

# Propriétés et résistance des matériaux à l'usage des radioamateurs

## Materiaaleigenschappen en sterkteberekeningen voor de radioamateur

Door/par ON4CT – Vertaling/Traduit par ON8IM

### 1. Introduction

L'utilisation, la construction et la maintenance d'antennes et des structures qui les soutiennent exigent une connaissance des forces auxquelles elles sont soumises. Il est également nécessaire d'avoir une connaissance de base des propriétés des matériaux que nous utilisons pour la pratique du radioamateurisme. Une plus-value sera d'être en mesure d'effectuer des calculs de résistance simple ou d'en comprendre le fondement scientifique. L'intention de cette note n'est pas d'effectuer des calculs de résistance tels que le font les ingénieurs.

Dans un exposé précédent, nous avons clarifié les principales forces: en particulier la charge du vent sur les antennes et sur leurs structures portantes.

### 2. Propriétés mécaniques des matériaux

Les principales propriétés des matériaux dont nous devons tenir compte sont:

#### 2.1. La limite d'élasticité, exprimée en kN/cm<sup>2</sup>

C'est la force par unité de surface que peut subir un matériau pour laquelle il garde son élasticité. Le dépassement de cette limite résulte en une déformation permanente (la pièce ou la construction reste pliée). Cela se traduit par exemple de manière pratique par un tube de tête de mât plié. Nous tiendrons compte de cette limite et nous conserverons une limite charge autorisée inférieure à celle-ci.

#### 2.2. La résistance à la traction, exprimée en kN/cm<sup>2</sup>

Le dépassement de la limite de résistance à la traction par unité de surface causera une rupture du matériau. La limite de résistance à la traction est déterminée en dépassant la limite d'élasticité.

Au plus ces deux limites seront éloignées l'une de l'autre, au plus le matériau sera résistant (p.ex. l'acier inoxydable). Au contraire, au plus elles seront rapprochées l'une de l'autre au plus le matériau sera fragile, p.ex: L'aluminium traité à chaud; en d'autres mots, le matériau cassera sans qu'on ne doive trop le plier.

#### 2.3. La résistance à la compression, exprimée en kN/cm<sup>2</sup>

Idem à la résistance de traction sauf que le matériau sera compressé par une force. Le matériau se déformera et finalement se brisera sous la pression. Pour la plupart des matériaux la résistance à la compression = résistance à la traction.

Pour la fonte et le béton, la résistance à la compression est supérieure à la résistance à la traction.

La flexion d'un matériau, comme un élément d'antenne soumis au vent, engendre aussi bien une traction qu'une compression du matériau. De ce fait, les efforts de flexion autorisés seront égaux aux efforts de traction et/ou de compression autorisés.

### 3. Propriétés chimiques d'un matériau

Les constructions extérieures sont soumises à diverses sollicitations chimiques dont il faut tenir compte.

Une caractéristique principale est la résistance à l'oxydation générée par l'action des influences atmosphériques telles que l'humidité, le taux d'acidité, etc. Parfois une oxydation galvanique pourra être causée par la différence de potentiel générée par la mise en contact de deux matériaux différents.

### 1. Inleiding

Het gebruiken, het zelf bouwen, het in stand houden van antennes en hun dragende constructies, vereist enige kennis van de krachten die hierop inwerken. Het is tevens noodzakelijk om een elementaire kennis te hebben van de eigenschappen van de materialen die we als radioamateur in de praktijk toepassen. Het is een meerwaarde om eenvoudige sterkteberekeningen te kunnen uitvoeren, of de wetenschappelijke achtergrond ervan te begrijpen. Het is niet de bedoeling om sterkteberekeningen, door ingenieurs wetenschappen, in deze toelichting uitgebreid te behandelen.

In een vorige uiteenzetting (CQ-QSO 9-10/2014) zijn de belangrijkste krachten, m.n. de windbelasting op antennes op hun dragende constructies, verduidelijkt.

### 2. Mechanische materiaaleigenschappen

De belangrijkste materiaaleigenschappen waarmee we rekening dienen te houden zijn:

#### 2.1. De elasticiteitsgrens, uitgedrukt in kN/cm<sup>2</sup>

Dit is de kracht per oppervlakte-eenheid, die een materiaal kan opvangen waarbij het materiaal elastisch blijft. Het overschrijden van deze grens betekent een blijvend geplooid stuk of constructie, wat in de praktijk zo goed als het einde van de constructie kan zijn, zoals bv. een geplooid topbuis. Het is met deze grens dat we zullen rekening houden, we zullen de toelaatbare belasting onder deze grensbelasting houden.

#### 2.2. De treksterktegrens of breekgrens bij trekbelasting, uitgedrukt in kN/cm<sup>2</sup>

Bij het overschrijden van deze trekbelasting per oppervlakte eenheid, zal het materiaal breken. Men bereikt deze grens na het overschrijden van de elasticiteitsgrens.

Hoe verder deze 2 grenzen uit elkaar liggen, hoe taaier het materiaal (vb. roestvast staal). Hoe dichter deze grenzen bij elkaar liggen, hoe breekbaarder (of brozer) het materiaal vb. thermisch behandeld aluminium. M.a.w. het materiaal zal breken zonder veel te plooiën.

#### 2.3. De druksterkte uitgedrukt in kN/cm<sup>2</sup>

Idem als treksterkte doch het materiaal wordt samengedrukt door de inwerkende krachten. Het materiaal zal vervormen en uiteindelijk verbrijzelen onder de druk.

Bij de meeste metalen is de druksterkte = de treksterkte.

Bij gietijzer en beton is de druksterkte groter dan de treksterkte.

Bij het buigen van een materiaal, zoals een antenne-element in de wind, ontstaan er zowel trek- als drukspanningen in het materiaal. Vandaar dat de toegelaten buigspanningen gelijk zijn aan de toelaatbare trek- en/of drukspanningen.

### 3. De chemische eigenschappen van een materiaal

De buitenconstructies zijn onderhevig aan diverse vormen van chemische inwerkingen die wij dienen te beheersen. De belangrijkste eigenschap is de weerstand tegen oxidatie, die ontstaat door de inwerking van atmosferische invloeden zoals vocht, zuur,... en soms ontstaat er galvanische oxidatie veroorzaakt door het potentiaalverschil tussen twee verschillende materialen die met elkaar verbonden zijn.

## 4. Quelques matériaux et leurs propriétés

### 4.1. Acier

L'acier est un alliage de Fer et de Carbone très dur et très résistant. L'utilisation de matériau est appropriée pour les tubes de tête de mât, les mâts à croisillons, les fixations, tiges filetées,...

L'acier est classifié par classe de résistance:

- Acier 37 (AE 235): limite d'élasticité = 23,5 kN/cm<sup>2</sup>; résistance à la traction=résistance à la flexion = 37 kN/cm<sup>2</sup>
- Acier 52 (AE 350): limite d'élasticité = 35 kN/cm<sup>2</sup>; résistance à la traction=résistance à la flexion = 52 kN/cm<sup>2</sup>
- Alliages à base d'acier: on arrive à des valeurs de résistance encore plus élevées.

Un exemple type est les nombreux moyens de fixation tels que les boulons et écrous. Quelques explications supplémentaires à ce propos. On trouve sur la tête des boulons une indication telle p.ex. 4.6 ou 8.8 ou 10.8, sur les écrous on peut trouver p.ex. une inscription 4 ou 8 ou 10. S'il n'y a pas d'indication sur l'écrou ou le boulon sont acier 37. On parle d'une classe de résistance 4, 6, 8, 10, ... Sur un boulon 8.8 il faut mettre au minimum un boulon de classe 8.

L'indication 8.8 qu'on retrouve par exemple sur les boulons correspond à:

- Le premier chiffre multiplié par 10 indique la résistance à la traction:  $8 \times 10 = 80 \text{ kN/cm}^2$
- Le premier chiffre multiplié par le second chiffre donne la limite d'élasticité:  $8 \times 8 = 64 \text{ kN/cm}^2$

Ce sont des valeurs relativement élevées; on utilise pour des boulons 8.8 des alliages d'acier traités à chaud.

Lorsqu'on changera ces moyens de fixations p.ex. les raccords des flasques d'un pylône, on respectera au minimum les mêmes dimensions et la même classe de résistance.

Les inconvénients de l'acier sont une sensibilité importante à l'oxydation et un poids élevé.

L'oxydation peut être endiguée par une galvanisation du métal, c.-à-d. couvrir le métal d'une fine couche de Zinc. Si on recouvre le tout d'une couche de couleur, on arrive à une bonne protection tant que la couche de Zinc reste intacte. On peut également acheter des boulons et des écrous galvanisés.

### 4.2. Aluminium

Les matériaux en aluminium sont souvent des alliages. Chaque alliage possédant ses caractéristiques mécaniques, il n'est parfois pas facile de les identifier si l'on ne connaît pas la composition exacte de l'alliage et du traitement thermique utilisé.

Pour ce matériau également, la valeur de résistance à la traction est égale à sa valeur de la résistance à la compression, ceci est important lors de la détermination de la résistance à la flexion.

On trouve sur les sites web des fournisseurs des catalogues téléchargeables indiquant la teneur des alliages et leurs caractéristiques. Par exemple: [http://www.dejond.com/\\_downloads/metalen/aluminiumDejond.pdf](http://www.dejond.com/_downloads/metalen/aluminiumDejond.pdf)

En pratique l'aluminium est résistant à l'oxydation et 3x plus léger que l'acier; ceci en fait LE matériau de construction pour les radioamateurs utilisé pour la fabrication d'antennes, de tubes de tête de mât et même pour les pylônes.

Il faut prendre des précautions afin de prévenir une oxydation galvanique entre les connexions p.ex. aluminium et acier, aluminium et cuivre, aluminium et acier inoxydable. Au contact de l'eau, aluminium s'oxydéra rapidement en formant une poudre blanche. Ceci est le cas entre autres lorsque des boulons en acier (soit en acier inoxydable, acier galvanisé dans une moindre mesure) sont vissés dans de l'aluminium. On peut éviter cela en enrobant la vis d'une fine couche de graisse. Cette couche agit comme un isolant.

Lorsque dans les antennes on connecte du cuivre et de l'aluminium, on aura dans un court laps de temps un composé oxydé.

## 4. Enkele materialen en hun eigenschappen

### 4.1. Staal

Dit is een ijzer-koolstof legering, die zeer sterk en taai is. Dit materiaal wordt toegepast als topbuis, bij vakwerkmasten, als bevestigingsmiddelen, schroefdraadstangen,....

Er zijn verschillende sterkte klassen:

- Staal 37 (AE235): de elasticiteitsgrens hiervan is 23,5 kN/cm<sup>2</sup>, de treksterkte = buigsterkte is 37 kN/cm<sup>2</sup>.
- Staal 52 (AE 350): met een elasticiteitsgrens van 35 kN/cm<sup>2</sup>, de treksterkte = buigsterkte van 52 kN/cm<sup>2</sup>.
- Staallegeringen: men bekomt nog hogere spanningsgrenzen dan hierboven.

Een typisch voorbeeld zijn de veel gebruikte bevestigingsmiddelen zoals bouten en moeren. Hierover wil ik even dieper uitwijden.

Op de kop van bout staat een aanduiding zoals bv. 4.6 of 8.8 of 10.8, ook op de moer kan bv. 4 of een 8 of een 10 ingeslagen zijn. Indien er geen aanduiding te zien is dan is de bout of de moer van Staal 37. Men spreekt over een sterkteklasse 4, 6, 8, 10, ... Een moer op een 8.8 bout dient tenminste van de sterkte klasse 8 te zijn.

Bij de bv. veel gebruikte aanduiding van een bout 8.8 is de verklaring van de sterkteklasse aanduiding als volgt:

- het eerste getal vermenigvuldigd met 10 bepaalt de treksterkte grens:  $8 \times 10 = 80 \text{ kN/cm}^2$
- het eerste getal vermenigvuldigd met het tweede getal bepaalt de elasticiteitsgrens van het materiaal:  $8 \times 8 \times 10 = 64 \text{ kN/cm}^2$

Dit zijn reeds relatieve hoge waarden, men gebruikt voor een 8.8 bout gelegeerde staalsoorten die thermisch behandeld zijn.

Wanneer men deze bevestigingsmiddelen vervangt bv. bij een flensverbinding aan een mast dan dient men op zijn minst dezelfde afmeting en dezelfde sterkteklasse te gebruiken.

De nadelen van staal zijn: zeer oxidatiegevoelig en een hoog gewicht. De oxidatie kan men beheersen door 'galvaniseren' dit is het bedekken van het staal met een laagje zink. Indien men hierover enkele lagen verf bovenop legt, dan bekomt men een zeer goede bescherming tot zolang de zinklaag intact blijft.

Men kan ook gegalvaniseerde bouten en moeren aankopen.

### 4.2. Aluminium

De gebruikte aluminium materialen zijn meestal legeringen. Elke legering heeft zijn mechanische eigenschappen, het is soms niet eenvoudig om deze te achterhalen indien men de juiste samenstelling van de legering en de gebruikte thermische behandeling niet kent.

Ook bij dit materiaal is de treksterkte gelijk aan de druksterkte, dit is van belang bij het berekenen van dit materiaal op buiging.

Op het internet vindt men bij leveranciers van aluminium downloadbare catalogussen met vermelding van de legeringen en hun eigenschappen bv. [http://www.dejond.com/\\_downloads/metalen/aluminiumDejond.pdf](http://www.dejond.com/_downloads/metalen/aluminiumDejond.pdf)

Aluminium is praktisch oxidevast en is 3x lichter dan staal, vandaar dat dit HET constructiemateriaal is voor de radioamateur bij het bouwen van antennes, topbuizen en zelfs vakwerk- en kokermasten.

Men dient voorzorgen te nemen tegen galvanische oxidatie tussen vb. aluminium-staal, aluminium-koper, aluminium-roestvast staal verbindingen. Bij contact met vocht zal bij deze verbindingen, het aluminium snel oxideren tot een wit poeder. Dit is ondermeer het geval wanneer men stalen bouten (hetzij roestvast staal en in mindere mate verzinkte staal) in aluminium draait. Men kan dit enigszins voorkomen door rond de bout een laagje vet te voorzien. Dit laagje werkt dan als isolator. Wanneer men bij antennes een verbinding maakt tussen koper en aluminium dan zal men in korte tijd een geoxideerde verbinding hebben.

De meest gebruikte legering zijn van het type aluminium met magnesium (Mg) en silicium (Si) aan toegevoegd. Al of niet gevolgd door een thermische behandeling.

Les alliages les plus utilisés sont du type aluminium-magnésium (Mg) avec adjonction de silicium (Si), suivis ou non d'un traitement thermique.

Par exemple, l'aluminium pur possède une résistance à la traction de 10kN/cm<sup>2</sup>.

Alors que l'alliage fréquent AL-MG-Si 1 possède une limite élastique de  $\pm 20$  kN/cm<sup>2</sup> et une résistance à la traction de  $\pm 27$  kN/cm<sup>2</sup>, valeur qui se rapproche pratiquement de la valeur de la limite élastique de l'acier 37. Si ce matériau subit un traitement thermique, sa limite d'élasticité passera à 26kN/cm<sup>2</sup> et dépassera celle de l'acier 37. Par contre, l'aluminium trempé est un matériau cassant dont la résistance à la traction est de 31kN/cm<sup>2</sup>. L'aluminium trempé cassera relativement vite sans qu'on doive beaucoup le plier ou l'étirer. L'aluminium trempé est reconnaissable à sa couleur grise moins brillante.

Si on ne connaît pas les caractéristiques du matériau ou si l'on veut mesurer la limite d'élasticité d'un tube en aluminium, on peut faire cela soi-même. On prendra une longueur de 1 mètre de tube d'un diamètre peu important p.ex. 10mm ou 12 mm. On serre (sans l'écraser) une extrémité dans un étau et on y pend à une distance de 75 cm des poids. Un seau rempli d'eau pourra faire l'affaire; lorsqu'on retire le seau, le tube doit revenir à sa place. On ajoutera de l'eau dans le seau jusqu'au moment où le tube restera plié. La limite élastique sera fonction du poids de l'eau, des dimensions du tube, de la distance par rapport à l'étau (v.ci-dessous).

### 4.3 Acier inoxydable

Appelé communément inox, il en existe de nombreuses sortes. Les inox sont des alliages d'acier auxquels on a ajouté principalement du Nickel (Ni) et du Chrome (Cr).

Ce matériau est très résistant à la corrosion et la plupart de ces alliages ne sont pas ou peu magnétiques, l'utilisation d'un aimant pourra s'avérer utile.

Les propriétés mécaniques varieront fortement en fonction des composants ajoutés à l'alliage.

La plupart des aciers inoxydables possèdent une limite d'élasticité relativement faible et une importante résistance à la traction, c'est un matériau très dur. Il aura un allongement important avant qu'il se rompe.

Un exemple, l'acier AISI 304 est un alliage avec 18 % Cr et 8 % Ni; il possède une limite d'élasticité de 20kN/cm<sup>2</sup> et une résistance à la traction de 60 kN/cm<sup>2</sup>. On remarquera que la limite d'élasticité est inférieure à celle de l'acier 37.

Pour des données plus précises concernant les propriétés des matériaux utilisés dans les éléments de construction, on se référera aux données fournies par les fabricants et fournisseurs.

Pour les éléments de fixation, c'est plus facile, tout comme pour les boulons/écrous: il y a des classes de résistance A1, A2 et A4. Ces lettres/chiffres sont poinçonnés sur le boulon ou l'écrou, p.ex. A2 parfois suivi de 70, comme A2-70.

La classe la plus usuelle est la classe A2, sa résistance à la traction est de 70 kN/cm<sup>2</sup> et sa limite d'élasticité est 45 kN/cm<sup>2</sup>. Les propriétés mécaniques sont inférieures à celles des boulons acier 8.8 pour lesquels la limite d'élasticité est  $\pm 30$  % supérieure.

Lors de l'utilisation de boulons/écrous en acier inoxydable, il faudra être attentif à l'oxydation galvanique qui pourra se produire au contact de l'aluminium. Un autre problème est le blocage du boulon sur l'écrou dû à un phénomène de saisie. Pour prévenir cela, on utilisera de la graisse et on serra lentement l'écrou sur le boulon.

De nombreux radioamateurs utilisent volontiers de la quincaillerie inox pour les antennes (colliers de serrage, boulons/écrous, etc.)

### 4.4 Matériaux composites GFK, CFC

L'utilisation de plastiques comme le polyamide 6 (PA6), téflon, etc. est appropriée pour les isolateurs et parfois comme paliers pour les tubes de tête de mât.

De toegevoegde elementen maken het materiaal aanzienlijk sterker en de lasbaarheid verhoogt.

Zo heeft zuiver aluminium slechts een geringe treksterkte van ongeveer 10 kN/cm<sup>2</sup>.

Zo heeft de veel voorkomende legering Al Mg Si 1 een elasticiteitsgrens van  $\pm 20$  kN/cm<sup>2</sup> en een treksterkte van  $\pm 27$  kN/cm<sup>2</sup>, dit benadert praktisch de waarde van de elasticiteitsgrens van staal 37. Indien dit materiaal thermisch behandeld is geweest, dan overtreft de elasticiteitsgrens met 26 kN/cm<sup>2</sup> deze van het Staal 37! Doch gehard aluminium is een broos materiaal waarvan de treksterktegrens ligt op 31 kN/cm<sup>2</sup>. Gehard aluminium zal breken zonder relatief veel te plooiën of te rekken. Gehard aluminium is enigzins herkenbaar aan de minder blinkende grijze kleur.

Indien men het materiaal niet kent, of even de elasticiteitsgrens van een aluminium buis wil meten dan kan men dit zelf doen. Men neemt ongeveer een lengte van 1 m buis, met een kleinere diameter van bv. 10 tot 12 mm. Men spant deze op in een bankschroef (zonder de buis dicht te knijpen) en men hangt op ongeveer 75 cm gewichten. Dit kan een emmer gevuld met water zijn, men neemt de emmer weg, de buis dient terug recht te veren. Men voegt water toe totdat de buis blijvend geplooid is. Het gewicht, de afmetingen van de buis en de afstand tot de inklemming zijn een maat voor de elasticiteitsgrens (zie verder).

### 4.3. Roestvaststaal

In de praktijk meestal inox of RVS genoemd, hiervan zijn er ook veel soorten.

Het zijn staallegeringen waar voornamelijk chroom (Cr) en nikkel (Ni) is aan toegevoegd.

Dit materiaal is zeer corrosievast en de meeste legeringen zijn niet-magnetisch of licht magnetisch. Met een magneet kan men een ongekend materiaal als RVS vaststellen.

De mechanische eigenschappen variëren zeer sterk in functie van de toegevoegde legeringselementen.

De meeste roestvaste staalsoorten hebben een relatief lage elasticiteitsgrens en een hoge treksterktegrens, het is een taai materiaal. Er zal veel rek optreden vooraleer dit materiaal zal breken. Een voorbeeld: AISI 304 is een staallegering met 18 % Cr en 8 % Ni. Dit heeft een elasticiteitsgrens van 20 kN/cm<sup>2</sup> en treksterktegrens van 60 kN/cm<sup>2</sup>. Merk op dat de elasticiteitsgrens lager is dan deze van staal 37. Voor meer correcte gegevens i.v.m. materiaaleigenschappen van constructie elementen in RVS, verwijs ik naar gegevens van de fabrikanten en leveranciers.

Voor bevestigingselementen is het eenvoudiger. Net zoals bij de stalen bouten/moeren zijn er sterkteklassen m.n. A1, A2 en A4. Deze lettercijfer combinatie staat op de bout/moer ingeslagen vb. A2 soms gevolgd door 70, als A2-70.

De meest gangbare sterkte klasse is A2, de treksterktegrens hiervan is 70 kN/cm<sup>2</sup>, de elasticiteitsgrens bedraagt 45 kN/cm<sup>2</sup>. De mechanische eigenschappen zijn lager dan deze van een stalen 8.8 bout waarvan de elasticiteitsgrens  $\pm 30$  % hoger is.

Bij het toepassen van RVS bouten en moeren, dient men aandacht te hebben voor de galvanische oxidatie die kan optreden in contact met aluminium. Een andere aandachtspunt is dat de moer kan vastlopen op de bout. Dit komt door het 'koudlas' verschijnsel. Men kan dit voorkomen door de bout-moer verbinding traag aan te draaien en door vet te gebruiken op de bout.

Vele amateurs gebruiken graag RVS materialen als hardware voor antennes zoals spanbanden, bouten/moeren, ...

### 4.4. Technische kunststoffen, GFK en CFK

De kunststoffen zoals polyamide 6 (PA6), polyamide 66 (PA66), teflon, ... worden toegepast als isolatoren en soms ook als glijlagers voor topbuizen.

Een laatste ontwikkeling zijn de vezel- en harsversterkte kunststofmaterialen.

Les matériaux composites à base de résine renforcée par des fibres sont un développement récent.

CFC signifie carbone renforcé, il s'agit d'un matériau conducteur et ne sera pas utilisé comme isolateur.

GFK sont des matériaux renforcés à l'aide de fibres possédant une haute valeur isolante. Ce matériau possède d'excellentes propriétés mécaniques et chimiques. On trouvera également ici diverses compositions en fonction des fibres et de résines utilisées.

On remarquera que la limite élastique du GFK est 17 kN/cm<sup>2</sup> et que c'est une valeur assez proche des alliages d'aluminium. Mais il est beaucoup plus léger que l'aluminium. On trouve même sur le marché des variétés avec une limite élastique de 24 kN/cm<sup>2</sup>, dépassant la résistance de l'acier 37.

Les tubes en GFK sont utilisés en tant qu'isolateurs, bras de support p.ex. Hex-Beam, ou comme mâts télescopiques.

### 5. Détermination de la charge à la traction et au cisaillement

Nous nous limiterons à un seul exemple dans lequel un boulon est soumis à un effort de traction.

La méthode sera également d'application pour tout montage soumis à la traction.

Le calcul de résistance repose sur une force, cette dernière doit être connue. Cette force pourra être un poids et/ou une force créée par le vent. Dans tous les cas, il ne faudra pas sous-estimer la valeur des forces agissantes, car les conséquences d'un calcul erroné pourront être importantes.

Nous adopterons toujours une marge de sécurité dans nos constructions afin de compenser une fatigue ou compenser des forces inattendues. De plus, on ne dépassera jamais la limite d'élasticité du matériau.

Dans le calcul des structures de levage, une marge de sécurité à la rupture de 4 à 5 sera appliquée à tous les composants tels que les câbles, boulons, ... Exemple, à la place d'un câble en acier dont la limite à traction de 20 kN/cm<sup>2</sup> serait suffisante, on utilisera un câble avec une limite à la traction de 80 kN/cm<sup>2</sup>. On adoptera dans d'autres cas une marge de sécurité à la rupture de 1,5 à 2. En cas de charge exceptionnelle, telle qu'une charge exceptionnelle du vent (voir précédent article), on pourra approcher de la limite d'élasticité du matériau.

Un exemple:

Boulon acier M8 classe 8.8: Résistance à la traction?

Formule de base

$\sigma_t = F/A$  (F exprimé kN, A = superficie sollicitée du boulon en cm<sup>2</sup>)

Pour  $\sigma_t$  on utilise la limite d'élasticité du matériau = 64 kN/cm<sup>2</sup>

Il reste à déterminer la surface A de la partie filetée:

Diamètre intérieur du filet M8 = 0,64 cm

-> surface A =  $\frac{\pi d^2}{4} = 0,32 \text{ cm}^2$

L'effort de traction autorisé sera F = 64 x 0,32 = 20,48 kN soit 20480 N soit ± 2000 Kg.

La rupture du boulon se produira pour un effort de F<sub>b</sub> = 80 x 0,32 = 25,6 kN soit ± 2500 Kg.

Si nous utilisons ce boulon dans un engin de levage, la force maximale de traction ne devra pas dépasser 25,6 kN / 4 = 6,4 kN (640 Kg).

Si on désire utiliser ce boulon comme point d'attache dans un socle de fondation ou comme boulon de raccord au niveau des flasques de fixation d'un pylône, on adoptera un coefficient de sécurité = 2.

L'effort maximal de traction du boulon sera de 25,6 kN / 2 = 12,8 kN.

Dans les cas ci-dessus, le matériau restera dans ses limites d'élasticité tant qu'on ne dépasse pas la limite de 20,48 kN.

Un autre cas: à partir d'un effort connu, dimensionner un boulon.

Exemple: une tige filetée classe 8,8 est utilisée dans les fondations d'un pylône de 24 m.

La traction maximale dans la tige filetée est de 200 kN, on utilise un coefficient de sécurité à la rupture = 2.

CFK staat voor carbon (=koolstof) versterkt. Dit is een geleidend materiaal en we dienen dit niet als isolator te gebruiken.

GFK zijn glasvezelversterkte materialen, met een zeer hoge isolatiewaarde. Dit materiaal heeft zeer goede mechanische en chemische eigenschappen. Ook hier zijn er diverse samenstellingen al naargelang van de toegepaste vezels en harsen.

Algemeen kan men aannemen dat de elasticiteitsgrens van GFK op 17 kN/cm<sup>2</sup> ligt en hiermee de sterkte van een aluminiumlegering benadert. Het is echter nog veel lichter dan aluminium. Er zijn reeds betere soorten op de markt die een elasticiteitsgrens van 24 kN/cm<sup>2</sup> hebben en hiermee de mechanische sterkte van staal 37 overtreffen!

GFK buizen worden gebruikt als isolatoren, draagarmen bij bv. hex-beam en bij inschuifbare masten.

### 5. Het berekenen op trek- en afschuivingbelasting

Ik beperk mij tot een voorbeeld waarbij een bout op een trekkracht wordt belast.

Voor andere constructies die op trek worden belast, wordt dezelfde methode toegepast.

Bij het berekenen op sterkte wordt uitgegaan van een kracht. Deze kracht dient gekend te zijn. Deze kracht kan een gewicht zijn en/of een kracht veroorzaakt door wind.

In alle gevallen dient men de waarde van de inwerkende kracht(en) niet te onderschatten, omdat de gevolgen van een verkeerde berekening groot kunnen zijn.

We bouwen steeds een veiligheid op breuk in, die in rekening wordt gebracht om vermoeidheidsverschijnselen of onverwachte krachttoename op te vangen. Daarnaast mag men in ieder geval de elasticiteitsgrens van het materiaal niet overschrijden.

Bij het berekenen van hijsconstructies wordt een verhoogde veiligheid op breuk van 4 tot 5 toegepast op alle onderdelen zoals kabels, bouten, ... Bijvoorbeeld een staalkabel met treksterktegrens van 80 kN/cm<sup>2</sup>, zal slechts mogen belast worden tot 20 kN/cm<sup>2</sup>.

In andere gevallen wordt een veiligheid op breuk van 1,5 tot 2 genomen. Bij uitzonderlijke belastingen, zoals bij windbelasting die uitzonderlijk voorkomen (zie vorig artikel) mag men de elasticiteitsgrens van de gebruikte materialen benaderen.

Een voorbeeld:

Een stalen bout van M8 klasse 8.8. Hoeveel trekkracht kan deze opvangen?

De basisformule

$\sigma_t = F/A$  met F in kN en A is de belaste oppervlak van de bout in cm<sup>2</sup>.

Voor  $\sigma_t$  gebruiken we de elasticiteitsgrens van het materiaal = 64 kN/cm<sup>2</sup>

We dienen de oppervlakte A te kennen van de schroefdraad. De kern-diameter van een M8 = 6,4 mm = 0,64 cm

-> het oppervlak A =  $\frac{\pi d^2}{4} = 0,32 \text{ cm}^2$

De toelaatbare trekkracht wordt dan F = 64 x 0,32 = 20,48 kN of 20.480 N of ± 2000 kg.

De bout zal breken bij een belasting van F<sub>b</sub> = 80 x 0,32 = 25,6 kN of bij ± 2500 kg.

Indien men deze bout zal gebruiken bij een hijswerktuig, dan mag de max. trekkracht slechts 25,6 / 4 = 6,4 kN (of 640 kg) bedragen.

Indien men deze bout wil gebruiken als verankering in funderingsbeton of als één van de bouten in een flensverbinding van een mast dan gebruikt men een veiligheid van 2.

De maximale toegelaten trekkracht op de bout bedraagt dan 25,6 / 2 = 12,8 kN.

In beide voorbeelden blijft het materiaal in zijn elastisch gebied, zolang we grens van 20,48 kN niet overschreden.

Een ander geval is wanneer de kracht gekend is. Men kan dan de afmetingen van de bout als volgt bepalen: bv. een stalen draadstang kwaliteit 8.8 in de fundering van een 24 m hoge mast, de max. trekkracht in de draadstang is 200 kN, we gebruiken een veiligheid op breuk van 2.



$A = F / \sigma = 220 \text{ kN} / 40 \text{ kN/cm}^2 = 5,5 \text{ cm}^2$   
 $A = 200/40 = 5 \text{ cm}^2$  détermination du diamètre:

$$d = \sqrt{A \cdot \frac{4}{3,14}} = 2,52 \text{ cm} \text{ (d=diamètre du noyau de la tige filetée)}$$

Les tables de caractéristiques de tige filetées nous indiquent qu'une tige M30 possède un noyau de diamètre de 2,57 cm. Une tige filetée M30 supporte une traction de 38,6 kN/cm<sup>2</sup>, bien en dessous de la limite d'élasticité du matériau. En pratique, on pourra prévoir 4 tiges filetées de M16, l'effort sera alors de 34,7 kN/cm<sup>2</sup> par tige.

Le cisaillement apparaît lorsque les efforts s'exercent en sens opposés, tangentiellement aux surfaces.

Tous les matériaux sont sensibles au cisaillement et la traction. La tension autorisée au cisaillement sera réduite au 2/3 de tension à la traction. Dans le boulon M10 808 ci-dessus, l'effort maximal de cisaillement autorisé avec p.ex. un coefficient de sécurité de 2 sera  $(2/3 \times 80 \text{ kN/cm}^2) / 2 = 26,6 \text{ kN/cm}^2$  à la place d'une résistance à la traction de 40 kN/cm<sup>2</sup>. L'effort maximal autorisé sera  $F = 26,6 \times 0,515 \text{ cm}^2 = 13,6 \text{ kN}$ .

### 6. Détermination de la flexion

La flexion est une contrainte fréquente dans les constructions. Les antennes montées sur le tube de mât génèrent une force de flexion, les éléments montés sur le boom d'une antenne subissent également un effort à la flexion causé par le vent. Un pylône autoportant ou télescopique subit également un effort à la flexion causé du vent sur les éléments des antennes, le tube de tête de mât et les matériaux qui constituent les éléments du pylône.

Quelques exemples:

On peut considérer un tube de tête de mât ou un élément monté sur un boom tel que représenté ci-dessous:

La formule de base de détermination de l'effort à la flexion est en fait une combinaison d'un effort à la traction et à la compression:

$$\sigma d = M/W$$

M = moment en kN/cm

= Force x distance au point de fixation

W = moment de résistance à la flexion en cm<sup>3</sup>

Pour les tubes, le moment de résistance est plus difficile à déterminer  
 $W = 3,14/32 \times (D^4 - d^4) / D = 0,098 \times (D^4 - d^4) / D$  in cm<sup>3</sup>  
 (D= diamètre extérieur du tuyau, d = diamètre intérieur du tuyau)

Pour les tuyaux carrés  $W = (Z^3 - z^3) / 6$   
 (Z = côté extérieur, z = côté intérieur)

Exemple: détermination d'un tube de tête de mât existant.

Dans le cas où on ne serait pas certain du type d'acier utilisé, on présumera qu'il s'agit d'acier 37.

Sa limite d'élasticité est de 23,5 kN/cm<sup>2</sup>.

Prenons un tuyau de 2 pouces (diamètre extérieur 6,03 cm / diamètre intérieur 5,08 cm) qui dépasse la tête du mât de 3 mètres.

$$W = 0,098 \times (D^4 - d^4) / D = 10,66 \text{ cm}^3$$

Dans le cas des tuyaux de tête de mât, on pourra atteindre la limite d'élasticité en cas de vents exceptionnels. Le moment admissible sera alors

$$M = \sigma d \times W = 23 \text{ kN/cm}^2 \times 10,66 \text{ cm}^3 = 245 \text{ kNcm} \text{ of } 2,45 \text{ kNm}$$

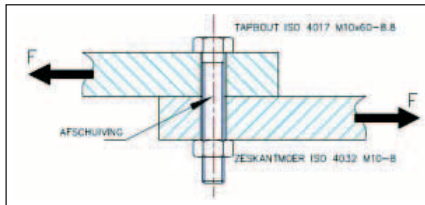
En pratique cela veut dire que la charge admissible au bout d'un bras de 1 mètre à partir de son point fixation sera de 2.45 kN. Cette valeur ne pourra pas être dépassée lorsqu'on effectuera la somme des forces générées des différentes antennes X leurs distances en mètres.

$A = F / \sigma$  hierin is  $F = 220 \text{ kN}$  en  $\sigma = 80/2 = 40 \text{ kN/cm}^2$

$A = 200/40 = 5 \text{ cm}^2$  hiermee kunnen we de diameter bepalen:

$$d = \sqrt{A \cdot \frac{4}{3,14}} = 2,52 \text{ cm} \text{ met } d \text{ als kerndiameter van de schroefdraad}$$

Uit tabellen met schroefdraadgegevens, zien we dat een M30 een kerndiameter heeft van 2,57 cm. In een M30 zal de trekspanning 38,6 kN/cm<sup>2</sup> bedragen, ruimschoots onder de elasticiteitsgrens van het materiaal. In de praktijk kan men ook 4 draadstangen M16 voorzien, de spanning in elke draadstang zal dan 34,7 kN/cm<sup>2</sup> zijn.



Afschuiving komt voor wanneer constructie-elementen loodrecht op hun lengteas belast worden op een trekkracht.

Alle materialen zijn gevoeliger aan afschuiving dan aan trek. Afschuiving is een soort snijbeweging. De toegelaten spanning wordt gereduceerd tot 2/3 van de trekspanning.

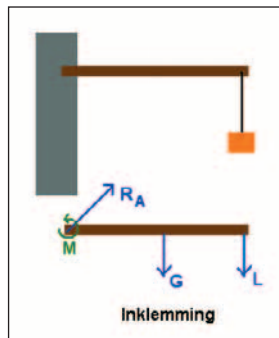
Bij afschuiving hierboven in de M10 8.8 bout zal de toegelaten spanning, met een veiligheid van bv. 2,  $2/3 \times 80 \text{ kN/cm}^2 / 2$  bedragen = 26,6 kN/cm<sup>2</sup> bedragen i.p.v. bij trek 40 kN/cm<sup>2</sup>. De toegestane maximale kracht F zal  $F = 26,6 \times 0,515 \text{ cm}^2 = 13,6 \text{ kN}$  bedragen.

### 6. Berekening op buiging

Buiging is een veel voorkomende belasting op constructies.

De antennes gemonteerd op een topbuis belasten de topbuis op buiging, de elementen op een boom gemonteerd worden door de wind op buiging belast.

Een vakwerkmast of schuifmast buigt door onder invloed van de windkrachten op de antenne(s), de topbuis en op zijn eigen constructie-elementen.



Enkele uitgewerkte voorbeelden:

een belaste topbuis of een element op een boom gemonteerd, kunnen we beschouwen als aan één zijde ingeklemd met een kracht op het element.

De basisformule voor het berekenen van de buigspanning, die in feite een combinatie van trek- en drukspanning is:

$$\sigma d = M/W$$

met M = moment uitgedrukt in kN/cm

= kracht x afstand tot de inklemming

en W = weerstandsmoment tegen buiging in cm<sup>3</sup>

Het weerstandsmoment is iets moeilijker te bepalen, maar voor buizen is deze  $W = 3,14/32 \times (D^4 - d^4)/D = 0,098 \times (D^4 - d^4)/D$  in cm<sup>3</sup> met D = buitendiameter van de buis in cm, d de binnendiameter in cm.

Voor vierkante buizen is  $W = (Z^3 - z^3) / 6$   
 (Z is de buitenzijde in cm, z binnenzijde in cm)

Een voorbeeld: de berekening van een bestaande topbuis.

Indien je niet zeker weet welke staalsoort de topbuis is, dan veronderstel je Staal 37.

De elasticiteitsgrens hiervan bedraagt 23,5 kN/cm<sup>2</sup>. We nemen een buis van 2 duim, 6,03 cm buitendiameter, binnendiameter 5,08 cm (= 2 duim), de buis steekt 3 m boven de mast uit.

$$W = 0,098 \times (D^4 - d^4) / D = 10,66 \text{ cm}^3$$

Voor topbuizen mogen we tot tegen de elasticiteitsgrens van het materiaal gaan in de gevallen van uitzonderlijke wind. Het toegestane moment wordt dan

$$M = \sigma d \times W = 23 \text{ kN/cm}^2 \times 10,66 \text{ cm}^3 = 245 \text{ kNcm} \text{ of } 2,45 \text{ kNm}$$

In de praktijk betekent dit dat op 1 meter afstand van de inklemming de belasting 2,45 kN mag zijn. Bij het monteren van meerdere antennes op de topbuis mag de som van de krachten van de onderlinge antennes x hun afstanden in m, 2,45 kNm niet overschrijden.

Exemple: une X7 avec 1,3 kN avec un vent de 155 km/h avec un point de fixation à 0,5 m, avec au-dessus une Beam WARC avec 0,75 kN à 155 km/h avec un point de fixation à 2 mètres

Le moment total sera  $(1,3 \times 0,5) + (0,75 \times 2) = 2,15$  kNm ce qui à première vue semblerait un montage sûr.

Un contrôle de l'effort sur le tube:  $215 \text{ kNcm} / 10,66 \text{ cm}^3 = 20,16 \text{ kN/cm}^2$   
Mais nous n'avons pas encore déterminé l'effort du vent sur la totalité des 3 mètres du tube.

Cet effort sera p.ex. déterminé pour un territoire de classe 3.

$$Q_b = C_e \times (1/2 \times \rho \times V_o^2)$$

$C_e$  pour territoire à une hauteur de 24 m = 2,4

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V_o = 26 \text{ m/s} \Rightarrow Q_b = 1014 \text{ N/m}^2$$

La force totale sur le tube de tête sera  $F = C_f \times A \times Q_b$

$C_f$  pour un diamètre 60mm =  $\pm 1,1$

A = projection de la surface

$$F = 1,1 \times (0,0603 \text{ m} \times 3 \text{ m}) \times 1014 \text{ N/m}^2 = 201,7 \text{ N of } 0,21 \text{ kN}$$

Détermination de  $\sigma_d = (F \times L/2) / W$ : le moment de flexion est causé par l'effort au milieu du tube

$$\sigma_d = (0,21 \text{ kN} \times 150 \text{ cm}) / 10,66 \text{ cm}^3 = 2,95 \text{ kN/cm}^2$$

L'effort total sur le tuyau chargé sera  $2,95 + 20,16 = 23,11 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2$ .

On est très proche de la limite d'élasticité du matériau. Personnellement, j'évitais cette situation en déplaçant la Beam WARC plus bas ou encore mieux, en renforçant la section du tube. On insèrera un deuxième tuyau de 6/4" (D=48mm et d=40mm) dans le premier tuyau de 2", la longueur d'insertion sera au minimum 1/3 de la longueur du tuyau de tête de mât. Dans ce type de montage, "à double paroi" on réduira la tension de cisaillement  $\sigma_b$ .

W du tuyau renforcé augmentera de  $10,66 \text{ cm}^2$  à  $16,9 \text{ cm}^2$ , la tension de cisaillement passera de  $23,11$  à  $14,5 \text{ kN/cm}^2$ !

Cette configuration est préférable à la précédente et pourra être réalisée à moindres frais.

On utilisera la même méthode pour les tubes en aluminium le tube de grosse section p.ex. D=50mm avec une paroi de 5 mm ( $W=7,23 \text{ cm}^3$ ).

Dans le cas où les caractéristiques du matériau sont connues, on peut en déterminer la limite d'élasticité, dans le cas contraire, on pourra prendre une valeur  $\sigma_e=18$  à  $20 \text{ kN/cm}^2$ . Dans ce cas, il est également conseillé de doubler les parois du tube au cas où on approche de la limite d'élasticité du matériau.

Je reviens sur le cas où on ne connaît pas la valeur  $\sigma_e$  d'un matériau et qu'on veut la déterminer par soi-même.

Prenons un tube aluminium dia.ext.=16mm, épaisseur paroi = 2 mm, dia.int. =14mm,  $W=0,274 \text{ cm}^3$

A 70cm de son point de fixation, on suspendra une masse approximative de 9Kg jusqu'à ce que le tube se déforme. Le moment au point de fixation sera de 6,18kNm.

La tension sera  $\sigma = M/W = 6,18/0,274 = 22,5 \text{ kN/cm}^2$ , pour toute sécurité on adoptera pour le matériau une valeur  $\sigma_e = 20 \text{ kN/cm}^2$ .

Un deuxième essai avec un tuyau de 13mm et une épaisseur de 1mm  $\sigma$  sera dans ce cas  $24 \text{ kN/cm}^2$ , ici également on adoptera  $\sigma_e = 20 \text{ kN/cm}^2$ .

Dans la détermination de dipôles ou d'antennes verticales, on procédera de la même manière que dans le cas de charge résultante du tuyau lui-même.

Exemple: yagi 6 m en tubes 12 mm, ép. paroi 2 mm, longueur élément 2,8 m,  $W = 0,1358 \text{ cm}^3$ . Disposition: hauteur 15 m dans une région de classe 2 ( $C_e = 2,6$   $V_o = 26 \text{ m/s}$   $C_f = 1,2$ )

Le point de fixation est déterminé à partir du milieu de l'élément.

L'effort du vent sur l'élément dans cette configuration est  $Q_b = C_e \times 1/2 \times \rho \times v_o^2 = 1099 \text{ N/m}^2$ . La force du vent sur un demi-élément  $F = C_f \times A \times Q_b = 1,2 \times (0,012 \times 2,8/2) \times 1099 = 22,2 \text{ N}$  of  $0,022 \text{ kN}$ .

Bijvoorbeeld een X 7 met 1,3 kN bij 155 km/h op 0,5 m van de inklemming, met erboven een WARC beam met 0,75 kN bij 155 km/h op 2 m van de inklemming.

Het totale moment op de inklemming zal zijn:  $(1,3 \times 0,5) + (0,75 \times 2) = 2,15$  kNm wat op het eerste zicht een veilige opstelling lijkt.

Even ter controle, de spanning in de buis =  $215 \text{ kNcm} / 10,66 \text{ cm}^3 = 20,16 \text{ kN/cm}^2$

Maar we hebben de eigen windbelasting van de 3 m lange buis nog niet in rekening gebracht. De eigen windbelasting van deze topbuis, vb. opgesteld in een landelijk gebied klasse 3.

$$Q_b = C_e \times (1/2 \times \rho \times V_o^2)$$

$C_e$  voor landelijk gebied op 24 m hoogte = 2,4

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$V_o = 26 \text{ m/s} \Rightarrow Q_b = 1014 \text{ N/m}^2$$

Op de topbuis zal een totale kracht van  $F = C_f \times A \times Q_b$  uitgeoefend worden, met:  $C_f$  voor een diameter 60mm =  $\pm 1,1$

A = geprojecteerde oppervlak

$$F = 1,1 \times (0,0603 \text{ m} \times 3 \text{ m}) \times 1014 \text{ N/m}^2 = 201,7 \text{ N of } 0,21 \text{ kN}$$

$\sigma_d = (F \times L/2) / W$  bedragen, het buigmoment wordt veroorzaakt door de kracht in het midden van de buis te laten aangrijpen.

$$\sigma_d = (0,21 \text{ kN} \times 150 \text{ cm}) / 10,66 \text{ cm}^3 = 2,95 \text{ kN/cm}^2$$

De totale spanning in de belaste topbuis =  $2,95 + 20,16 = 23,11 \text{ kN/cm}^2 < 23,5 \text{ kN/cm}^2$ . We benaderen de elasticiteitsgrens van het materiaal zeer dicht.

Persoonlijk zou ik deze situatie vermijden door bv. de warc- beam lager te plaatsen of nog beter door de buis inwendig te versterken. Men schuift dan een 2de buis in de bestaande, een buis van 6/4e duim (D=48 mm en d= 40 mm) past in de 2 duim buis, de lengte van de ingeschoven buis dient slechts  $\pm 1/3e$  zijn van de lengte van de topbuis. Met deze 'dubbelwandige' constructie zal de spanning  $\sigma_b$  verlagen in de inklemming.

W van de versterkte buis verhoogt van  $10,66 \text{ cm}^3$  tot  $16,9 \text{ cm}^3$ , de spanning in de inklemming daalt van  $23,11$  naar  $14,5 \text{ kN/cm}^2$ !

Dit is een betere situatie, die met een geringe kost kan gerealiseerd worden.

Voor aluminium topbuizen, die meestal dikwandige aluminium buizen zijn vb. D=50 mm met een wanddikte van 5mm ( $W = 7,23 \text{ cm}^3$ ), wordt dezelfde methode toegepast.

Indien de materiaal soort gekend is dan kun je de elasticiteitsgrens weten, indien het materiaal niet gekend is dan kun je  $\sigma_e = 18$  tot  $20 \text{ kN/cm}^2$  nemen. Ook hier is het dubbelwandig maken van de topbuis aanbevolen bij het benaderen van de elasticiteitsgrens van het materiaal.

Ik kom even terug op het zelf bepalen van de  $\sigma_e$  van ongekende materialen door een eigen buigproef. Een buis in aluminium met een buitendiameter van 16 mm, wanddikte 2 mm, binnendiameter 14 mm,  $W = 0,274 \text{ cm}^3$ .

Op 70 cm van de inklemming kon er een massa van ongeveer 9 kg opgehangen worden totdat de buis blijvend vervormd was. Het moment op de inklemming was 6,18 kNm.

De spanning is dan  $\sigma = M/W = 6,18/0,274 = 22,5 \text{ kN/cm}^2$ , voor dit materiaal heb ik voor alle veiligheid  $\sigma_e = 20 \text{ kN/cm}^2$  gesteld.

Een tweede proef was met een buis van diameter 13, met een wanddikte van 1.  $\sigma$  was in dit geval  $24 \text{ kN/cm}^2$ , hier ook heb ik  $\sigma_e = 20 \text{ kN/cm}^2$  gesteld.

Voor het berekenen van dipolen of verticale antennes gaat men op dezelfde werkwijze tewerk als bij de eigen belasting van de topbuis.

Voorbeeld: een 6 m yagi uit 12 mm buis, wanddikte 2 mm, lengte van element 2,8 m.  $W = 0,1358 \text{ cm}^3$ .

Opstelling: 15 m hoog, in een klasse 2 gebied ( $C_e = 2,6$   $V_o = 26 \text{ m/s}$   $C_f = 1,2$ ).

De inklemming wordt gerekend vanuit het midden van het element.

De winddruk op het element in deze opstelling  $Q_b = C_e \times 1/2 \times \rho \times v_o^2 = 1099 \text{ N/m}^2$ . De windkracht op het halve element  $F = C_f \times A \times Q_b = 1,2 \times (0,012 \times 2,8/2) \times 1099 = 22,2 \text{ N}$  of  $0,022 \text{ kN}$ .

La tension au point de fixation de l'élément est  $\sigma = M/W$  avec  $M = F \times 140 \text{ cm} / 2$  (la force agit au milieu du demi élément)  $M = 1,54 \text{ kN/cm}$   
 $\sigma = 1,54 / 0,1358 = 11,33 \text{ kN/cm}^2$  ce qui est une situation sûre.

Si vous construisez votre élément en tube de 13 mm, épaisseur paroi 1 mm, l'effort est alors  $\sigma = 1,68 / 0,105 = 16 \text{ kN/cm}^2$  ce qui ne causera toujours pas de problème au matériau.

Veillez à ne pas forer l'élément en son milieu, car cela causera un affaiblissement.

Cet élément résistera à des vents de  $\pm 165 \text{ km/h}$  sans subir de déformations permanentes.

Dans ce cas d'application on doublera également la paroi des tubes, principalement dans le cas de longs dipôles HF ou éléments, ceci renforcera le facteur W ce qui diminuera la tension dans le matériau. J'ai adopté cette méthode dans le cas d'antennes HF commerciales, avec comme résultat un renforcement de leurs caractéristiques mécaniques, aucun changement des caractéristiques électriques des antennes n'a été observé.

La détermination des efforts sur les pylônes autoportants dépasse le cadre de cet article, leur calcul est complexe.

De façon très résumée, les tubes verticaux sont soumis à traction, la compression (au flambage pour les longues sections). Les traverses diagonales sont soumises à la traction, les parties horizontales à la compression et maintiennent les parties verticales éloignées à distance. Le flambage est une charge à la pression apparaissant sur les éléments les plus minces, ces éléments se mettent à balancer. Ceci affaiblit l'ensemble de la construction et le pylône plie. Il faut s'en tenir à la charge maximale prescrite par le fabricant, exprimée le plus souvent en  $\text{m}^2$  à une certaine vitesse du vent.

Si vous utilisez un mât acheté d'occasion, essayez de retrouver le fabricant.

La plupart des fabricants ont leur façon de montage qui leur est propre avec des éléments standard tels que flasques, plaques de fixation, etc. Les fabricants de pylônes déterminent leurs constructions à l'aide de programmes informatiques utilisant une méthode se basant sur des éléments finis et non plus sur la méthode traditionnelle de détermination des efforts.

Si vous désirez en savoir plus sur les méthodes de détermination des efforts, vous pouvez expérimenter des logiciels libres tels que LISA v. <http://lisafea.com/>

Avec ce dernier il vous est possible de calculer le tuyau de tête de mât, d'y inclure les éléments, et autres variables.

La figure ci-dessous représente le calcul de sortie avec LISA v7 d'un pylône de structure triangulaire de 24 m, chargée à 1,5 kN avec un vent de 160 km/h. La déportation de la tête est de  $\pm 50 \text{ cm}$ . La tension maximale dans les tubes verticaux est alors  $\pm 18 \text{ kN/cm}^2$ .

De spanning in de inklemming van het element is  $\sigma = M/W$  met  $M = F \times 140 \text{ cm} / 2$  (de kracht grijpt in het midden van het halve element)  
 $M = 1,54 \text{ kNcm}$ .

$\sigma = 1,54 / 0,1358 = 11,33 \text{ kN/cm}^2$  wat een veilige situatie is.

Maak je het 6 m element met een buis van 13 mm, wanddikte 1 mm, dan wordt de spanning  $\sigma = 1,68/0,105 = 16 \text{ kN/cm}^2$ . Dit vormt nog geen probleem voor het materiaal.

Zorg ervoor dat je het element niet doorboort in het midden, want dit verzwakt het element dan weer. De max. windsnelheid die het element zal overleven, zonder blijvende vervorming, zal  $\pm 165 \text{ km/h}$  zijn.

Ook in deze toepassingen en voornamelijk bij de langere hf-dipolen/elementen, kun je de buizen dubbelwandig maken, men verhoogt aanzienlijk de factor W, hierdoor daalt de spanning in het materiaal. Ik heb deze techniek veel toegepast bij aangekochte hf-antennes.

De mechanische sterkte wordt hierdoor aanzienlijk verhoogd bij gelijkblijvend windoppervlak en de elementen buigen minder door.

De elektrische eigenschappen van de antenne wijzigen niet.

De sterkte van vakwerkmasten overstijgt de bedoeling van dit artikel. Het is niet eenvoudig om deze te berekenen.

Kort samengevat, worden de verticale buizen belast op trek en druk (voor langere delen gaat dit over in 'knik'). De diagonalen worden belast op trek, de horizontale delen op druk. Ze houden de verticale buizen uit elkaar.

Knik is een drukbelasting die op slankere elementen staat, de elementen knikken dan zijdelings uit. Hierdoor verzwakt het gehele vakwerk en de mast zal plooiën.

Men dient zich te houden aan de maximumbelasting die de fabrikant voorschrijft, meestal uitgedrukt in  $\text{m}^2$  bij een bepaalde windsnelheid. Indien je een tweedehands mast gebruikt, probeer eventueel de fabrikant te achterhalen.

Meestal gebruiken deze een typische bouwwijze met standaardonderdelen zoals flenzen, funderingsplaten,....

Fabrikanten van pylonen berekenen hun constructies door middel van software die de eindige elementenmethode toepast en niet meer volgens de klassieke sterkteleermethodes.

Indien je meer over deze nieuwe berekeningsmethodiek wil weten, dan kun je experimenteren met freeware software zoals LISA, zie: <http://lisafea.com/>

Hiermee kan men een topbuis of volledige mast narekenen. De input van de elementen en andere variabelen bepaalt uiteindelijk het resultaat.

De volgende figuur is een output d.m.v. LISA v7 bekomen: het betreft een driehoekige stalen vakwerkmast van 24 m, belast met 1,5 kN bij 160 km/h. De uitwijking aan de top is  $\pm 50 \text{ cm}$ . De maximumspanning in de verticale buizen is dan ongeveer  $18 \text{ kN/cm}^2$ .

