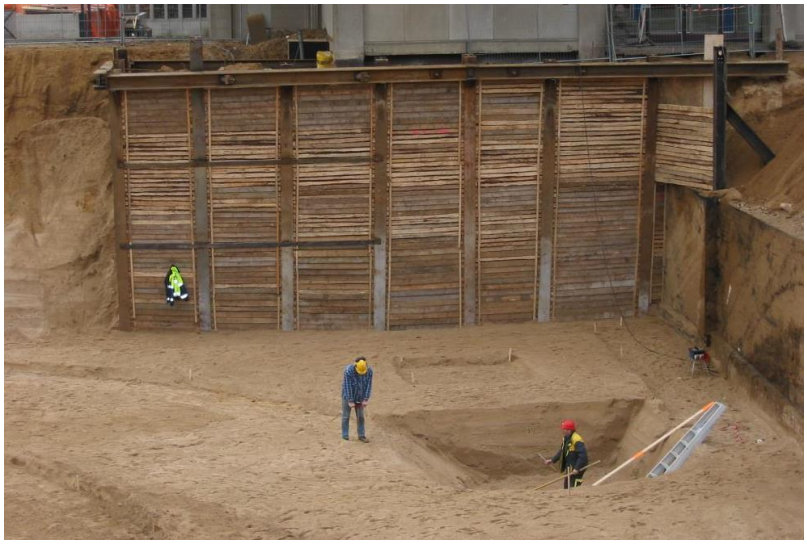
3. Draagkrachtige laag van 2 à 3 meter tot veel verder, in het buitenland soms zelfs wel 60 tot 80 meter!, onder de onderkant van het beoogde gebouw.

We zullen nu hulpconstructiemiddelen moeten gebruiken en dat zijn palen, zoals houten, betonnen of zelfs stalen palen die in de grond aangebracht worden en zo lang zijn dat hun punt goed in de draagkrachtige laag staat. Deze funderingsmethode noemen we paalfundering. Het gebouw staat eigenlijk op lange kolommen die zelf weer op de draagkrachtige laag staan. Positief is dat de grond rondom de palen afdoende horizontale steun geeft om knikken van de soms zeer lange en slanke kolommen te vermijden.

Ook zijn er in specifieke gevallen hybride funderingen mogelijk: een combinatie van een fundering op palen en op staal, zoals toegepast bij de hoogbouwtorens van het kantorencomplex van Rabo in Utrecht.

9.3 Fundering op staal

Fundering op staal betekent dus bouwen op de ondergrond zoals je die aantreft als je de benodigde uitgraving voor het beoogde gebouw gedaan hebt. Je hoeft dus op zich niets meer te doen maar dat moet je nog wel goed controleren door met een hand-sondeer-apparaat te testen of de bodem inderdaad stevig genoeg is. Meestal stellen we als eis dat de ondergrond minimaal 4 N/mm^2 druk moet kunnen opnemen. Slechte delen kun je weggraven en door goed zand, netjes afgetrild, vervangen; dit noemen we grondverbeteren.



Bouwputbodem fundering. De fundering van het gebouw zal op staal worden uitgevoerd. De linker man voert met een hand-sondeerapparaat controle uit op de draag-kracht van de ongeroerde grond.

9.4 Hoofdtypes paalfundering

Paalfundering kunnen worden onderscheiden naar materiaal en naar wijze van aanbrengen.

Qua materiaal:
Houten palen: eigenlijk boomstammen ontdaan van takken, top en wortels.
Betonnen palen: gewapend en/of voorgespannen; geprefabriceerd of in de grond gevormd.
Stalen palen: meestal buizen, die al dan niet met (gewapend) beton gevuld kunnen worden.

Qua wijze van aanbrengen:
Heien: Door met een zwaar gewicht er bovenop te slaan, vroeger letterlijk met menskracht, tegenwoordig met machines,
Schroeven of boren, soms ook door (hydraulisch) persen of duwen.

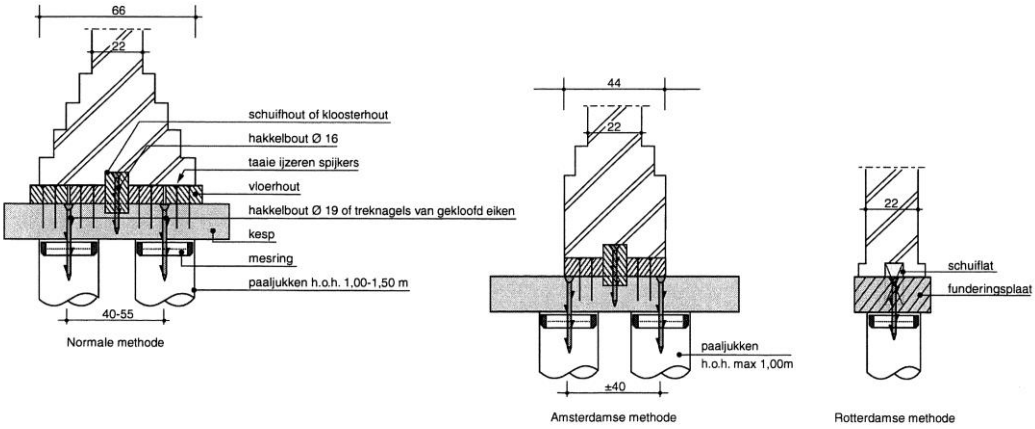
Palen dragen op twee manieren het gewicht dat erop staat: door de puntweerstand (de kracht nodig om de paal verder te duwen) en de kleefweerstand (de ondervonden wrijving langs de hele schacht van de paal). De puntweerstand is meestal groter dan de kleefweerstand. Toch kan de kleef in sommige bodemopbouwen of -samenstellingen een belangrijke rol spelen, zeker als de palen relatief diep in de draagkrachtige zandlaag staan. We hebben de kleef vooral nodig indien er trek op de palen kan komen te staan. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren bij de opname van het kantel moment ten gevolge van de windbelasting op een gebouw. Ook palen onder een keldervloer kunnen door de opwaartse waterdruk op trek worden belast.

Palen kunnen eigenlijk alleen axiale krachten opnemen, qua weerstand tegen horizontale krachten is er van de lange slanke palen weinig te verwachten. Om toch horizontale krachten bijvoorbeeld ten gevolge van de wind op te nemen kunnen we de palen schoor zetten, dat wil zeggen onder een hellingshoek van max. 3:1 (vert. : hor.) aanbrengen. Ook kan de paal worden voorzien van extra wapening of kan een paaltype worden gekozen met meer opnamecapaciteit voor horizontale belasting zoals een stalen buispaal.
Meestal zorgt men er echter voor dat de drukbelasting in de paal ten gevolge van de verticale krachten in een gebouw zo groot zijn dat de trekkrachten opgeroepen door het kantel moment van de wind niet groot genoeg zijn om de drukbelasting op te heffen.

9.5 Houten palen

Houten palen zijn de eerste paalfunderingen die door de mens gebruikt zijn. Na veel vervelende ervaringen met wegzakkende en scheurende gemetselde gebouwen zal men geprobeerd hebben extra steun in de ondergrond te vinden. Dit is gevonden door houten palen, zoals al vermeld eigenlijk boomstammen waarvan de takken, de (dunne) top en de wortels verwijderd zijn, in de grond te slaan net zo lang tot er goede weerstand ondervonden werd. Deze vorm van inbrengen van palen noemen we heien op stuit. Net zo lang erop slaan met een groot gewicht tot de paal goed vast zit in de bodem.

Een gevaar bij houten palen is dat de houten paal kan gaan rotten. Dit zal in het algemeen alleen gebeuren als het hout in contact met lucht kan komen anders kunnen insecten en schimmels die het hout aantasten niet overleven. Het is daarom zaak dat de houten paal onder de grondwaterstand blijft, zodat deze niet kan rotten. Onder water is wel aantasting van bacteriën mogelijk, vooral bij grenen palen. Als de grondwaterstand ver onder maaiveld ligt, moet een betonnen bovenstuk (een opzetter of oplanger) op de houten paal worden bevestigd om zeker te weten dat de houten paal onder de grondwaterstand blijft.
Houten palen hebben niet veel draagvermogen en zullen niet langer kunnen zijn dan zo'n 20 meter. Ze zijn wel relatief goedkoop en kunnen met eenvoudige apparatuur aangebracht worden.



Verbinding houten paalfundering met metselwerkmuren. Amsterdams: paarsgewijs, Rotterdams: rij palen achter elkaar. Het was zaak al het hout onder de grondwaterstand (in de modder dus) aan te brengen. Let ook op het schuifhout (opname horizontale (wind bv) krachten) en de hakkelbouten (voor opname trekkrachten).

9.6 Betonnen prefabpalen

Betonnen palen kunnen in de fabriek vooraf vervaardigde palen zijn maar kunnen ook in de grond gestort worden; dat noemen we boor- of schroefpalen. Later wordt dit type nader uitgelegd. De prefab betonnen palen zijn vrijwel altijd vierkant qua doorsnede en variëren van vierkant 180 mm tot vierkant 500 mm. De lengte van de prefab betonnen palen is maximaal 35 meter (afhankelijk van dwarsafmeting en mogelijkheid vervoer over de weg).



De hijskraan op rupsbanden tilt een prefab paal op en hangt deze in de heistelling die de paal op de gewenste diepte gaat heien.



Plaatje heiwerk betonnen palen; let ook op de kalenderstreepjes op de paal!

Betonnen palen kunnen gewapend worden en bovendien voorgespannen. Dat is nodig om de buigende momenten op te nemen die ontstaan tijdens het transport en het ophijsen tijdens het hei-proces. Ook tijdens het heien worden er trekspanningen in de paalschacht gegenereerd. Als er in de gebruiksfase trekkrachten op de palen kunnen worden uitgeoefend, is eveneens wapening en/of voorspanning nodig. De wapening kan ook goed gebruikt worden om de paal stevig aan de funderingsplaat of poer van het gebouw te verbinden. Hiertoe laat men een halve meter paal boven niveau uit steken, hakt het beton van die meter paal weg (koppensnellen) en vlecht de vrijgekomen paalwapening door de wapening van de fundering van het gebouw.

Om zeker te weten dat de geheide prefab betonpaal in een draagkrachtige laag zit, wordt de onderste 1,5 meter van de paal gekalenderd. Dit betekent dat er minimaal 7 streepjes bovenop de paal gezet worden 25 centimeter uit elkaar (6 stukken dus). Als de paal aan zijn laatste 1,5 meter naar beneden gaat beginnen, houdt men bij hoeveel slagen er nodig zijn om de paal 25 centimeter (een zogenoemde tocht) de grond in te slaan. Dit noemt men kalenderen. De benodigde kalenderwaarde wordt tijdens het heiwerk vastgesteld en is afhankelijk van het sondeerbeeld (vastheid van de zandlaag) en de hei-energie. In het algemeen wordt de capaciteit van het heiblok zodanig gekozen dat een kalenderwaarde van minimaal circa 20 slagen per 25 cm wordt gehaald. Bij minder dan 20 slagen moet de paal dieper weg geheid worden totdat de 20 slagen over 25 centimeter zakking wel gehaald worden.

Een geheide en gekalenderde betonnen paal kent twee grote voordelen ten gevolge van het heien. Ten eerste wordt door het grondverdringende karakter van het heien de grond in de omgeving van de paalpunt enorm verdicht. Hierdoor stijgt het draagvermogen van de paal. Ten tweede heeft men door het kalenderen een 'bewijs' dat de paal afdoende draagvermogen heeft. De moeite die men moet doen om de paal 25 centimeter dieper te heien, is in relatie met de sondering een zeer goede maatstaf hiervoor. Het grote nadeel van heien is, naast het lawaai, vooral de grote trillingen die tijdens heien in de ondergrond kunnen ontstaan. Deze trillingen zijn zo krachtig dat oude, zwakke gebouwen kunnen gaan scheuren en zelfs instorten.

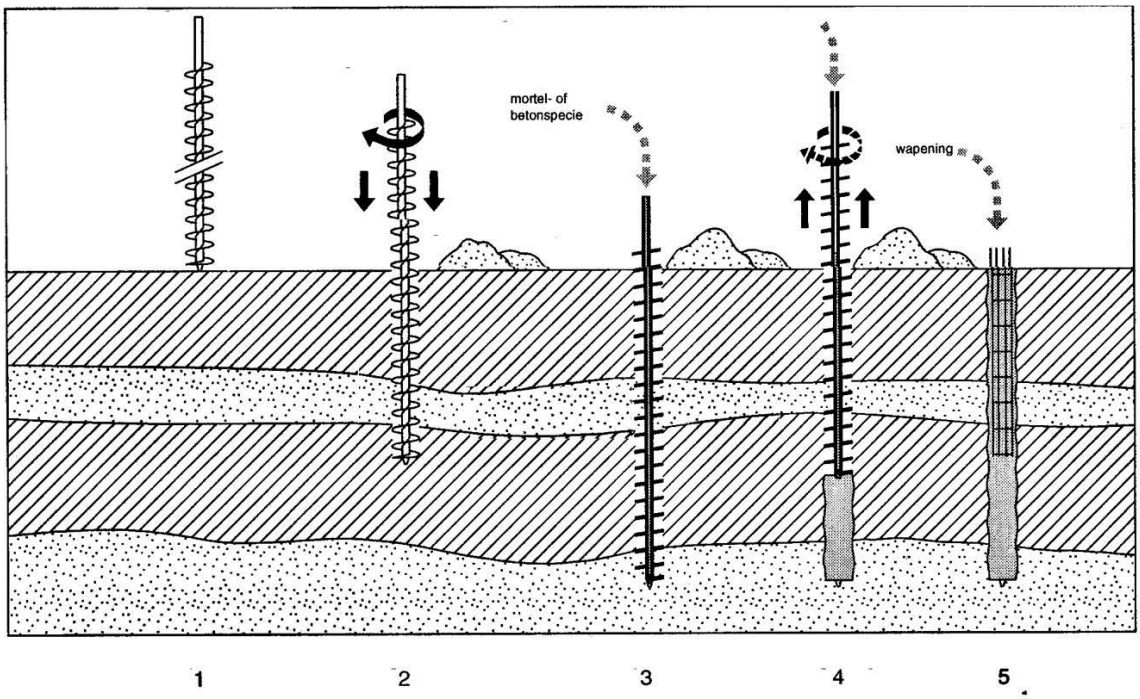
9.7 Schroefpalen

In een historische binnenstad met allemaal kwetsbare monumenten is heien uit den boze. Als we de palen niet in de grond mogen brengen door heien dan zullen we moeten schroeven of boren. Hiervoor is de schroefpaal ontwikkeld. Daarrvan zijn er twee hoofdtypen: de avegaarpaal (een mortelschroefpaal) en de grondverdringende schroefpaal.

Voor het inbrengen van de avegaarpaal wordt met een grote avegaarboor, aangedreven door een motor, een gat geboord tot in de draagkrachtige laag. De benodigde funderingsdiepte is uit het grondonderzoek afgeleid. Vervolgend wordt onder grote druk uit de holle booras beton gespoten in het gat dat in de grond achterblijft als de boor langzaam omhoog getrokken wordt. Zodoende ontstaat in de grond een ter plaatse gestorte paal van beton.



Boorinstallatie voor avegaarpalen.



Uitvoeringsstappen mortelschroefpaal of avegaarpaal; een, trillingsvrije, in de grond aangebrachte paal.

Aangekomen op maaiveld stopt het spuiten van beton en wordt direct een wapeningskorf in de verse betonspecie aangebracht. Vervolgens kan de paalschacht gaan verharden in de grond. Voordat het beton hard is kan men zelfs een staalprofiel als versterking van de paal in laten zakken. Hierdoor kunnen trekkrachten of (horizontale) schuifkrachten uit het gebouw beter opgenomen worden door de fundering.

Een avegaarpaal of mortelschroefpaal heeft een aantal voordelen. Zo hoef je niet eerst palen te bestellen bij de prefabbetonpalen fabriek en daar op moeten wachten maar kun je meteen beginnen op de bouwplaats en de lengte van de paal kun je één op één aanpassen aan de diepteligging van de draagkrachtige laag. Ook is dit paalsysteem goedkoper dan een geheid palen systeem. Natuurlijk is het afwezig zijn van trillingen (en lawaai) ook een belangrijk voordeel.
Toch zijn er ook een aantal behoorlijke nadelen. Doordat de grond rondom de paalpunt niet verdicht wordt door het heien is het draagvermogen van een geboorde paal beduidend lichter dan een geheide paal van het zelfde diameter. Ook kunnen we niet kalenderen en weten we daardoor niet 100% zeker of de paal wel goed in de draagkrachtige laag staat. Eigenlijk zouden we op zoek moeten gaan naar een paalsysteem dat de voordelen van beide systemen, het geheide en het geschroefde paalsysteem in zich verenigd. Het ideale systeem is daar nog niet voor gevonden maar het volgende paalsysteem, de grondverdringende schroefpaal, komt aardig in de buurt.

Een aardige mogelijkheid met avegaarpalen is het vormen van een palenwand in de ondergrond. Hierbij brengt men eerst één paal met diameter D in de ondergrond aan. Vervolgens zet met op iets minder dan 2D afstand het hart van de volgende boorpaal neer. Vervolgens weer een nieuwe boorpaal op iets minder dan 2D afstand waarna men met de boorstelling terug gaat naar het gat tussen de eerste twee aangebrachte palen en daar een nieuwe boorpaal tussen de twee reeds enigszins verharde palen in zet. De boor van de nieuwe paal schrapt dan de reeds verharde randen van de twee buur palen af en er ontstaat

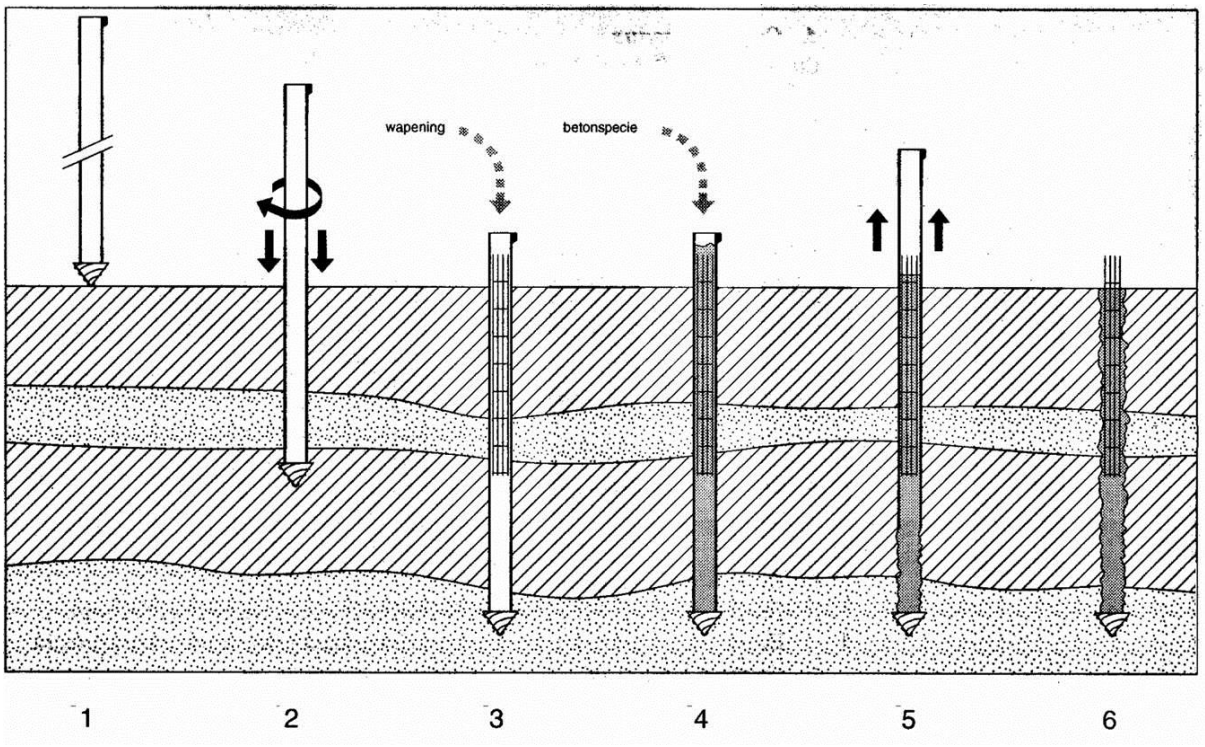
een continue wand van palen als men deze hink stap-sprong voor en achteruit van palen aanbrengen voortzet.



Boorpalen wand, de palen zijn tegen buiging door de gronddruk, versterkt met een stalen profiel. Let ook op de stempeling (steun) aan de bovenzijde van de kerende boorpalenwand met stalen buizen. Bemaling met pompen in een sleuf voor de palenwand.

Evenals de geboorde palen worden ook de grondverdringende schroefpalen in de grond gevormd en ook deze wijze van 'heien' is trillingsarm. Bij dit systeem wordt een gladde stalen hulpbuis, voorzien van een verloren schroefpunt in de grond gedraaid. Als de schroefpunt op diepte is, wordt een wapeningskorf aangebracht en vervolgens de betonspecie gestort. De hulpbuis wordt daarbij omhoog getrokken. Door meting van de indringingsweerstand bij het schroeven is een indicatie van de vastheid van de zandlagen mogelijk.

Evenals bij de avegaarpalen geldt ook voor deze palen dat er geen levertijd is zoals bij prefab palen. Ook is er geen transport van (lange) palen nodig en kan de lengte in het werk gemakkelijk worden aangepast op basis van kalenderwaarde. Risico paalbreuk is niet aanwezig. Door grondverdringing zijn de draagkracht en vervormingseigenschappen gunstiger dan bij avegaarpalen. Vanwege omgevingseisen (geluid, trillingen) wordt dit systeem steeds vaker toegepast, ondanks dat het een relatief duur systeem is.



Uitvoeringsstappen grondverdringend paalsysteem, combinatie inheien (verdichting + kalenderen mogelijk) en in de grondgevormde paal.

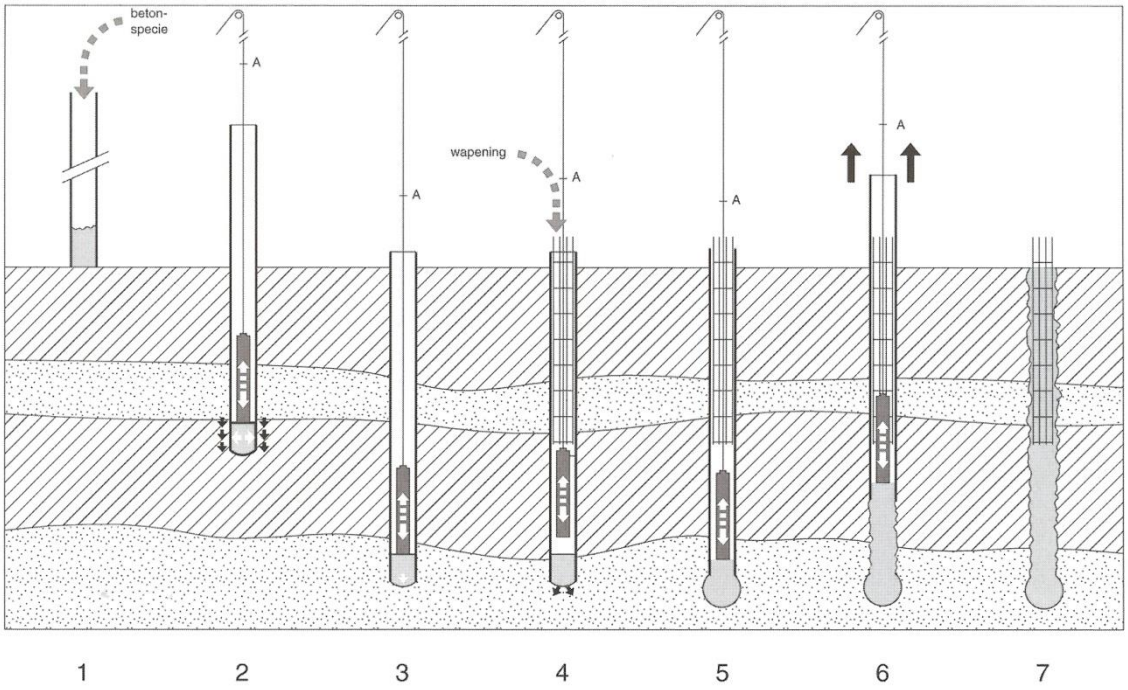
9.8 Buispalen

Buispalen zijn, zoals de naam al zegt, palen die met behulp van een stalen buis vervaardigd worden. Deze buis kan permanent in de grond achterblijven maar ook weer omhoog getrokken worden (twee verschillende types buispaal dus).

Mogelijke uitvoeringswijzen zijn:

- Heien op de buis; buis voorzien van voetplaat; in feite een stalen prefab paal.
- Heien of soms trillen op de buis; open holle buis, in het algemeen grote diameter; t.b.v. grote belastingen en grote dieptes; bv. offshore platforms, brugpijlers, hoogbouw buitenland.
- Heien in de buis; voor situaties in bijzondere omstandigheden, kleine ruimtes e.d., renovaties, geheid met valblok die op de vastgelaste deksel valt.
- Geschoefde palen; stalen buis voorzien van een schroefpunt, al of niet met een groutinjectie.
- Ankerpalen, geboord of geschroefd, met groutinjectie ter verhoging van de trekcapaciteit; met name toegepast onder keldervloeren t.b.v. opname trekbelasting in verband met opwaartse waterdruk.

In grote lijnen gaat het vervaardigingsproces van een buispaal zo: men legt op de grond (maaiveld) een dikke, ronde stalen plaat neer met erop gelast een stalen randje. Over dit randje heen zet men een stalen buis op de stalen voetplaat. Nu gaat men in de buis heien door een zwaar gewicht op de stalen voetplaat te laten vallen. Hierdoor wordt de stalen voetplaat steeds verder weggeheid terwijl de stalen buis de voetplaat volgt.



Uitvoeringsstappen buispaalstelling. In dit geval wordt op een beton 'prop' geheid. Dit kan ook een stalen voetplaat zijn, die ook in de grond blijft zitten. Voor dit paaltype wordt de stalen buis weer eruit getrokken en is dus weer herbruikbaar voor de volgende paal. Het is echter ook mogelijk de stalen buis te laten zitten. Een groot voordeel hiervan is een hoger paaldraagvermogen daartegen staat dat men de stalen buis 'kwijt' is, dus hogere kosten.

Als men op de beoogde fundering diepte is aangekomen, kan men de paal ook nog kalenderen door de zakking van de stalen buis te meten (hoeveel slagen zijn nodig voor 25 centimeter paal zakking). De (holle) buispaal is nu op diepte en men kan overgaan op het storten van de betonnen paal. Hiertoe wordt de stalen buis helemaal gevuld met beton, als dat gebeurd is wordt de stalen buis langzaam omhoog getrokken. De stalen voetplaat blijft dus op diepte zitten en terwijl de stalen buis langzaam omhoog gaat stroomt het nog vloeibare beton in het gat dat in de grond gevormd is en vult dit helemaal op.
Boven aangekomen wordt de stalen buis naar de volgende paallocatie gebracht en kan de in de grond gevormde betonpaal verharden. Als dat nodig is kan men nog een wapeningskorf of een staal profiel in het nog niet verharde beton laten zakken. Daardoor stijgt de opname capaciteit voor trekkrachten of (horizontale) schuifkrachten van de paal enorm. De buispaal combineert dus het in de grond gevormd zijn van de boor- of schroefpaal met het verdichten van de grond van de geheide paal. Helaas blijft het bezwaar van grote trillingen veroorzaken nog keihard overeind staan.
Buispalen kunnen echter in grote diameters en tot zeer grote diepte aangebracht worden, bijvoorbeeld door stukken buis op elkaar te lassen. In het buitenland staan de hoogste gebouwen juist daarom op buispalen. De huidige wereldkampioen de Burj Khalifa in Dubai, 828 meter hoog, staat op slechts 192 buispalen met een diameter van 1,5 meter en een lengte van 50 meter! Soms kiest men er zelfs voor om de stalen buis te laten zitten teneinde meer draagvermogen voor de paal uit de stalen buis zelf te kunnen halen.

Een aardige variant van een buispaal is de renovatie paal. Hiermee is het mogelijk zelfs in een gebouw een nieuwe paal aan te brengen. De bijbehorende heistelling past door een normale deur en kan daardoor overal in het gebouw gebracht worden. Op de juiste plek

aangekomen wordt een stalen buispaal, klein stukje buis na klein stukje buis, op elkaar vast gelast, in de grond aangebracht. Een andere variant is een gedrukt paalsysteem waarbij een vijzelsysteem in een inkassing in de muur wordt geplaatst en slanke paaltjes in segmenten kunnen worden weggeperst. Zo kunnen dus in de verzakkende monumentale grachtenpanden in Amsterdam nieuwe palen in de kelders van die panden aangebracht worden.



Renovatiepaal-stelling, in de kelder van een bestaand gebouw. Heien door middel van een valgewicht in de buis. Door steeds weer een buisstuk erbovenop te lassen of klemmen kan de lengte van de paal zodanig vergroot worden dat men op de juiste diepte kan komen waar de paal goed draagvermogen kan genereren.

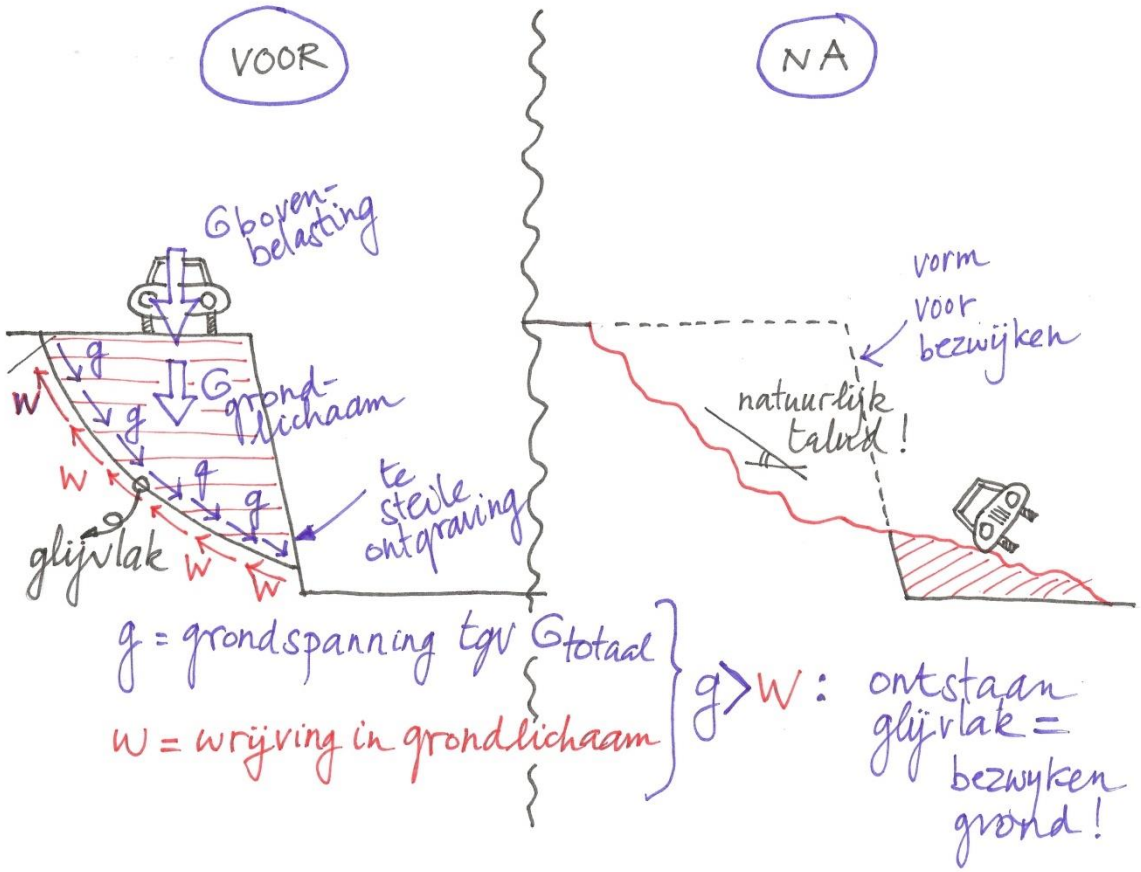
9.9 Bouwputten

Als we een ondergronds gebouw of gebouwdeel, zoals een kelder moeten maken, zullen we een gat in de grond moeten graven waarin we dat betreffende gebouw of gebouwdeel kunnen maken. Dat betekent dat we twee zaken zullen moeten verwijderen: de grond zelf

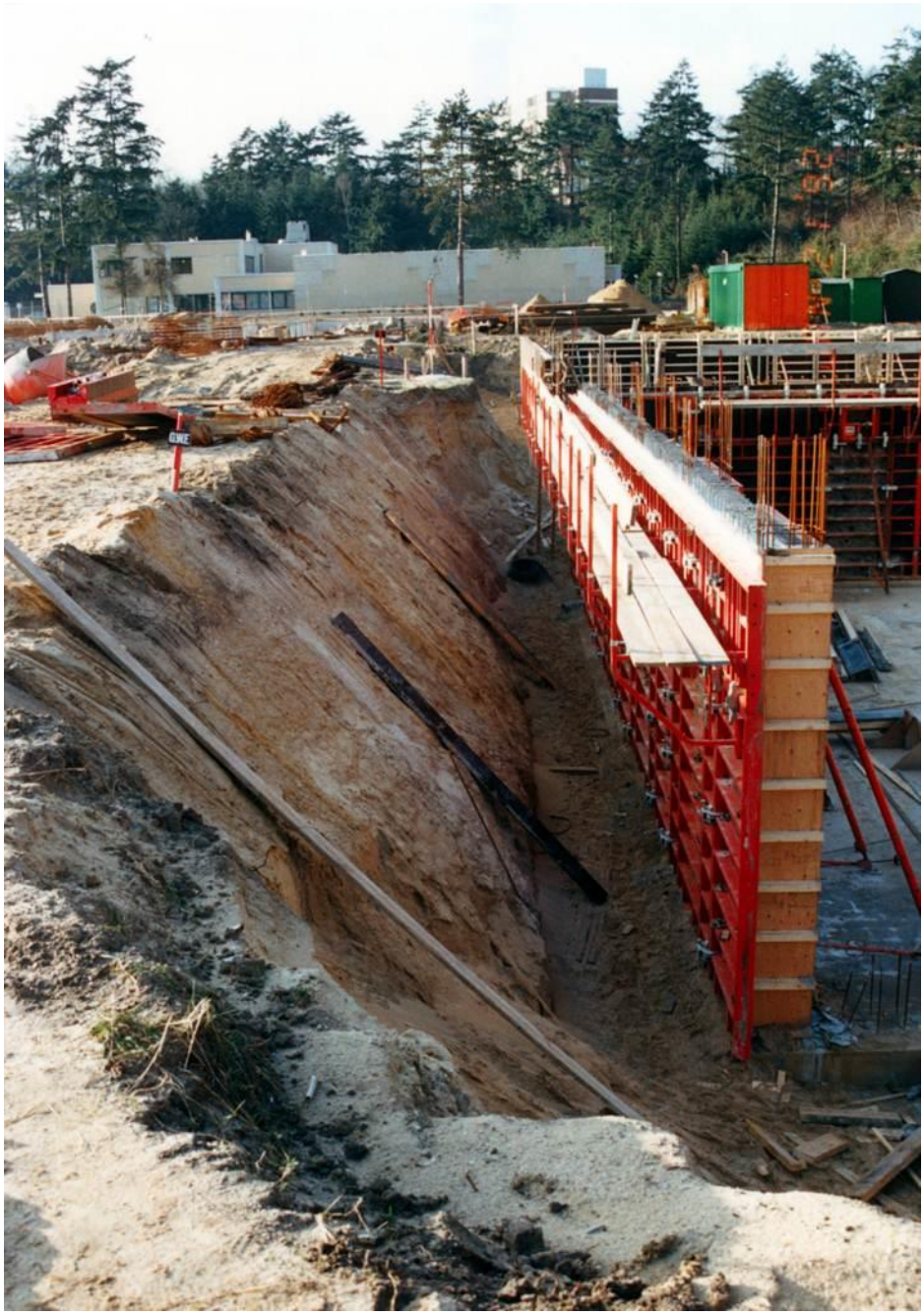
maar ook het grondwater dat plaatselijk aanwezig kan zijn. De grond zelf zullen we weg kunnen graven, het grondwater zullen we weg moeten pompen en beheersen.
Bij het weggraven is een punt van de zorg de stabiliteit van de randen van de ontgraving, zeker bij natte grond (invloed grondwater). Deze mogen niet instorten als er toevallig een vrachtauto, zwaar beladen met uitkomende grond, langsrijdt. Een punt van zorg bij het wegpompen van het grondwater is dat we niet moeten blijven pompen omdat we al het grondwater uit de omgeving naar ons toe zuigen. Bij een korrelige opbouw van de ondergrond zoals bijvoorbeeld zand is dit een groot gevaar, bij een meer dichte samenstelling van de ondergrond zoals klei of leem is dit gevaar veel minder aanwezig.

Bouwputten met vrij talud

Als er geen bouwwerken in de directe buurt staan en het grondwater staat diep, beduidend onder het laagste ontgravingsniveau, dan kunnen we de bouwput in een zogenaamd vrij talud ontgraven. Hierbij laten we de randen van de ontgraving onder een helling lopen, die helling noemen we het talud. De gewenste helling is het zogenaamde vrije talud: de hoek waaronder een vrij gestorte hoop grond door de zwaartekracht als het ware zelf gaat staan. Deze helling zal voor los, droog zand vrij vlak zijn, meestal rond de 30 graden maar voor nat zand vermengd met klei kan deze helling veel steiler zijn. Bij dit vrije talud is er evenwicht in de schuifspanningen die in de ondergrond ontstaan als er een bovenbelasting op wordt uitgeoefend. Bij een steilere helling dan het vrije talud zal bezwijken van de ondergrond optreden; het zogenaamde glijvlakken mechanisme zodat de vrije helling als nog ontstaat.



Een 'natuurlijk' talud vormt zich 'vanzelf' als de grond bezwijkt via een glijvlak, dat ontstaat als de glij-spanningen opgeroepen door de bovenbelasting en het gewicht van het grondlichaam groter worden dan de wrijving die de grondkorrels kunnen opbrengen.



Vrije helling bij open bouwput. De grondwaterstand ligt dus duidelijk onder laagste ontgravingsniveau.

Bouwputten met een kunstmatige omranding

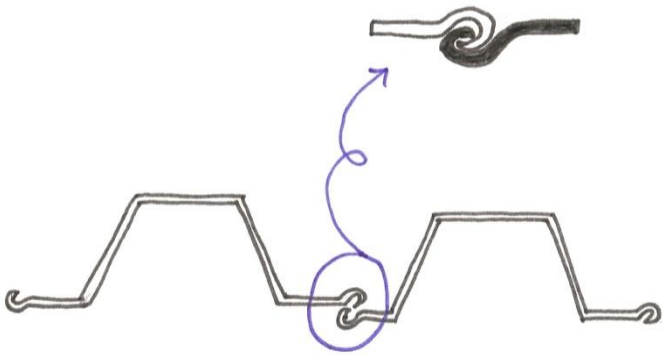
Als er de ruimte niet is om een vrij talud te maken, bouwwerken dichtbij staan (invloed glijvlak!) of het grondwater speelt een vervelende rol dan zullen we een kunstmatige omranding moeten maken om de benodigde bouwput contouren heen (= gebouwmaten zelf plus genoeg werkruimte er om heen). Deze kunstmatige omranding kan zijn:

- Een eenvoudige wand opgebouwd uit staalprofielen en houten platen of planken, het zogenaamde Berliner Verfahren (of Berliner wand); let op: deze heeft geen grondwaterkerende functie!



'Berliner Verfahren' wand van een bouwput. Ingeheide stalen profielen met er tussen geschoven houten balken als grondkering. De fundering van het gebouw zal 'op staal' uitgevoerd worden. De linker man voert met een handsondeerapparaat controle uit op de draagkracht van de ongeroerde grond.

- Een stalen damwand; dit is een gevouwen stalen plaat die door het vouwen buigstijf is geworden. De stalen damwand planken kunnen trillend of heiend ingebracht worden of hydraulisch naar beneden geperst als de trillingen bezwaarlijk voor de omgeving zijn. De damwandplanken vallen met een zogenaamd slot in elkaar zodat de voeg redelijk waterdicht is. Er bestaan tegenwoordig ook (hoge sterkte) betonnen damwandplanken.

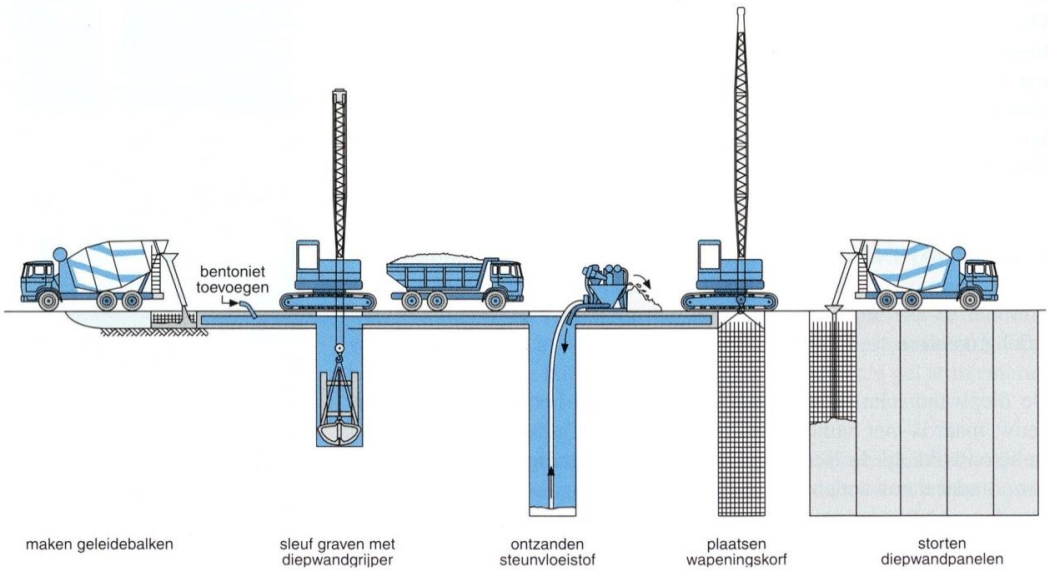


De losse stalen damwandplanken grijpen met 'handjes' (= het slot) in elkaar zodat ze een aaneengesloten wand vormen.

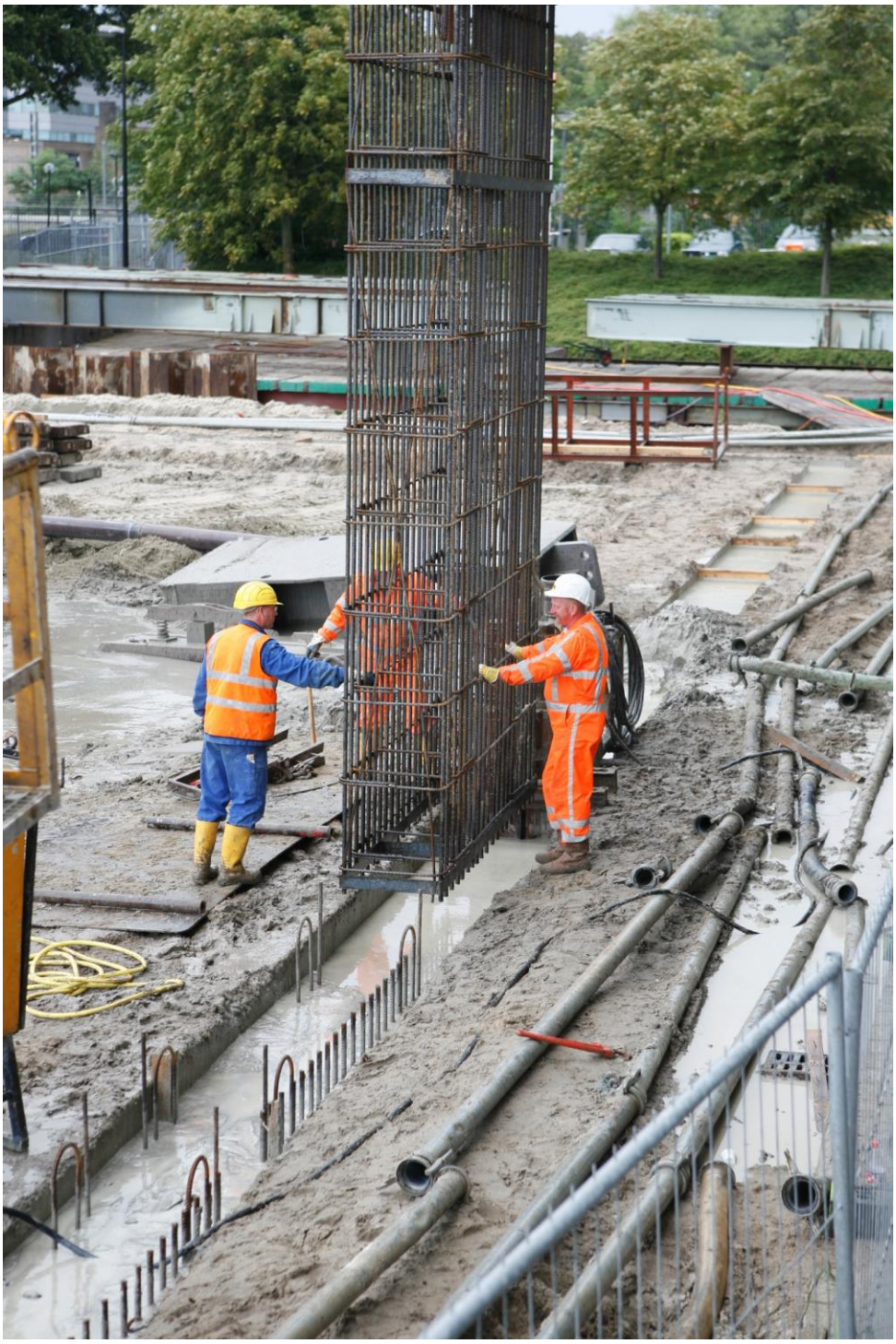


Plaatje aanbrengen planken voor een stalen damwand. Hier door pneumatisch indrukken; totaal geen trillingen! Kan ook ingebracht worden door een trilmachine of heien op de stalen damwandplank, dan wel weinig (trillen) of veel trillingsoverlast (heien).

- Een diepwand, hierbij worden betonnen wandpanelen ter plekke in de grond gestort. De paneelbreedte en dikte hangt af van de graafmachine waarmee gewerkt wordt, de diepte is in wezen onbeperkt. Diepwanden zijn de sterkste en stijfste bouwput omrandingen die we kunnen maken.



Vervaardigings cyclus diepwand.

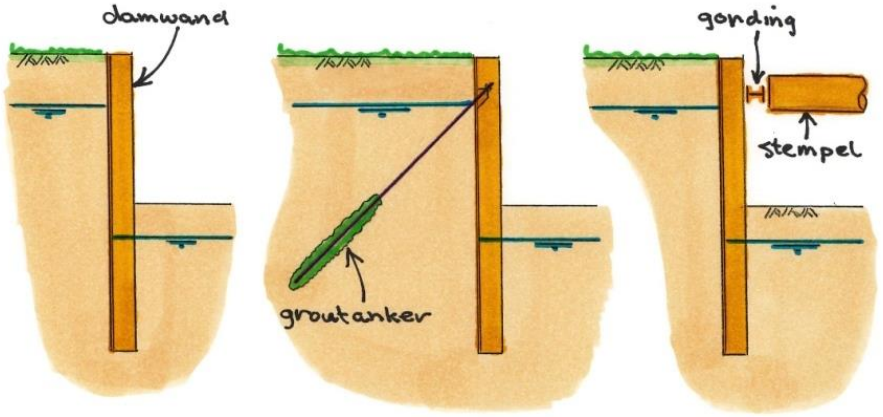


Betonnen diepwand; plaatsing wapeningskorf in de met betoniet (vloeibare kleipap) gevulde, pas gegraven sleuf. Na plaatsing wapening wordt het beton gestort.

Bij damwanden, diepwanden en palen wanden is de waterdichtheid van de wanden van de bouwput redelijk verzorgd. Lekkage bij naden en randen is echter een probleem dat continue aandacht vraagt.
Als bouwput behoorlijk diep moet zijn, ontstaat het gevaar dat de gronddruk tegen de bouwputwand (damwand of diepwand) de bouwputwand naar binnen toe zal duwen of zelfs zal doen instorten. Het risico is dan dat i.v.m. de grote uitbuiging van de bouwputwand de achterliggende grond gaat vervormen met kans op schade van de belendingen.

Als een sterker / dikker profiel of een stijver wandtype niet meer helpt, kunnen we twee versterkingsmethoden toepassen:

- Groutankers aanbrengen, diep verankerde trekstangen die de bouwputwand tegenhouden. Men moet wel beseffen dat het aanbrengen van deze ankers soms problematisch kan zijn als er onder bestaande gebouwen verankerd moet worden. Groutankers kunnen desgewenst worden verwijderd maar hier hangt wel een fors prijskaartje aan.



Groutanker en stempeling als versterking van een te slappe damwand.



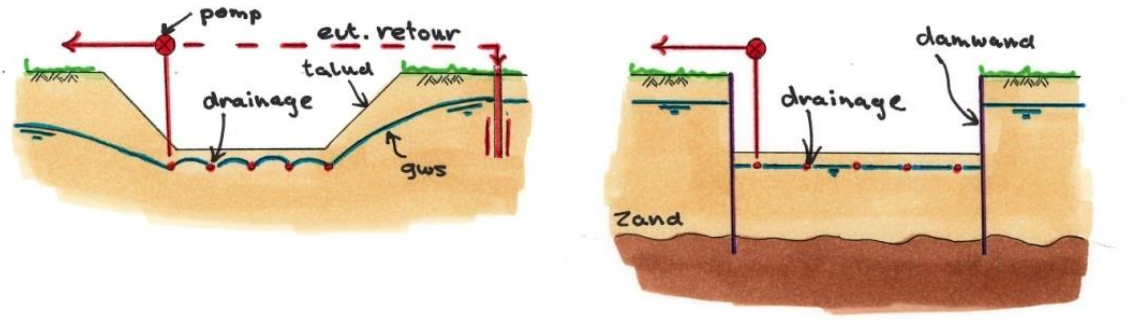
Boren van een groutanker voor extra (horizontale) steun aan de stalen damwand.

- Stempels aanbrengen. Aangezien twee tegenover elkaar gelegen bouwputwanden naar elkaar toebuigen volstaat het om een stevige buis of balk ertussen aan te brengen. Dit profiel komt dan onder druk te staan (knikgevaar!) maar houdt zo de vervorming tegen en geeft een steunpunt aan de bouwputwand die daardoor minder zwaar belast wordt. Stempels zijn natuurlijk vervelend voor het verder werken in de bouwput zelf maar zijn wel relatief goedkoop en herbruikbaar.

Waterhuishouding in bouwputten met een (redelijk) waterdichte, kunstmatige omranding en onderwaterbeton.

Als we een bouwput met een (redelijk) waterdichte kunstmatige omranding, zoals stalen damwanden of betonnen diepwanden, hebben gemaakt, zullen we de bouwput moeten omgraven en, als er grondwater aanwezig is, leeg pompen. De omranding van de bouwput is dus, niet volkomen maar redelijk waterdicht, maar de onderkant is eigenlijk nog open! Nu kunnen zich twee situaties voor doen;

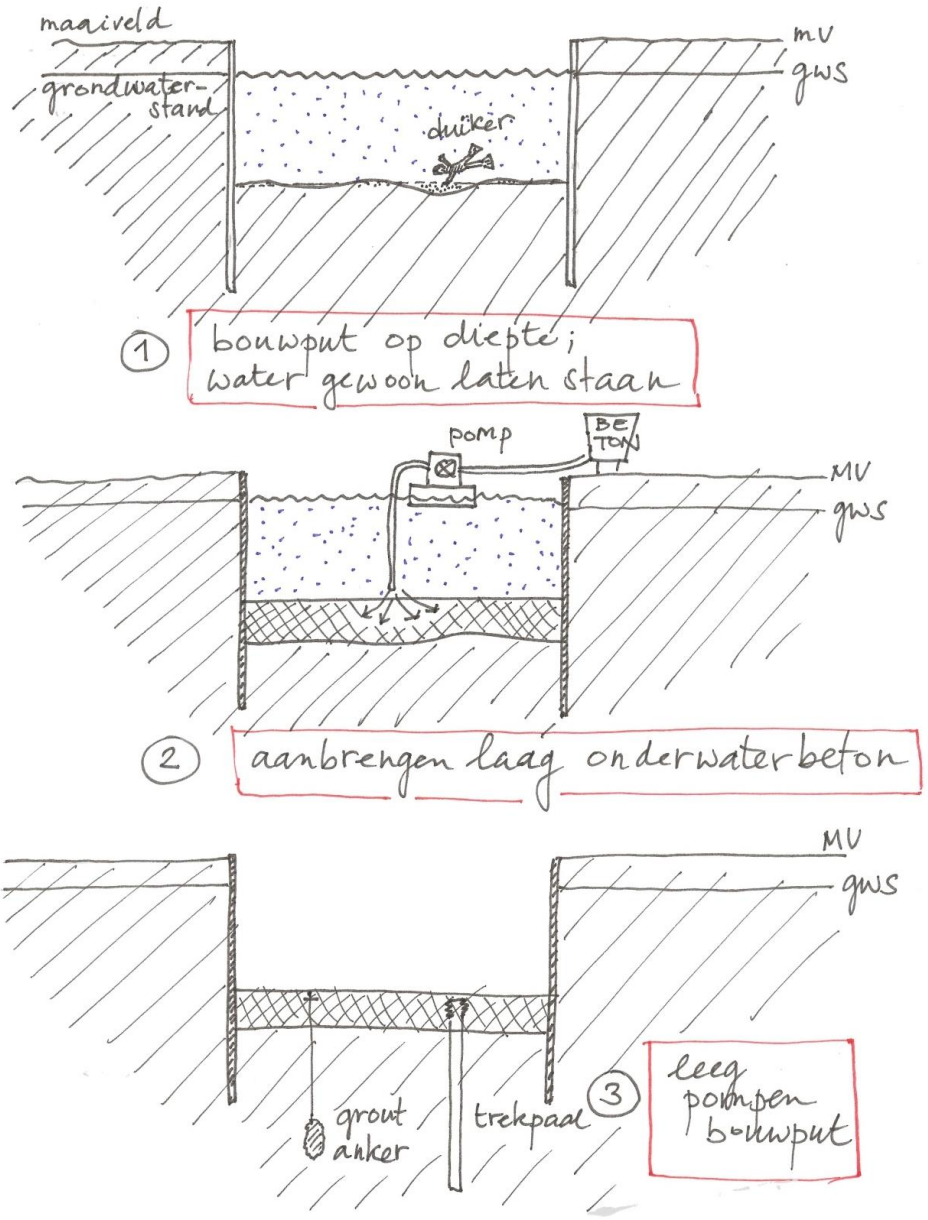
- er zitten afdoend dikke kleilagen, die dus voldoende waterdicht zijn, in de ondergrond waar de omranding doorheen is gestoken; of
- er zitten geen kleilagen of andere waterdichte lagen in de ondergrond.



Links: Bemaling (= kunstmatig verlagen van de grondwaterstand (gws) door pompen) van een open bouwput (en dus verlagen van de gws in de omgeving). Rechts: bemaling in en gesloten bouwput met een waterafsluitende laag (bv. klei) in de ondergrond; nu geen verlaging gws in de omgeving!

In het eerste geval kunnen we de bouwput, gewoon leeg pompen en droog ontgraven. De kleilagen zorgen ervoor dat er geen water uit de omgeving via de onderkant in de bouwput kan stromen.
Maar in het tweede geval kunnen we blijven pompen en zelfs, als we heel hard pompen al het grondwater in de verre omgeving wegtrekken met grote schadelijke gevolgen voor de aanwezige grondwaterverontreinigingen, beplanting en bomen in het gebied. Ook de funderingen met houten palen in de omgeving komen droog te staan waardoor de palen kunnen gaan rotten met grote gevolgen voor de draagkracht van de fundering van die gebouwen. Ook kunnen grondzettingen ontstaan waardoor belendingen kunnen verzakken.
Het zal duidelijk zijn dat dit onbeperkt leeg pompen van de verre omgeving niet toegestaan is. Men krijgt er geen vergunning voor van de verantwoordelijke autoriteiten.
We moeten dus een technische truc ontwikkelen om dit negatieve effect van water weg pompen te vermijden. Deze technische truc heet onderwaterbeton of bodeminjectie.

Met onderwaterbeton kunnen we de bodem van de bouwput van een waterdichte afsluiting voorzien.
Dat beton kan als een dikke laag in de leeg gebaggerde bouwput, met het grondwater er dus nog steeds in, gestort worden want beton wordt ook onder water hard. Het is een chemisch proces waar lucht niet bij nodig is.



Fasering maken onderwaterbeton.

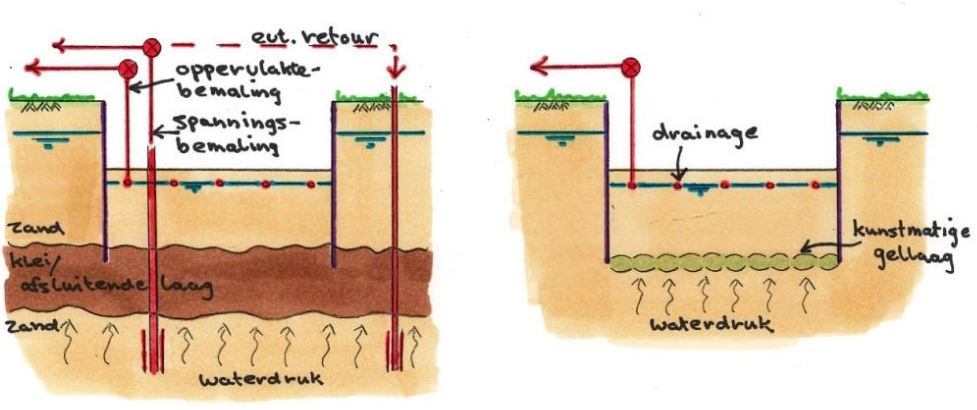
Als de onderwater beton afdoende uitgehard is en duikers hebben gecontroleerd of alles goed verlopen is, vooral de waterdichtheid van de aansluiting met bouwputomranding is altijd een moeilijk punt, kan de bouwput leeg gepompt worden. Er hoeft dus niet meer dan de inhoud van de bouwput zelf weggepompt te worden. De onderwaterbeton-deksel onderin houdt dit tegen. Soms is het nodig als de waterdruk tegen de onderkant van onderwater-betonplaat zeer groot is en niet gecompenseerd wordt door het betongewicht om trekpalen of groutankers aan te brengen om de opwaartse waterdruk op te vangen. (Bedenk dat 1 meter beton overeenkomt met 2,4 meter waterdruk.)

De onderwaterbeton laag wordt meestal ook gebruikt als funderingsplaat voor het uiteindelijke gebouw, het is dan wel nodig voor het storten van de onderwaterbeton laag de palen aan te brengen die het gewicht van het gebouw moeten gaan dragen.



Lege bouwput met onderwaterbeton in Zwolle. Stalen damwanden als grondkering. Let op de koppen van de palen die net boven het onderwaterbeton uitsteken

Een andere gangbare uitvoeringstechniek is bodeminjectie. Daarbij wordt op de gewenste diepte de zandlaag geïnjecteerd met een vloeistof op basis van waterglas waardoor een soort gel ontstaat. Deze wordt aangebracht met injectiebuizen in een grid van ca. 0,8 à 1,0 m; dikte laag ca. 1,0 m. Zo wordt een aaneengesloten kunstmatige onderafsluiting van de bouwput gecreëerd te vergelijken met een natuurlijke kleilaag.



De bouwputwanden aan te brengen tot in de gellaag om een dichte bouwkuip te realiseren. De gellaag heeft slechts een tijdelijke functie tijdens de uitvoeringsfase. Na het aanbrengen van de gellaag en de wanden kan men de bouwput realiseren met een droge ontgraving. *In de nu lege put kan men met de eigenlijke bouw van het gebouw beginnen!!!*