



STERKTEBEREKENING

VAN EEN HOOGSPANNINGSMAST

door Marcel Jansen

Werktuigbouw deeltijd

Vught, juni 2006

Met dank aan mijn afstudeerbegeleiders:

Jan Oomens en Bert van Huijgevoort

Voorwoord

Mijn scriptie **Sterkteberekening** van een hoogspanningsmast ligt voor U en mijn presentatie hierover ligt nog in het verschiet. **Daarmee** sluit ik ~~dan~~ mijn opleiding aan de Hogeschool Utrecht, faculteit Natuur en Techniek, deeltijdopleiding werktuigbouw af.

Ik zocht een onderwerp waar in ieder geval flink wat mechanica in zou zitten en waar bij ook zou moeten worden gemodelleerd en gerekend **met** een eindige elementen pakket.

Ik vond het een uitdaging om een deel van zo'n complexe constructie, wat een **hoogspanningslijn** is, op zo'n diepgaande manier te proberen te doorgronden.

Ik vond het erg **leerzaam** en interessant en ik hoop dat **hetzelfde** geldt voor diegenen die deze scriptie lezen.

Tot slot wil ik iedereen bedanken die **mij** gesteund en gemotiveerd heeft en ik wil hierbij met name Jan Oomens en **mijn** vrouw **Joyce** Jansen noemen.

Marcel Jansen

Vught, juni 2006

Inhoudsopgave

Voorwoord	I
Inhoudsopgave	II
Samenvatting	III
Conclusie	IV
Formuleblad	V
1 Inleiding	1
1.1 Inleiding	1
1.2 Probleemstelling	1
1.2.1 Beschrijving studie object	1
1.2.2 Probleembeschrijving	1
1.2.3 Probleem analyse	2
1.2.4 Actieplan en randvoorwaarden	2
2 Opbouw van een hoogspanningslijn	3
2.1 Inleiding	3
2.2 Een hoogspanningslijn	3
2.3 De vakwerkmast	5
3 Berekeningswijze voor de belastingen op de mast	7
3.1 Inleiding	7
3.2 Belastingen op de mast	7
3.3 Permanente belastingen	7
3.4 Veranderlijke belastingen	11
3.4.1 Windbelasting op hoogspanningslijn elementen	11
3.4.2 Ijsbelasting op hoogspanningslijn elementen	19
3.4.3 Combinatie van wind- en ijsbelasting	19
3.4.4 Temperatuur effecten	20
3.5 Bijzondere belastingen	21
3.5.1 Constructie- en onderhoudsbelastingen	21
3.6 Partiële veiligheidsfactoren en belastingfactoren	21
3.6.1 Standaard belastinggevallen voor een steunmast	22
3.6.2 Veiligheidsfactoren	24
3.7 Conclusie	25

4	Berekenen van de belastingen op de mast	26
4.1	Inleiding	26
4.2	Algemene gegevens van de mast en de geleider	27
4.3	Belastkggevallen	29
4.4	Belastingen	29
4.4.1	Permanente belastingen	29
4.4.2	Veranderlijke belastingen	32
4.4.3	Constructie- en onderhoudsbelastingen	38
4.4.4	Tabellen van de vijf belastinggevallen	38
4.5	Conclusie	43
5	Model en berekeningen in Ansys	44
5.1	Inleiding	44
5.2	Model in Ansys	44
5.3	Invoer in Ansys	46
5.4	Conclusie	47
6	Controle van de mast	48
6.1	Inleiding	48
6.2	Trek- en drukspanningen	48
6.3	Stabiliteit van op druk belaste staven	49
6.4	Validatie	54
6.5	Conclusie	54

Literatuuroverzicht

Bijlage 1	Gegevens van de elementen LINK8 en BEAM4
Bijlage 2	Overzicht knooppunten
Bijlage 3	Overzicht elementen
Bijlage 4	Output uit Ansys van belastinggeval 2
Bijlage 5	Output uit Ansys van belastinggeval 3

Samenvatting

In deze scriptie maak ik een sterkteberekening van een hoogspanningsmast. De mast die ik bekijk is een **steunmast**. Deze mast is samen met andere steunmasten en de nodige hoek- en **trekmasten** onderdeel van een **hoogspanningslijn**. Er wordt een onderverdeling gemaakt in de belastingen op de mast die is gebaseerd op de variatie in de tijd. Er worden drie soorten **belastingen** onderscheiden:

- permanente belastingen
- veranderlijke belastingen
- bijzondere belastingen

De **permanente** belastingen zijn altijd aanwezig zoals bijvoorbeeld het eigen gewicht van de geleiders en de isolatoren. De veranderlijke belastingen variëren in de tijd. Deze belastingen kunnen meerdere waarden hebben. Dit kan bijvoorbeeld in de vorm van een **normaalverdeling** zijn. Om de **druk** van de wind om te kunnen zetten naar belastingen wordt de druk vermenigvuldigd met het aangeblazen oppervlak en een drietal factoren. Deze factoren brengen windvlagen, de gevoeligheid voor resonantie en de **vorm** van het beschouwde onderdeel in rekening. De bijzondere belastingen treden zelden of nooit op. Draadbreuk is hier een voorbeeld van.

Alle belastingen zijn uitgerekend met behulp van de **norm** NEN-EN 50431 'Bovengrondse elektrische lijnen boven 45kV **wisselspanning**'. Vervolgens zijn in Ansys de **knooppuntverplaatsingen** berekend en daarmee zijn de **normaalkrachten** in de staven en de **spanningen** bepaald.

Met deze waarden voor de **normaalkrachten** en de **spanningen** heb ik vervolgens een paar controle berekeningen van de mast **gedaan**. Een controle op trek- en **drukspanningen** en een controle op lokale instabiliteit (knik). Deze **voldoen**.

Conclusie

Het totaal doorrekenen van een hoogspanningsmast volgens de norm NEN-EN 50341 is een enorm karwei. Ik heb dan ook maar een klein deel hiervan gedaan. Wel heb ik zo breed mogelijk gekeken naar de hele sterkteberekening van een hoogspanningsmast. Dus in plaats van nog weer een ander knikgeval bekijken heb ik ook gekeken waar de 'peak factor' vandaan komt en waarom Essent een benaderingsformule voor de kettinglijn formule kan gebruiken. Alhoewel het bepalen van de eigen frequentie van de mast wel in mijn probleembeschrijving staat heb ik het verder niet meer behandeld in mijn scriptie. In de literatuur wordt vermeld dat masten onder de 60 meter niet gevoelig zijn voor dynamische windinvloeden en dat dan ook de eigen frequentie niet hoeft te worden getoetst. Bij navraag bij het Ingenieursbureau Zuid van Essent (verantwoordelijk voor de hoogspanningsmasten bij Essent regio zuid) bleek dat er hier nooit op eigen frequentie werd getoetst. Ook niet bij masten hoger dan 60 meter. Het dynamische deel van de windbelasting wordt in rekening gebracht door de dynamische resonantie factor voor een vakwerkmast G_{st} . Hier zitten de eigen frequentie en de dempingsmaat voor de mast in.

De steunmast, die ik onderzocht heb, voldoet in ieder geval voor wat de trek- en drukspanningen betreft. Voor de lokale knik voldoet hij ook maar of hij voor de globale knik voldoet weet ik niet. Ik heb geen globale knik analyse gedaan, want de prioriteit kwam steeds meer bij de berekening volgens de norm te liggen. Ook heb ik veel tijd gestoken in het uitzoeken van het hoe en waarom van de norm, in plaats van het alleen maar toe te passen. Dat betekent dat aan de ene kant niet alles is bereikt wat ik me bij aanvang van deze afstudeeropdracht had voor genomen, maar dat ik aan de andere kant meer geleerd heb over de achterliggende theoretische gedachte van de norm.

Formuleblad

$$f = \frac{ga^2}{8p} + \frac{g^3 a^4}{384p^3} + \dots$$

(Essent Ingenieursbureau Zuid)

$$h = \frac{F_H}{w_0} \left(\cosh \left(\frac{w_0 L}{2F_H} \right) - 1 \right)$$

(Hibbeler, Mechanica voor
technici Statica, blz 341 en 342)

$$\frac{\ell}{2} = \frac{F_H}{w_0} \sinh \left(\frac{w_0}{F_H} x \right)$$

(Hibbeler, Mechanica voor
technici Statica, blz 341 en 342)

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$$

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{A \cdot E}$$

$$Q_{wx} = q_h \times G_q \times G_x \times C_x \times A$$

(NEN-EN 50341-1, blz 51)

$$Q_{wc} = q_h \times G_q \times G_c \times C_c \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi$$

(NEN-EN 50341-1, blz 53)

$$Q_{wins} = q_h \times G_q \times G_{ins} \times C_{ins} \times A_{ins}$$

(NEN-EN 50341-1, blz 54)

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times C_T \times G_{sT} \times A_t$$

(NEN-EN 50341-3, blz 11)

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times (1 + 0,2 \times \sin^2 2\phi) \times (C_{T1} \times A_{t1} \times \cos^2 \phi + C_{T2} \times A_{t2} \times \sin^2 \phi) \times G_{sT}$$

(NEN-EN 50341-1, blz 54)

$$Q_{lc} = g_R \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right)$$

(NEN-EN 50341-1, blz 57)

$$g_R = 1,8\sqrt{d}$$

(NEN-EN 50341-3, blz 12)

$$Q_{W;lc} = q_h \times G_q \times G_c \times C_c \times D \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi$$

(NEN-EN 50341-1, blz 59)

$$F_d = \gamma_f \cdot F_k$$

(NEN-EN 50341-1, blz 45)

$$f_{uit;gest;buc} = \left(\frac{3}{4} - \frac{3}{8} \alpha_1 \left(1 + \frac{\ell_{uit;ongest;sys}}{\ell_{uit;ongest;buc}} \right) \right) \frac{F_{1;s;d}}{F_{2;s;d}} + \frac{1}{4} \alpha_1 \left(1 + \frac{\ell_{uit;ongst;sys}}{\ell_{uit;ongets;buc}} \right) + \frac{1}{2}$$

(NEN 6771, art. 12.1.1.3.1)

$$\ell_{uit;gest;buc} = f_{uit;gest;buc} \times \ell_{uit;ongest;buc}$$

(NEN 6771, art. 12.1.1.3.1)

$$\lambda_y = \frac{\ell_{uit;gest;buc}}{i_y}$$

(NEN 6771, art. 12.1.1.2)

$$\lambda_{y;rel} = \frac{\lambda_y}{\lambda_e}$$

(NEN 6771, art. 12.1.1.2)

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc} N_{c;u;d}} \leq 1 \text{ en } \frac{N_{c;s;d}}{\omega_{v;buc} N_{c;u;d}} \leq 1$$

(NEN 6771, art. 12.1.1.1)

1 Inleiding

1.1 Inleiding

Dit is de opzet voor de scriptie waarmee ik mijn opleiding aan de Hogeschool van Utrecht, faculteit **Natuur** en Techniek, **deeltijdopleiding Werktuigbouw** afsluit.

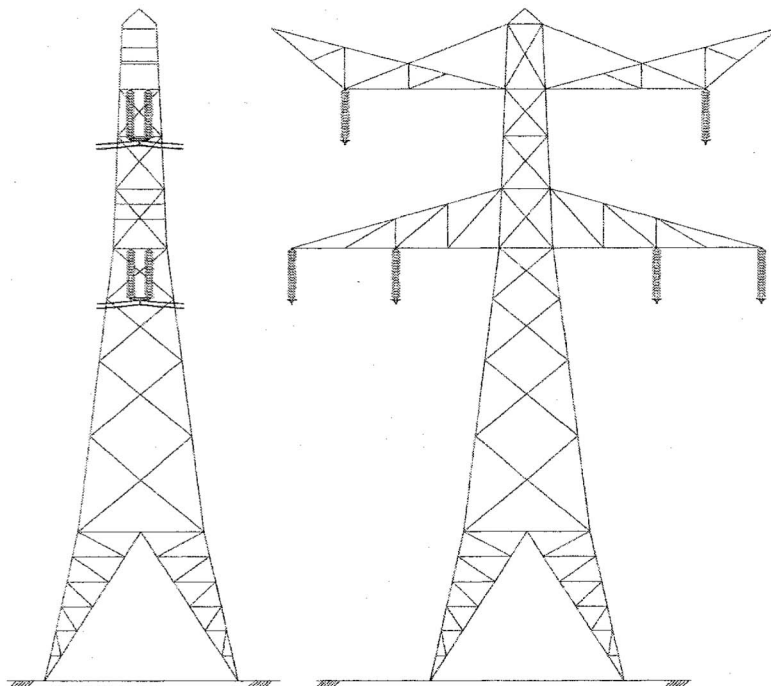
Wat te bestuderen object is een bestaande hoogspanningsmast van Essent.

Dit is een complexe constructie (3-D vakwerk) die ik aan de hand van bestaande **normen** en met behulp **van** een eindig elementen pakket controleer op sterkte, stabiliteit en eigen frequentie.

1.2 Probleemstelling

1.2.1 Beschrijving studie object

Het te controleren object is een hoogspanningsmast die is opgebouwd als een 3-D vakwerk uit hoekstalen (zie figuur 1.2.1) Aan **elke** mast hangen zes kabelbundels en elke bundel bestaat uit drie **stroomkabels** (geleiders). De bundels **zijn** verdeeld over twee niveaus: vier stuks op de onderste en twee stuks op de bovenste traversen.



Figuur 1.2.1 Schets van de hoogspanningsmast

1.2.2 Probleembeschrijving

Deze scriptie omvat het berekenen van de sterkte, de stabiliteit en de eigen **frequentie** van **een** bestaande mast. Dit wordt gedaan met behulp **van** het eindige elementen methode pakket Ansys. Voor zover mogelijk worden de resultaten **gevalideerd**.

1.2.3 Probleem analyse

Het probleem van het controleren van deze mast met behulp van Ansys is in een aantal sub problemen op te delen.

2. **Bepalen** van de belastingen op de **mast**.
2. **Maken** van een model dat in Ansys **gebruikt** kan worden aan de **hand van** de geometrie en **materiaalspecificaties** van een bestaande mast.
3. **Het** daadwerkelijke uitrekenen en controleren met **Ansys** van de sterkte, de **knikstabiliteit** en de eigen **frequentie** van de mast.
4. De **validatie** van de **verkrege**n resultaten.

1.2.4 Actieplan en randvoorwaarden

- Ad.1 Berekeningen controle met behulp van de norm: NEN-EN 50341 Bovengrondse **elektrische** lijnen boven 45 kV **wisselspanning**. (**Deel 1 tm 3**)
- Ad.2 Er moet **rekening** mee worden **gehouden** dat alle belastingen op een knooppunt in de geometrie **van de mast aan** moeten grijpen. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de **windbelasting** die omgezet moet gaan worden van een **druk** op een vlak naar een kracht op een knooppunt.
- Ad.3 In Ansys worden **aan de hand van de verplaatsingen** van de **knooppunten** de **staafkrachten** bepaald. Met deze **resultaten** worden de spanningen in de **hoekprofielen** bepaald.
Vanwege de complexiteit van de **constructie** zal ik de globale **knikstabiliteit** en de globale eigen **frequentie niet handmatige** kunnen controleren. Wel doe ik een **aantal** controles op de verschillende soorten **knik** die in de mast voor zouden kunnen komen.
- Ad.4 Valideren aan de hand van een test opstelling ligt helaas buiten bereik. Ik **gebruik** de in Ansys uitgerekende resultaten voor de reactie krachten en de uitwendige krachten om te **controleren** op evenwicht voor de gehele **constructie**. Verder kijk ik of **trekstaven** waarvan ik zeker weet dat het trekstaven moeten zijn ook **daadwerkelijk trekstaven zijn** en hetzelfde geldt voor **drukstaven**.

2 Opbouw van een hoogspanningslijn

2.1 Inleiding

Het transport van **elektrische** energie met spanningen van 150 kV vindt in Nederland vrijwel geheel met behulp van bovengrondse **hoogspanningslijnen** plaats. **Deze hoogspanningslijnen** nemen onder de componenten, **waaruit de elektriciteitsnetten** zijn opgebouwd, een bijzondere plaats in. In tegenstelling tot stations en kabels zijn de masten "vrij **toegankelijk**". Bij de bouw van een hoogspanningslijn wordt zeer veel aandacht besteed aan het inpassen in het bestaande landschap. Toch kan niet worden voorkomen dat de Zijnen op zeer veel plaatsen **nadrukkelijk** in het landschap aanwezig zijn. **Hoogspanningslijnen** nemen relatief veel plaats in. Er is vrijwel geen plaats in Nederland te **vinden** waar **niet** een of meerdere masten van **hoogspanningslijnen** zichtbaar **zijn**. Een **en** ander is er **oorzaak** van dat lijnen vaak onderwerp zijn **van** discussie met de overheid **en** met de **bevolking**.

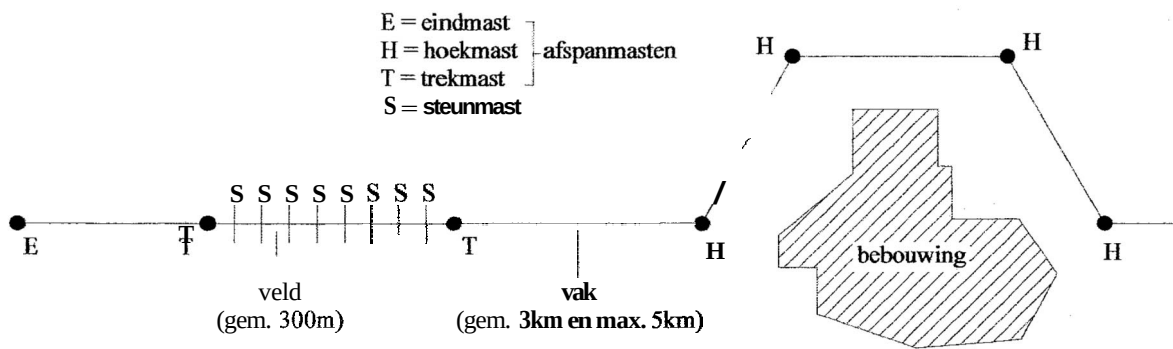
Om een idee te geven om hoeveel masten het gaat: in het **voorzieningsgebied** van Essent Netwerk Zuid staan 2533 masten, die 730 km **dubbelcircuit** lijnen dragen. Dit is inclusief 61 masten en 25 km **tracélengte van** lijnen die in eigendom **zijn van** derden **maar** door Essent Netwerk Zuid worden beheerd (cijfers uit 2004). De 380 kV-lijnen van het landelijke koppelnet zijn hierbij niet **meegeteld**.

2.2 Een hoogspanningslijn

Een hoogspanningslijn **bestaat** uit een of meerdere circuits. Wanneer de **hoogspanningslijn** voor draaistroom is bestemd is het circuit opgebouwd uit drie fasen. Dit is in Nederland altijd het geval maar in het **buitenland** komen ook lijnen voor die gelijkstroom **transporteren**. Elke fase heeft zijn eigen geleider systeem. De geleidersystemen vervullen de basistaak van de lijn: het geleiden van de **elektrische** energie van de **ene** plaats **naar** de andere. De geleiders zijn door middel van isolatoren **aan** de masten verbonden. De isolatoren hebben een mechanische **taak**, de geleiders dragen, en daarnaast **een elektrische** isolerende taak.

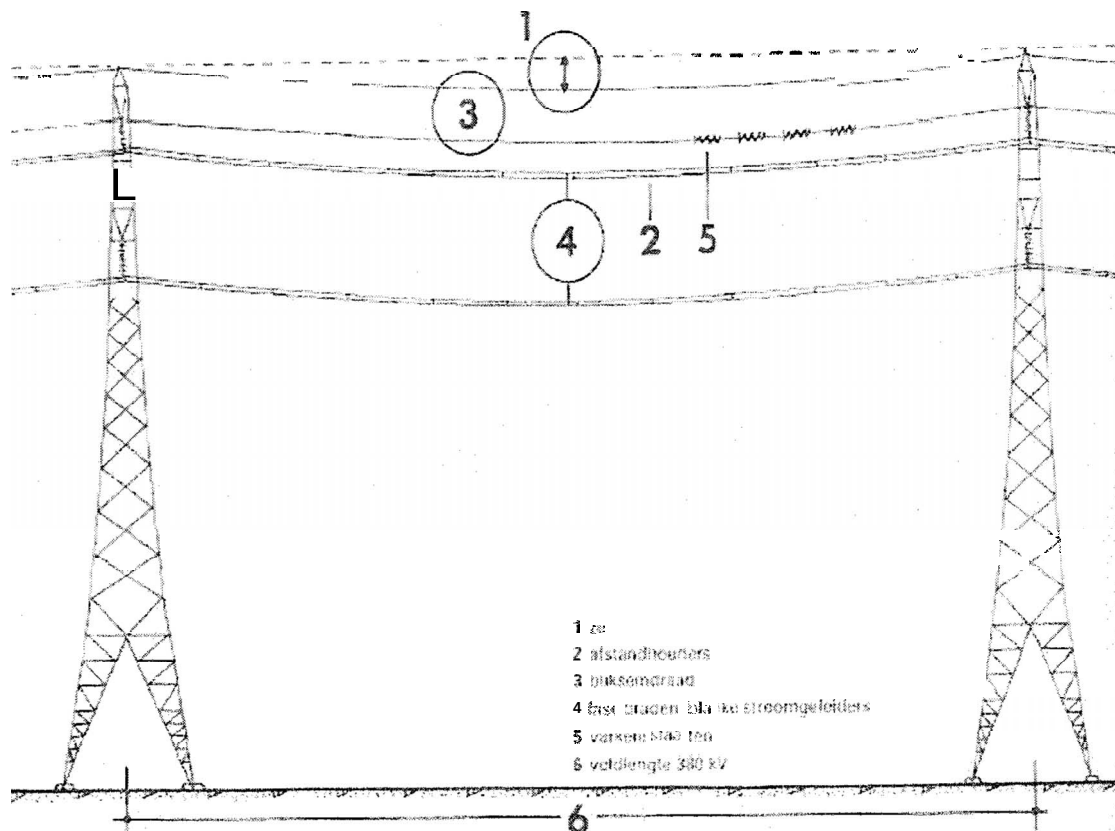
De uitgangsgegevens bij het ontwerpen van **een hoogspanningslijn** zijn het begin en eindpunt **van de lijn**, de **gewenste transportcapaciteit** en de heersende **kortsluitstromen**. Op basis van de stromen onder **normale** omstandigheden en bij kortsluiting wordt het type en de doorsnede van de geleiders bepaald. De gekozen geleider **bezit** een toegelaten treksterkte, die in het vervolg van de berekeningen wordt gehanteerd.

In principe zou men voor een **hoogspanningslijn** kunnen volstaan met twee masten, één aan het begin en één aan het eind van de lijn. Die masten zouden dan echter enorme afmetingen moeten hebben om de **doorhang** van de geleiders op te vangen. Daarnaast zouden de masten extreme krachten moeten **kunnen** verwerken om de door het gewicht **van** de geleiders, inclusief de **eventuele ijslast** en de **daarop** werkende windkrachten te kunnen opvangen. Het ligt dus erg voor de **hand** om het tracé in meerdere **stukken** op te delen. Deze stukken worden vakken genoemd. Op rechte stukken van de lijn is een vak **maximaal 5** km lang. Daarnaast worden vakken begrensd door het begin **en** het **einde** van de lijn en de hoeken in het **tracé**. Am **beide** uiteinden van een vak **staan** masten, die geschikt zijn om de door de geleiders veroorzaakte trekkrachten op te vangen. Deze masten worden **afspanmasten** genoemd.



Figuur 2.2.1 De verschillende types masten op een lijntracé

Een vak wordt weer verdeeld in velden. Op het grenspunt van elk veld staat een mast, die aanmerkelijk lichter is uitgevoerd **dan** de afspanmasten, en die **steunmast** wordt genoemd. Dit type mast wordt **gebruikt** op de rechte stukken van de lijn. De steunmast moet enerzijds het gewicht van de geleiders inclusief het eventueel op de geleiders afgezette ijs kunnen dragen (verticale kracht). Anderzijds moet de mast de horizontale krachten veroorzaakt door de loodrecht op de lijn staande wind kunnen verwerken. Daarnaast wordt in **beperkte** mate rekening gehouden met krachten als gevolg van draadbreek. De gemiddelde veldlengte **van** 150 kV-lijnen is 300 meter.



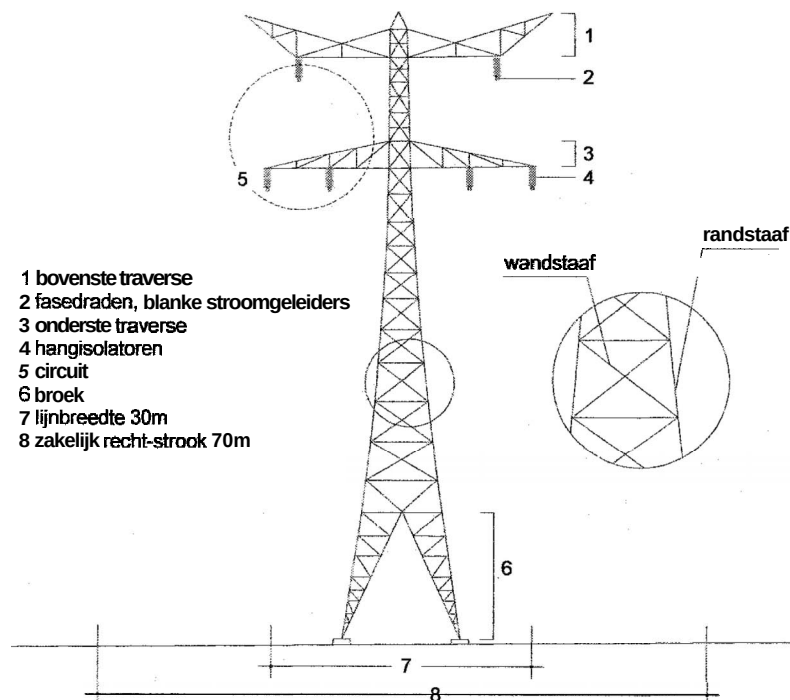
Figuur 2.2.2 Een veld van een hoogspanningslijn met twee steunmasten

Er zijn verschillende soorten **afspanmasten**. Wanneer de lijn een hoek maakt zullen op de mast op die hoek krachten in meerdere richtingen werken. Het op die plaats gebruikte **masttype**, dat **hoekmast** wordt genoemd, dient **aanmerkelijk** meer krachten te verwerken dan een **steunmast** en is daarom aanzienlijk zwaarder uitgevoerd (en daardoor ook veel duurder). Het is evident dat men dit type masten zoveel mogelijk **wil vermijden** en de **lijn** zoveel mogelijk in rechte lijn wil bouwen. Maar **zelfs** in het theoretische geval van een volledig rechte **hoogspanningslijn** zal om de 5 km een zware mast moeten worden gebouwd, die grotere krachten dan een **steunmast** moet **kunnen verwerken**. Dit type **afspanmast**, dat **trekmast** wordt genoemd, moet bij eventuele draadbreek ervoor zorgen dat de lichtere **steunmasten** door de grotere **krachten** niet omvallen. Tengevolge van de draadbreek zullen de geleiders in de aanpalende velden verder gaan doorhangen. Dankzij de **trekmast** zal die **slechts** voor een beperkt gebied gelden.

Aan het begin en het einde van de lijn **werken** de krachten **van** de geleiders vrijwel geheel naar een zijde. Om deze eenzijdige krachten te kunnen opvangen dienen ook op deze plaatsen **zwaardere afspanmasten** te worden geplaatst. Deze masten **worden** eindmasten genoemd. Om te zorgen dat de op de masten inwerkende krachten naar de omringende aarde kunnen worden overgebracht zijn de masten voorzien van zware fundaties. Om te voorkomen dat de geleiders getroffen worden door blikseminslag en de **daarmede** verband houdende **overspanningen** wordt de lijn voorzien van een **bliksembeveiliging** bestaande uit een of meerdere geaarde **bliksemraden**.

23 De vakwerkmast

De masten hebben als taak de geleiders voldoende **afstand** te **geven naar** de aarde en de zich daarop bevindende objecten. Daarnaast zorgen de **masten** ervoor dat de verschillende geleiders voldoende afstand **naar** elkaar houden.



Figuur 2.3.1 De onderdelen van een hoogspanningsmast

De **vakwerkmast** is opgebouwd uit een zeer groot aantal stalen profielen, die met behulp van **boutverbindingen** met elkaar gekoppeld worden. In het **algemeen** worden standaard staalsoorten voor de profielen **gebruikt**. Een **uitzondering** vormt het materiaal van de **hoekstijlen**. Deze onderdelen dienen grote krachten te verwerken en worden vaak uit **hoogwaardigere staalsoorten** vervaardigd. Bij **toepassing** van standaard **staalsoorten** zouden de hoekstijlen te zwaar worden. De onderkant van de mast, de poten, wordt de broek of het broekstuk van de mast genoemd. Dit stuk is in **agrarische** gebieden vaak verbreed zodat het **mogelijk** is om met **landbouwvoertuigen** tussen de **randstaven** van de mast door te rijden. Het verticale vakwerk **vormt** het **mastlichaam**. Om de geleiders op voldoende afstand van het mastlichaam te kunnen bevestigen worden horizontale **armen**, traversen genoemd, aangebouwd.

Om het **klimmen in de** mast te **vergemakkelijken** worden aan twee zijden van het mastlichaam **klimvoorzieningen** aangebracht. In de traversen **zijn** bij de nieuwere **hoogspanningslijnen** **loopbordessen** aangebracht waardoor het **makkelijker** wordt zich **in** de traverse te verplaatsen.

3 Berekeningswijze voor de belastingen op de mast

3.1 Inleiding

Zoals voor alle onderdelen van de hoogspanningsnetten bestaat er ook voor **hoogspanningslijnen** een norm. Deze norm, NEN-EN50341 Bovengrondse elektrische lijnen boven 45 kV **wisselspanning-Deel 1**, is opgesteld in Europees verband en geldt voor het grootste deel voor alle landen van de Europese Gemeenschap. Deel 3 van deze norm behandelt de specifiek voor Nederland geldende voorschriften. Deel 2 is **alleen** maar een register waarin staat **welke** Europese landen een eigen aanvullende norm hebben en deze wordt verder niet gebruikt in deze scriptie.

In dit hoofdstuk leg ik uit hoe ik de belastingen op de mast ga berekenen en ook **waarom** ik op deze manier heb gerekend. Het uitrekenen van de belastingen op de mast zelf gebeurt in hoofdstuk 4. Hoofdstuk 5 gaat over het model en de invoer van de belastingen in **Ansys**. Hiermee worden dan de berekeningen gedaan waarna in hoofdstuk 6 een controle wordt gedaan op de **mast**. Dit houdt in dat ik ga **kijken naar** de trek en **drukspanningen** in de **afzonderlijke** staven en dat ik ga **kijken** naar de **knikstabiliteit**. Hierbij **kijk** ik **naar** de zwaarst belaste staven en naar een bijzonder geval voor een vakwerk mast, namelijk de **elkaar kruisende staven** in één vlak.

3.2 Belastingen op de mast

Hoogspanningslijnen worden beschouwd als één langgerekte **constructie** bestaande uit **vele** componenten. De belastingen op de hoogspanningsmasten (één van de componenten) worden herleid uit de belasting op de totale constructie. Dit betekent dat de uiteindelijke **krachten** die op de fundatie van de mast werken het resultaat **zijn** van alle belastingen op de geleiders, de **isolatoren en** op de **mast zelf**. Eigen gewicht van geleiders en isolatoren maar ook de wind- en **ijsbelasting** op deze onderdelen werken als belasting op de **mast**.

Al deze **belastingen** **zijn** als volgt in te delen:

- permanente belastingen
 - eigen gewicht van de mast
 - eigen gewicht van de isolatoren en van de geleiders
 - **trekbelasting** van de geleider
- veranderlijke belastingen
 - wind
 - ijs
- bijzondere belastingen
 - **onderhoudsbelasting** t.g.v. onderhoud aan de **lijn**
 - afwezigheid van geleiders
 - draadbreuk

3.3 Permanente belastingen

Eigen gewicht van de mast, isolatoren en de geleiders van de twee aanliggende **velden** zijn **permanente** belastingen. Gewicht hiervan in N wordt in rekening gebracht.

Ook de trekkracht van de geleiders op de isolatoren wordt tot de **permanente belastingen** gerekend **ook** al varieert deze wel met de temperatuur van de geleider.

Op basis van de stromen onder normale omstandigheden en bij kortsluiting wordt **het** type en de doorsnede **van** de geleiders (de **fasedraden**) bepaald. De **maximale** stroomsterkte is die waarde waarbij de geleider **niet** warmer wordt dan 80 °C bij **aluminiumgeleiders**.

De gekozen geleider bezit een toegelaten treksterkte, die in het **vervolg** van de berekeningen wordt gehanteerd. De **maximale** trekkracht in de geleider mag niet hoger zijn **dan** 40% van de breukbelasting. Indien de breukbelasting bij 10 °C, de EDS (**every day stress**) groter is dan **14%** moeten er trillingsdempers **toegepast** worden. Getracht wordt dus om de EDS onder de 14% te houden. Iets wat in de praktijk niet altijd lukt.

De **trekspanning** in de geleider wordt **beïnvloed** door de temperatuur **van** de geleider. Bij een hoge temperatuur van de geleider is de zeeg groter (de geleider hangt verder door) en bij een lagere **temperatuur** is de zeeg kleiner. Bij een **kleinere** zeeg staat de geleider strakker en is ook de trekspanning in de **geleider** hoger.

Voor de aangrenzende velden **van** de **steunmast** die ik in deze scriptie doorreken **staan** in tabel 4.4.1 de **waarden** voor de trekspanning en voor de zeeg bij een gegeven temperatuur.

Bij het berekenen van de **trekspanning** in de geleider in **tabel 4.4.1** heeft Essent gebruik **gemaakt** van de volgende **benaderingsformule** van de **formule** voor de kettinglijn **waarbij** **alleen** de eerste term gebruikt wordt:

$$f = \frac{ga^2}{8p} + \frac{g^3 a^4}{384p^3} + \dots$$

waarbij:

f = de zeeg in m

g = het 'soortelijk gewicht' van de geleider in $N/m \cdot mm^2$

a = **veldlengte** in m

p = **trekspanning** in N/mm^2

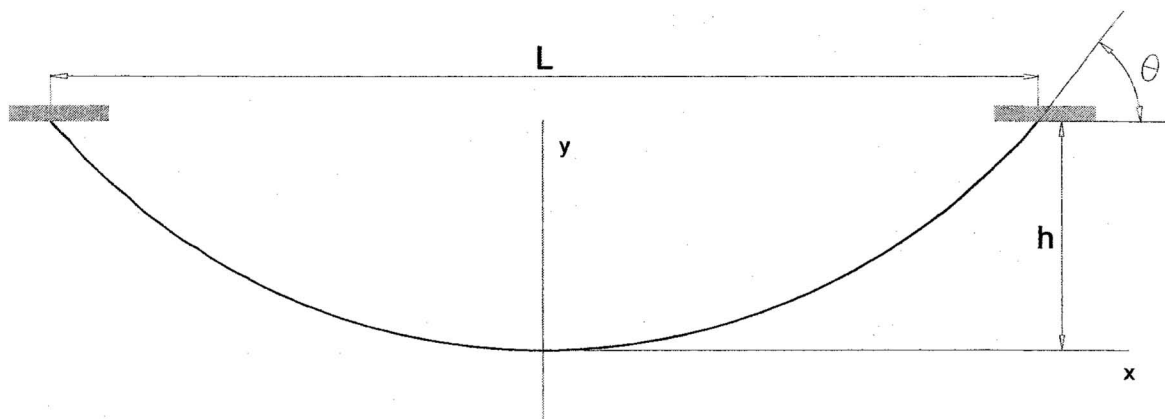
Ik heb dit nagerekend bij twee temperaturen en vervolgens ook gekeken met een 1^e orde benadering welk deel van de verandering van de zeeg is toe te schrijven aan de temperatuur verandering en welk deel aan de gelijktijdige verandering van de trekspanning in de geleider. De gegevens die ik hiervoor heb **gebruikt** staan in tabel 3.3.1 en deze komen uit **tabel 4.4.1** (blz 30): **Trekspanning** en zeeg bij een bekende **geleidertemperatuur** (Bron: Essent).

Veld I		
Temperatuur °C)	Trekspanning (N)	Zeeg (m)
10	8850,0	6,81
30	8053,5	7,48

Tabel 3.3.1

De gegevens van de geleider komen uit § 4.2. Ik heb bij beide temperaturen de trekspanning uitgerekend en deze vergeleken met de waarden in tabel 3.3.1.

De waarde berekend met de **formule** voor de kettinglijn en de waarde berekend met de **formule** van Essent wijken **nauwelijks** van elkaar af. Bij 10 °C is er een verschil van 0,1% en **bij** 30 °C is er een verschil van 0,2%. Het **gebruik** van de **eenvoudigere** Essent **formule**, en dus ook van de waarden in **tabel 4.4.1**, is dus goed verdedigbaar.



Figuur 3.3.1 Voorbeeld berekening zeeg en trekspanning

h = zeeg in m

F_H = horizontale component van de trekkracht in N

w_0 = gewicht van de geleider in N/m

L = overspanning in m

θ = hoek tussen de raaklijn aan de kettinglijn en de horizontaal in graden

ℓ = kabellengte in m

Ik gebruik in de volgende berekening soms tot 4 cijfers achter de komma omdat juist hier het verschil in zit. De lengten zijn in meters en de verschillen zijn in de orde van grootte van millimeters.

Bij 10 °C:

$$h = \frac{F_H}{w_0} \left(\cosh \left(\frac{w_0 L}{2F_H} \right) - 1 \right)$$

$$6,81 = \frac{F_H}{6,12} \left(\cosh \left(\frac{6,12 \times 281}{2F_H} \right) - 1 \right) \Rightarrow F_H = 8814 \text{ N}$$

$$\frac{\ell}{2} = \frac{F_H}{w_0} \sinh \left(\frac{w_0 x}{F_H} \right)$$

$$\frac{\ell}{2} = \frac{8813,99}{6,12} \sinh \left(\frac{6,12}{8813,99} \times 140,5 \right) = 140,723 \text{ m}$$

$$L_{,,} = 281,446 \text{ m}$$

$$\tan \theta_{\max} = \frac{6,12 \times 140,723}{8813,99} = 0,097711 \Rightarrow \theta_{\max} = 5,58^\circ$$

$$T_{\max} = \frac{F_H}{\cos \theta_{\max}} = \frac{8813,99}{\cos 5,58^\circ} = 8856 \text{ N}$$

Bij 30 °C:

$$7,48 = \frac{F_H}{6,12} \left(\cosh \left(\frac{6,12 \times 281}{2F_H} \right) - 1 \right) \Rightarrow F_H = 8026 \text{ N}$$

$$\frac{\ell}{2} = \frac{8025,8}{6,12} \sinh \left(\frac{6,12}{8025,8} \times 140,5 \right) = 140,769 \text{ m}$$

$$L_{30} = 281,538 \text{ m}$$

$$\tan \theta_{\max} = \frac{6,12 \times 140,769}{8025,8} = 0,107 \Rightarrow \theta_{\max} = 6,12^\circ$$

$$T_{\max} = \frac{F_H}{\cos \theta_{\max}} = \frac{8025,8}{\cos 6,12^\circ} = 8072 \text{ N}$$

De verlenging als gevolg van een stijging van de geleider temperatuur van 10 °C naar 30 °C berekend met de formule voor de kettinglijn is:

$$\Delta L = L_{30} - L_{10} = 281,538 - 281,446 = 0,0919 \text{ m}$$

Als ik alleen reken met de formule voor de verlenging als gevolg van een temperatuur verandering kom ik op de volgende waarde uit:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 18,9 \times 10^{-6} \times 281,446 \times 20 = 0,106 \text{ m}$$

Het verschil tussen uitkomsten van de beide methoden is 0,014 m (13%).

Dit is op de volgende manier te verklaren.

Bij de berekening met behulp van de zeeg is het feit dat de geleider langer is geworden als gevolg van de toename van de temperatuur maar ook korter door de lagere trekspanning beide in rekening gebracht. Bij de methode met de temperatuurcoëfficiënt is de verkorting als gevolg van de lagere trekspanning nog niet in rekening gebracht. Dit kan op de volgende manier:

$$\Delta l = \frac{F \cdot \ell}{A \cdot E} = \frac{784,05 \times 281,538}{177 \times 77000} = 0,016 \text{ m}$$

$$\Delta L = 0,106 - 0,016 = 0,09 \text{ m}$$

Dit is nog een verschil van ⁹1,9 mm (2%).

De verklaring hiervoor is dat het een 1^e orde benadering is en geen exacte berekening. Ik reken eerst de verlenging uit t.g.v. de temperatuursverandering en daarna de verkorting als gevolg van de verlaagde trekspanning terwijl dit in werkelijkheid tegelijkertijd gebeurt. Hiervoor zou ik een differentiaalvergelijking op moeten stellen maar dat ligt in dit geval buiten mijn bereik.

Uit de benaderingsformule van de kettinglijn formule blijkt wel duidelijk dat de zeeg toeneemt met het gewicht van de geleider en met het kwadraat van de afstand tussen de masten en dat de zeeg omgekeerd evenredig is met de trekspanning.

De trekspanning wordt mede bepaald **door** de lengte van de geleider, die op **zijn** beurt weer evenredig is met de temperatuur.

Het bepalen van de **trekspanning** en zeeg gebeurt via een “**trail and error**” methode. Voor de trekspanning wordt er gekeken bij een temperatuur van $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in combinatie met **ijsbelasting**. De trekspanning is dan **maximaal**. Voor de zeeg wordt er gekeken bij een temperatuur van $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. **Dan** is de zeeg **maximaal**. Bij **een** te lage trekspanning zal de geleider dus bij hogere temperaturen te veel **doorhangen** en word mogelijk de afstand tot objecten onder of in de buurt van de **hoogspanningslijn** te klein. Bij een te hoge **trekspanning** voldoe je **niet aan** de norm van $< 40\%$ breukbelasting en de EDS **kan** te hoog worden.

3.4 Veranderlijke belastingen

Algemeen

De veranderlijke belastingen worden sterk **beïnvloed** door de klimatologische omstandigheden die van land tot land of **zelfs** van streek tot streek **verschillen**. De voor Nederland **aan** te houden **klimatologische** gegevens **staan** dan ook in deel 3 van de **norm** NEN-EN 50341-3, met daarin de nationale **normatieve** aspecten.

3.4.1 Windbelasting op hoogspanningslijn elementen

Windbelasting op enig element van de **hoogspanningslijn**

De **druk** als gevolg van de wind is evenredig met het kwadraat van de windsnelheid. Om tot krachten als gevolg van de wind te komen wordt de druk **vermenigvuldigd** met het betrokken oppervlak en een drietal **factoren**. Deze **factoren** brengen windvlagen, de gevoeligheid **voor** resonantie en de **vorm** van het beschouwde onderdeel **in** rekening.

Er zijn drie gevallen **waarbij** **windbelasting** een rol speelt:

- **windbelasting** op de geleiders
- **windbelasting** op de isolatoren
- **windbelasting** op de mast

De waarde **van** de **kracht** **Q** **ten gevolge** van een horizontale wind loodrecht op **enig** element van de **hoogspanningslijn** volgt uit de volgende **formule**:

$$Q_{\text{e}} = q_h \times G_q \times G_x \times C_x \times A$$

waarbij:

q_h is de dynamische winddruk

$$q_h = \frac{1}{2} \rho \times V_h^2 \text{ in } \text{m/s}$$

ρ is de luchtdichtheid in kg/m^3

V is de windsnelheid loodrecht op enig element op een **hoogte** h boven de grond in m/s . De **wind** snelheid neemt **logaritmisch** toe met de hoogte.

G_x is de vlag factor

$$G_q = \left(1 + (2 \times g) / \ln \frac{h}{z_0} \right) \quad g \text{ is de "peak factor"} = 3,5$$

De **windbelasting** wordt beschouwd als een dynamische belasting. De **windstuwdruk** p , wordt **daarom** gesplitst in een gemiddelde belasting en in een vlag belasting.

$$p_w = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho (v_{gem} + v_{vlaag})^2 = \frac{1}{2} \rho v_{gem}^2 \left(1 + \frac{2v_{vlaag}}{v_{gem}} + \frac{v_{vlaag}^2}{v_{gem}^2} \right)$$

De term $\frac{v_{vlaag}^2}{v_{gem}^2}$ is te verwaarlozen ten opzichte van de andere termen waarna overblijft:

$$p_w = \frac{1}{2} \rho v_{gem}^2 \left(1 + \frac{2v_{vlaag}}{v_{gem}} \right)$$

De norm NEN 6702 gaat uit van een variantie-spectrum voor fluctuaties in de windbelasting die binnen één uur op kunnen treden. De waarde van v_{vlaag} die eens per uur wordt overschreden, is ongeveer gelijk aan 3,5 maal de standaardafwijking van de windsnelheid. Voor de extreme winddruk volgt dus:

$$p_w = \frac{1}{2} \rho v_{gem}^2 (h) \left(1 + 2 \times 3,5 \frac{\sigma_v(h)}{v_{gem}(h)} \right) = \frac{1}{2} \rho v_{gem}^2 (h) (1 + 7I(h))$$

waarbij:

$$I(h) = \frac{\sigma_v(h)}{v_{gem}(h)} = \frac{1}{\ln \frac{h-d}{z_0}}$$

I_z is de turbulentie-intensiteit: dit is een maat voor de vagerigheid van de wind

z_0 is een maat voor de ruwheid van het terrein (de zogeheten ruwheidslengte)

d is een maat voor de nulpuntsverschuiving van het windprofiel (de zogeheten verplaatsingshoogte)

G_x is de constructie resonantie factor voor het te bekijken constructie onderdeel.

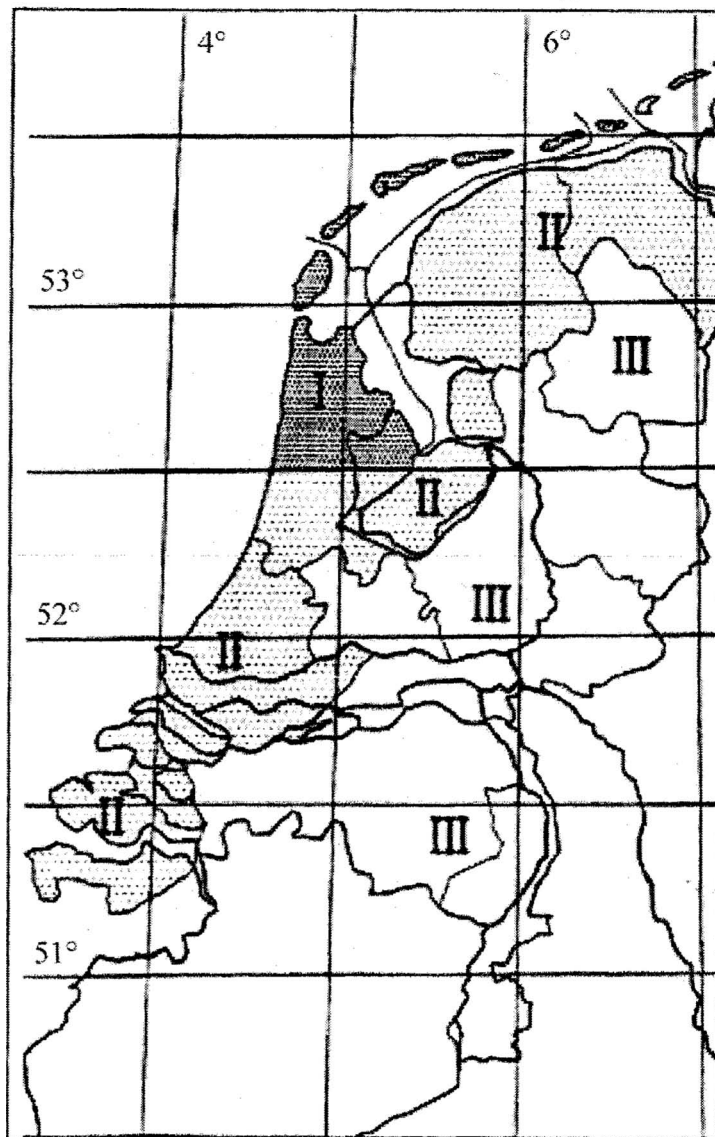
C_x is de weerstandsfactor en deze is afhankelijk van de vorm van het te bekijken element.

A is het oppervlak van het te bekijken element geprojecteerd op een vlak loodrecht op de windrichting.

Nederland is verdeeld in drie zones en in elke zone wordt gerekend met een aparte dynamische winddruk q_h . De verdeling in wind zones staat in figuur 3.4.1.

Het verzorgingsgebied van Essent Zuid valt geheel in windzone 3. De zone met de laagste waarden voor q_h .

In Nederland wordt gebruik gemaakt van een tabel met daarin $q_h \times G_q$, ook wel genoemd de windstuwdruk, als functie van de hoogte (h) en van de betreffende windzone. Zie tabel 3.4.1. Hierin zijn de waarden voor $q_h \times G_q$ (in kN/m^2) gegeven voor niet verstedelijkt gebied.



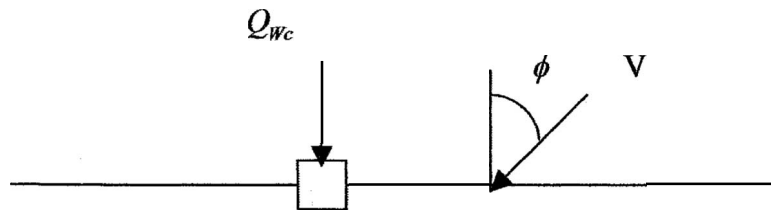
Figuur 3.4.1 Wind zones in Nederland

Hoogte (h) [m]	$q_h \times G_q$ [kN/m ²]		
	Zone 1	Zone 2	Zone 3
2	0,64	0,54	0,46
3	0,70	0,54	0,46
4	0,78	0,62	0,49
5	0,84	0,68	0,55
6	0,90	0,73	0,59
7	0,95	0,78	0,63
8	0,99	0,81	0,67
9	1,02	0,85	0,70
10	1,06	0,88	0,73
11	1,09	0,91	0,76
12	1,12	0,94	0,78
13	1,14	0,96	0,80
14	1,17	0,99	0,82
15	1,19	1,01	0,84
16	1,21	1,03	0,86
17	1,23	1,05	0,88
18	1,25	1,07	0,90
19	1,27	1,09	0,91
20	1,29	1,10	0,93
25	1,37	1,18	1,00
30	1,43	1,24	1,06
35	1,49	1,30	1,11
40	1,54	1,35	1,15
45	1,58	1,39	1,19
50	1,62	1,43	1,23
55	1,66	1,46	1,26
60	1,69	1,50	1,29
65	1,73	1,53	1,32
70	1,76	1,56	1,34
75	1,78	1,58	1,37
80	1,81	1,61	1,39
85	1,83	1,63	1,41
90	1,86	1,65	1,43
95	1,88	1,68	1,45
100	1,90	1,70	1,47
110	1,94	1,74	1,51
120	1,98	1,77	1,54
130	2,01	1,80	1,57
140	2,04	1,83	1,60
150	2,07	1,86	1,62

Tabel 3.4.1 Door wind veroorzaakte extreme waarden van $q_h \times G_q$ (windstuwdruk) als functie van de hoogte (h) en de wind zone

Windbelasting op geleiders

Windbelasting op de geleiders veroorzaakt zowel **krachten** dwars op de richting van de hoogspanningslijn als een hogere trekspanning in de geleiders. De windbelasting Q_{wc} op een steunmast, veroorzaakt door elke subgeleider van de twee aangrenzende velden, volgt uit de volgende formule: $Q_{wc} = q_h \times G_q \times G_c \times C_c \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi$ (zie *figuur 3.4.2*)



Figuur 3.4.2 Windbelasting op een steunmast door de windbelasting op de geleiders

waarbij:

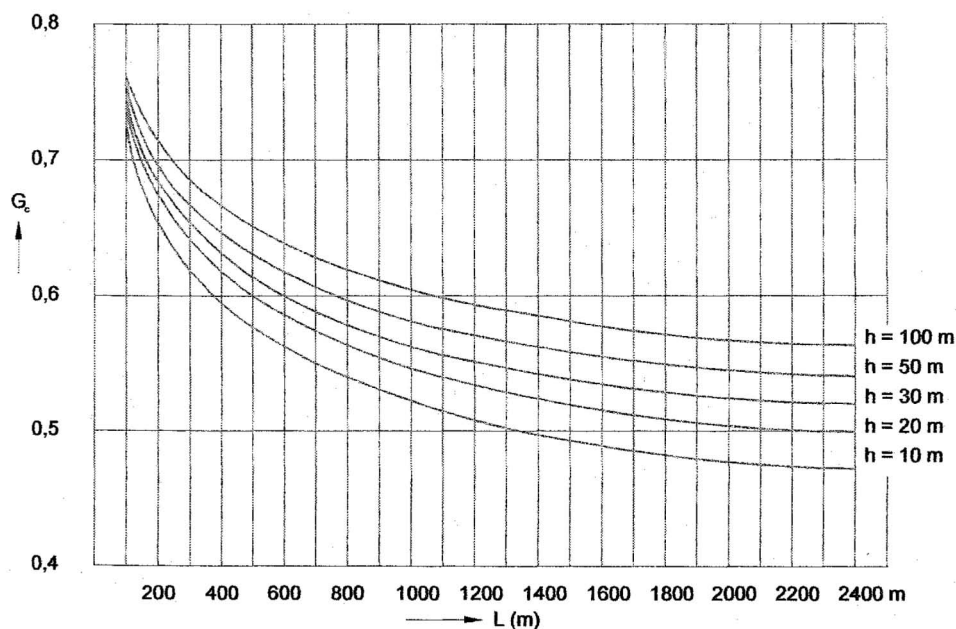
$q_h \times G_q$ is de windstuwdruk als functie van de hoogte (**h**) en voor wind zone 3 in N/m^2 : zie tabel 3.4.1

G_c is de constructie resonantie factor voor een geleider.

Deze is **afhankelijk** van de **vaklengte**. Deze factor brengt ook in rekening het feit **dat** de windbelasting op de geleider in één vak niet overal tegelijk zijn **maximale** waarde bereikt.

De constructie resonantie factor G_c kan worden afgelezen uit *figuur 3.4.3*.

L is **hierbij** de lengte **van** het totale vak in **m**.



Figuur 3.4.3 De constructie resonantie factor G_c

C_c is de weerstandsfactor

$$C_{cl} = 1,0 \quad \text{als } \sqrt{(1,6 \times q_h \times G_q)} \times d \geq 0,48 \text{ m/s}$$

$$C_c = 1,25 \quad \text{als } \sqrt{(1,6 \times q_h \times G_q)} \times d \leq 0,32 \text{ m/s}$$

d is de diameter van de geleider in m

L_1 en L_2 zijn de lengten van de twee aanliggende vakken in m. Het gemiddelde hiervan wordt genoemd de "wind span" L .

ϕ is de invalshoek van de wind in graden.

De totale windbelasting op een bundel van geleiders is gedefinieerd als de som van de krachten op de afzonderlijke geleiders zonder daarbij een eventueel afschermend effect aan de lijzijde van de geleiders in rekening te brengen.

Als wordt gekeken naar windbelastingen op geleiders bij een hoekmast moet er rekening worden gehouden met de invalshoek van de wind links en rechts van de hoekmast en met de veldlengten van de aangrenzende geleiders.

Windbelasting op isolatoren

De windbelasting op isolatoren is de resultante van de windbelasting op de geleiders en de windbelasting op de isolatoren zelf. De windbelasting grijpt aan op het bevestigingspunt van de isolator aan de mast in de richting van de wind. De waarde van de kracht Q_{wms} ten gevolge van een horizontale wind loodrecht op de isolator volgt uit de volgende formule:

$$Q_{wms} = q_h \times G_q \times G_{ms} \times C_{ms} \times A_{ms}$$

waarbij:

$q_h \times G_q$ is de windstuwdruk als functie van de hoogte (h) en voor wind zone 3 in N/m^2 : zie tabel 3.4.1

G_{ms} is de constructie resonantie factor voor een isolator.

Voor G_{ms} dien je de waarde van G_t te nemen.

C_{ms} is de weerstandsfactor voor de isolator.

$$C_{ms} = 1,2$$

A_{ms} is het oppervlak van de isolator geprojecteerd op een verticaal vlak parallel aan de as van de isolatorstreng in m^2 .

Windbelasting op een vakwerkmast

Windbelasting op een vakwerkmast is een combinatie van krachten die overgebracht worden door de geleiders en de isolatoren en door de windbelasting op de mast zelf.

Voor vakwerk masten met een vierkante dwarsdoorsnede worden de krachten berekend per vak. De hoogte van een vak is normaal de afstand tussen twee verbindingen van de randstaven met de kruisende wandstaven (zie figuur 3.4.4)

Volgens NEN-EN 50341-1 moet de windbelasting van een vak als puntlast ingevoerd worden in het zwaartepunt van het vak ter plaatse van een knooppunt van het betreffende vak.

Ik heb zelf de **windbelasting** verdeeld over 3 tot 7 puiten per vak. De beide traversen elk 7 puiten. Alle vakken in het **mastlichaam** 5 punten en de poten (**per** poot) en het **puntje** bovenop 3 punten. Als ik het als puntlast aan laat grijpen op de **kruisende diagonalen** in het vlak wordt hier de belasting veel groter dan in werkelijkheid zo zou zijn. Ik vind de manier van de norm een te onnauwkeurige **benadering**. Aan de andere kant is het **ook** ondoenlijk om de **windbelasting** als gelijkmatig verdeelde belasting te verdelen over elke staaf in een vak naar verhouding **van** het aangeblazen oppervlak van de afzonderlijke staven. **Daarom** heb ik er dus voor gekozen om de **windbelasting** te verdelen over meerdere puntlasten.

De windbelasting F_T wordt bepaald met de volgende formule:

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times C_T \times G_{sT} \times A_t$$

en voor de overhoekse wind wordt **gebruik** gemaakt **van** deze, gelijksoortige formule:

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times (1 + 0,2 \times \sin^2 2\phi) \times (C_{T1} \times A_{t1} \times \cos^2 \phi + C_{T2} \times A_{t2} \times \sin^2 \phi) \times G_{sT}$$

waarbij:

$q_h \times G_q$ is de windstuwdruk **als functie** van de hoogte (**h**) en voor wind zone 3 in N/m^2 : zie tabel 3.4.1

G_T is de **constructie** resonantie factor voor een **vakwerkmast**:

$$G_T = (1 + 2 \times g \times I(z) \times \sqrt{B}) / (1 + 2 \times g \times I(z))$$

$$g = 3,5$$

$$I(z) = 1 / \ln(z / z_0)$$

z_0 = een waarde voor de **ruwheid** van de omgeving van de mast in m, deze is 0,3 m voor **windzone** 3

z = de hoogte boven de grond in **m**

$$B = 1 / (0,94 + 0,021 \times h^{2/3} + 0,029 \times b^{2/3})$$

h = hoogte van de mast in **m**

b = gemiddelde breedte van de mast in **m**

C_{T1} is de **weerstandsfactor** voor vlak 1 bij een wind loodrecht op dit **vlak**;

C_{T2} is de weerstandsfactor voor vlak 2 bij een wind loodrecht op dit vlak:

Voor **masten** met een **vierkante** dwarsdoorsnede en opgebouwd uit hoekstalen geldt:

$$C_{T1,2} = 3,96 \times (1 - 1,5 \times \chi + \chi^2)$$

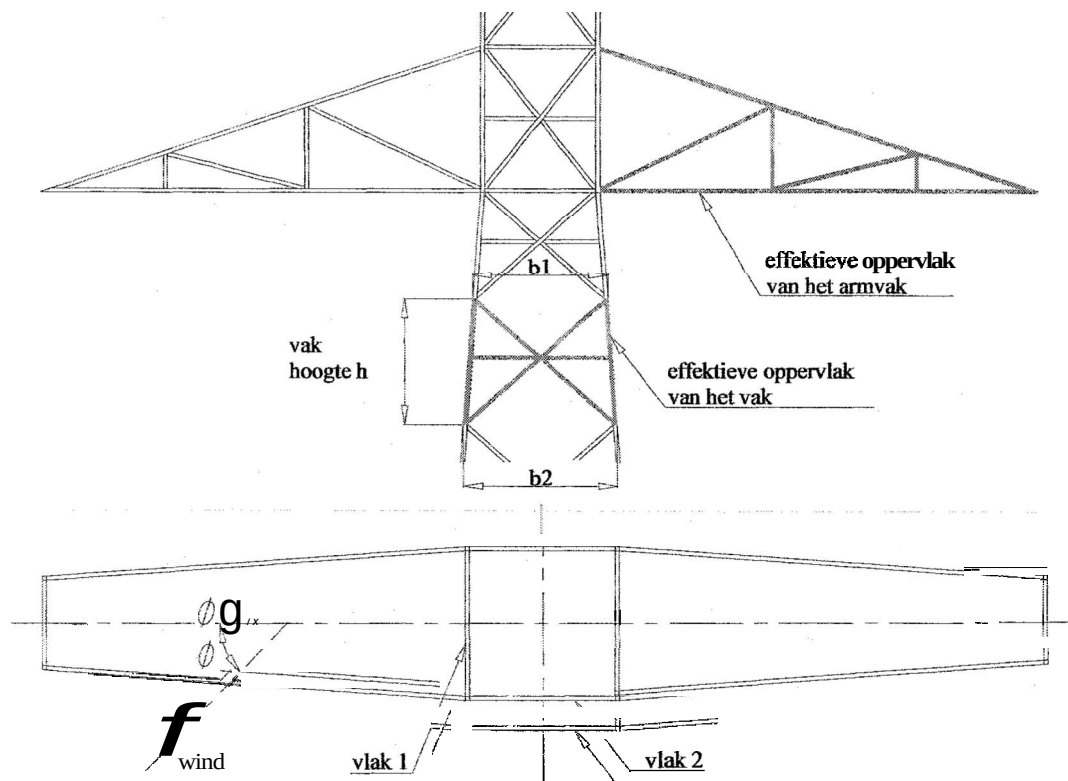
$$\chi = A_t \frac{2}{h(b_1 + b_2)}$$

χ is de **vullingsgraad** van het vakwerk

A_t is het geprojecteerde **effectieve oppervlak**

van het mastvak in m^2

zie figuur 3.4.4



F i u r 3.4.4 Vlakken bij overhoekse wind en vullingsgraad χ van een vakwerk

$G_{,,}$ is de dynamische resonantie factor voor een **vakwerkmast**:

$$G_{,,} = (1 + 2 \times g \times I(z) \times \sqrt{(B + E)}) / (1 + 2 \times g \times I(z) \times \sqrt{(B)})$$

$$g = 3,5$$

$$I(z) = 1 / \ln(z / z_0)$$

z = hoogte in m

$z_0 = 0,3$ m voor windzone 3

$$B = 1 / (0,94 + 0,021 \times h^{2/3} + 0,029 \times b^{2/3})$$

$$E = (0,0394 \times f_e^{-2/3}) / (D \times (1 + 0,1 \times f_e \times h)(1 + 0,16 \times f_e \times b)) \quad D = 0.01$$

b = gemiddelde breedte van de **mast** in m

h = hoogte van de mast in m

f_e = eerste **natuurlijke frequentie** = $60/h$ (Hz)

ϕ is de hoek tussen de windrichting en de lengte as **van** de traverse in graden.

Voor de overhoekse wind (zie figuur 3.4.4) wordt de totale windbelasting berekend met de **formule** van blz 17. Deze **windbelasting** werkt dan op vlak 1 en 2. In het model van de mast wordt deze opgevoerd in de **zwaartepunten** van de **vlakken** als een component loodrecht op de mast en **een** component evenwijdig aan de mast.

3.4.2 Ijsbelasting op hoogspanningslijn elementen

Algemeen

Er zijn twee soorten atmosferisch ijs **afhankelijk** van hun manier van ontstaan:

- ijs uit neerslag zoals natte sneeuw en ijzel
- ijs **gevormd** in mist (rijp)

In Nederland komen beide typen voor. In veel landen in Europa zijn er maar weinig statistische gegevens beschikbaar ijs en wordt de ijsbelasting geschat op basis van **ervaring**. Dit is **niet** het **geval** in Nederland. In het deel met Nederlandse **voorschriften** van N-EN50341 staat een **formule** om de **karakteristieke ijsbelasting** uit te rekenen. Nederland is hierbij verdeeld in twee regio's. Regio A zijn de provincies Groningen, Drenthe en het deel van Friesland dat ligt **oostelijk** van de lijn 6° **ooster** breedte. De **rest** van Nederland valt in de regio B. In de regio A moet met een **ijsbelasting** worden gerekend die meer dan 2,5 keer zo hoog is als in regio B. Met gehele verzorgingsgebied van Essent Netwerk Zuid valt in de regio B.

Ijsbelasting op geleiders

Ijsbelasting op geleiders **veroorzaakt** zowel verticale krachten als een hogere trekspanning in de geleiders. De verticale kracht ten **gevolge** van de **ijsbelasting** op elke geleider op de mast is:

$$Q_{ic} = g_R \left(\frac{L_1 + L_2}{2} \right)$$

waarbij:

g_R is de karakteristieke **ijsbelasting** in N/m .

Voor de karakteristieke ijsbelasting in de regio B geldt:

$$g_R = 1,8\sqrt{d} \text{ N/m}$$

d = **diameter** van de geleider in mm

L_1 en L_2 zijn de lengten van de twee **aanliggende** vakken in m

(zie de conclusie van dit **hoofdstuk** voor commentaar op deze formule)

3.4.3 Combinatie van wind- en ijsbelasting

Algemeen

Er wordt in deze scriptie alleen gekeken naar gecombineerde wind- en **ijsbelasting** op geleiders. Op masten en isolatoren is met name de **ijsbelasting** veel lager waardoor ook de **combinatie van** wind- en **ijsbelasting** van veel minder belang is.

Het effect van de wind op een met ijs bedekte geleider wordt bepaald door drie variabelen:

- de wind snelheid
- de **massa** van de ijslaag
- de **vorm** van de ijslaag en dan speciaal de diameter en de **weerstandsfactor**

Windbelasting op met ijs bedekte geleiders

Overeenkomstig de windbelasting op geleiders veroorzaakt ook hier de windbelasting zowel krachten dwars op de richting van de **hoogspanningslijn** als een hogere trekspanning in de geleiders. Door de hogere waarde voor de diameter zal de windbelasting Q hoger uitvallen.

De windbelasting $Q_{W,ic}$ op een **steunmast**, veroorzaakt door elke subgeleider van de twee aangrenzende velden, volgt uit de volgende formule:

$$Q_{W,ic} = q_h \times G_q \times G_c \times C_c \times D \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi$$

waarin:

$q_h \times G_q$ is de windstuwdruk als functie van de hoogte (h) en voor wind zone 3 in N/m^2 : zie tabel 3.4.1

G_c is de constructie resonantie factor voor een geleider.

Deze kan worden afgelezen uit **figuur 3.4.3**.

C_c is de weerstandsfactor

zie tabel 3.4.2

D is de diameter van de met ijs bedekte geleider in m.

Ook al is de ijsafzetting op de geleider **onregelmatig** van vorm, het wordt hier **behandeld** als een cilindrische vorm met de diameter:

$$D = \sqrt{d^2 + \frac{4I}{9,81\pi\rho_I}}$$

waarbij:

d is de diameter van de geleider in m.

I is de ijsbelasting in N/m

ρ_I is de dichtheid van het ijs in (kg/m^3) zie tabel 3.4.2

$$\frac{N/m}{m \cdot s^{-2} \cdot kg/m^3} = \frac{kg \cdot m/s^2 \cdot m^{-1}}{m \cdot s^{-2} \cdot kg/m^3} = m^2$$

L_1 en L_2 zijn de lengten van de twee aanliggende vakken in m

ϕ is de invalshoek van de wind in graden

IJs type	Natte sneeuw	IJzel	Zachte rijp ijs	Hard rijp ijs
C_c	1,0	1,0	1,2	1,1
$\rho_I (kg/m^3)$	500	900	300	700

Tabel 3.4.2 Weerstandsfactor C_c en dichtheid ρ_I voor verschillende ijs typen

Welke bron

3.4.4 Temperatuur effecten

De temperatuur effecten zitten verwerkt in de partiële en de belastingsfactoren. Het effect van de temperatuur op de geleider zit verwerkt in de berekening bij verschillende temperaturen van de belasting van de geleider op de mast.

3.5 Bijzondere belastingen

Algemeen

Onder de bijzondere belastingen **vallen** de belastingen tijdens de bouw van de mast (constructiebelastingen), de **onderhoudsbelastingen** en verder de echt bijzondere belastingen **zoals** draadbreek, brand, een botsing met een **voertuig**, kruierend ijs of een aardbeving of iets dergelijks. De echt bijzondere belastingen **kenmerken** zich door hun grote gevolgen gekoppeld aan **een** kleine kans **van** optreden. Belastingen door aardbevingen worden in Nederland niet bekeken en belastingen door **kruierend** ijs moeten meegenomen worden als een mast in of op de oever van een rivier staat (is **hier** niet het geval).

3.5.1 Constructie- en onderhoudsbelastingen

Ook tijdens de **constructie** van de mast zal deze bestand moeten zijn tegen alle belastingen waaraan de mast wordt **bloot** gesteld en dat met een **voldoende veiligheidsmarge**. Deze veiligheidsmarge is gebaseerd op een referentieperioden **net** zolang als de gehele **montagefase** met een minimum van 1 jaar. Ik ga hier in deze scriptie hier niet verder op in omdat ik een al **bestaande** mast bekijk.

Voor **Be onderhoudsbelastingen** gelden de waarden zoals **vermeld** in tabel 3.5.1. Op twee schuin tegen over elkaar liggende hoeken zijn horizontale spijlen aan gebracht waardoor men voor **onderhoud** makkelijk in de mast kan **klimmen**. Deze spijlen moeten minimaal $1,5 \text{ kN}$ in **verticale** richting kunnen dragen (**tabel 3.5.1 punt 1**). Alle onderdelen waarop **geklommen** kan worden en die een hoek met de horizontaal maken **van** minder dan 30° moeten een verticale **puntbelasting** van $f \text{ kN}$ in het midden van **het** onderdeel kunnen dragen (**tabel 3.5.1 punt 2**).

Onderdeel van de mast	Karakteristieke belasting	Richting van de belasting
1 Klim onderdelen	$1,5 \text{ kN}$	verticaal
2 Hand rails	1 kN	Alle richtingen
3 Andere onderdelen van de constructie die gebruikt worden om op te klimmen	1 kN in een voor de constructie ongunstige richting	verticaal

Tabel 3.5.1 Waarden voor de onderhoudsbelastingen

3.6 Partiële veiligheidsfactoren en belastingfactoren

De **veiligheid** van de **constructie** wordt bekeken aan de hand van de **grenstoestanden**. Er wordt gekeken naar de uiterste **grenstoestand** en naar de bruikbaarheidsgrenstoestand. Bij het **overschrijden** van een uiterste grenstoestand bezwijkt de constructie en bij het overschrijden van een bruikbaarheidsgrenstoestand functioneert de constructie niet goed meer **bv** ten **gevolge** van te **grote** doorbuigingen of **trillingen**. In de **norm** NEN-EN 50341 wordt de **methode** van de **partiële veiligheidsfactoren** toegepast. Hierbij wordt een zekere **marge** aangehouden tussen de karakteristieke waarde van de sterkte en de belastingen. Deze methode staat bekend als de “Load and Resistance Factor Design” (LRFD).

Bij deze methode wordt er voor gezorgd dat in alle relevante situaties de twee te hanteren grenzen niet worden overschreden:

- de gevolgen van de krachten waarmee bij het ontwerp gerekend is zijn niet groter dan de constructie in de uiterste **grenstoestand** kan opvangen
- de gevolgen van de **krachten** waarmee bij het ontwerp gerekend is komen overeen met de gevraagde prestatie eisen van de constructie voor de bruikbaarheidsgrenstoestand

De factor waarmee de **karakteristieke belasting** F_k (de belasting die in de **gebruikstoestand** optreedt) wordt vermenigvuldigd heet de **belastingfactor** γ_f . In deze factor is de **invloed** van onzekerheden **en** van de spreiding in de **basisbelasting** verwerkt. Met de **belastingfactor** is de **rekenwaarde** van de belasting F_d (design load) te bepalen. In het algemeen **geldt**:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_k$$

γ_f hangt hierbij af van de gekozen **referentieperiode**.

De **referentieperiode** is de tijdsduur waarin de mast **aan de betrouwbaarheidseisen** moet voldoen. In **Nederland** wordt voor **hoogspanningsmasten** in het algemeen een **referentieperiode** van 50 jaar aangehouden.

F_k is de **karakteristieke waarde** van kracht **F**

De norm NEN-EN 50341 geeft de **belastingfactoren** voor zowel de uiterste **grenstoestand** (zie tabel 3.6.2) als voor de bruikbaarheidsgrenstoestand. Daarbij wordt een onderscheid **gemaakt** tussen de **belastingfactoren** voor de verschillende belastingen:

$\gamma_{f,G}$ is de belastingfactor voor **permanente** belastingen

$\gamma_{f,Q}$ is de **belastingfactor** voor **veranderlijke** belastingen

$\gamma_{f,A}$ is de **belastingfactor** voor bijzondere belastingen



Bij het **berekenen** van het effect van een **kracht** op bv. de **trekspanning** van een geleider **worden** de partiële **factoren** toegepast op de **karakteristieke** waarde van de **kracht**. Dus rechtstreeks op de **wind en/of ijsbelasting** die werkt op de geleider.

3 . Standaard belastinggevallen voor een steunmast

In tabel 3.6.1 staan de standaard **belastinggevallen** waarnaar gekeken wordt bij de sterkte berekening **van** een steunmast.

Voor een trek- of hoekmast komen daar nog een **aantal zaken** bij. Voor een **trek-** of **hoekmast** moet er namelijk voor de **belastinggevallen** 1a, 1b, 2 en 3 ook rekening worden gehouden met:

- geen geleiders **aan** een **traverse aan een kant van** de mast
- **geen** geleiders **aan een traverse**.

Belasting geval	Omstandigheden	Opmerkingen
1a	Extreme windbelasting, 10 °C	Zie a
1b	Extreme windbelasting, -20 °C	
2	Wind- en ijsbelasting, -5 °C	Zie b
3	Constructie- en onderhoudsbelasting, 5 °C	
4	Veiligheidsbelasting, torsiebelasting	Zie c
5	Permanente belastingen	
6	Speciale belastingen	

Tabel: 3.6.1 Standaard belastinggevallen

Opmerkingen bij tabel 3.6.1

Belasting geval nummer verwijst naar het belasting geval in tabel 3.6.2

a De windrichting is loodrecht op de **hoogspanningslijn** en onder een hoek **van** 90°.

b Wind en ijsbelasting zijn in dit geval **aan** beide zijden van de mast gelijk.

c Er wordt gerekend met twee verschillende **ijsbelastingen** die torsie veroorzaken in de mast. Aan de ene **kant** van de mast wordt de karakteristieke **ijsbelasting** op alle geleiders aan die kant **vermenigvuldigd** met 0,3 **en** aan de andere kant wordt de karakteristieke **ijsbelasting** op alle geleiders **aan** die kant **vermenigvuldigd** met 0,7.

Permanente belastingen zijn altijd aanwezig en komen **dan ook** in elke **belastingscombinatie** voor. Momentane waarden van de **veranderlijke belasting** zijn statisch gezien **ook** altijd aanwezig en **komen** daarom ook in elke **belastingcombinatie** voor, Extreme waarden van veranderlijke belastingen en bijzondere **belastingen** komen maar zelden voor. De kans dat twee **afzonderlijke veranderlijke belastingen** beide gelijktijdig een **extreme** waarde bereiken is zeer klein. Hetzelfde geldt voor het optreden van een bijzondere belasting in combinatie met een extreme **veranderlijke belasting**. Dit betekent dat **onafhankelijke extreme waarden niet** worden gecombineerd.

Voor de uiterste grenstoestand **zijn** er **twee** soorten **belastingcombinaties**, namelijk fundamentele en bijzondere combinaties.

Bij **fundamentele combinaties** worden **permanente belastingen** gecombineerd met de momentane waarden van de veranderlijke **belastingen**, waarbij successievelijk **van** één veranderlijke belasting de **momentane** waarde wordt **vervangen** door de extreme waarde.

Bij bijzondere combinaties worden de **permanente** belastingen gecombineerd met zowel de **momentane** waarden van de **veranderlijke belastingen** als met één bijzondere belasting.

In deze scriptie **kijk ik o.a** naar de twee **belangrijkste** gevallen hiervan:

- Een extreme **ijsbelasting** (1,5 x de karakteristieke waarde; zie tabel 3.6.2) gecombineerd met een gematigde windbelasting.
Voor de gematigde windsnelheid wordt 0,45 keer de extreme (eens in de 50 jaar) snelheid genomen.
- Een hoge windsnelheid gecombineerd met **een** gematigde **ijsbelasting**.
Voor de hoge **windsnelheid** wordt 0,85 keer de **extreme** windsnelheid genomen. Voor de **ijsbelasting** 0,35 keer de **extreme** waarde.

3.6.2 Veiligheidsfactoren

In tabel 3.6.2 staan de te gebruiken **partiële veiligheidsfactoren**. Deze worden rechtstreeks toegepast op de belastingen waar ze bij horen.

Belastingsgeval en temperatuur	Waarde voor γ_G , γ_Q , en γ_A bij de uiterste limiet				
	$\gamma_G^{(1)}$	γ_Q			γ_A
Belasting	G_K	Q_{PK}	Q_{WK}	Q_{IK}	A_k
1a Wind, 10 °C	1,2		1,5		-
1b Wind, -20 °C	1,2	-	0,3		-
2 Wind en ijs, -5 °C	1,2	-	0,45	1,5	-
3 Constructie en onderhoud, +5 °C	1,2	1,5	0,3	-	-
4 Torsie, 10 °C	1,0	1,0	-	-	1,0
5 Permanent, 10 °C	1,35	-	-	-	-
6 Speciaal, 10 °C	1,0	-		-	f,0
(1) Als de permanente belastingen een gunstig effect hebben op de totale belastingen b.v een naar boven werkende kracht op de fundering $\gamma_G = 0,9$					

Tabel 3.6.2 Partiële- en combinatiefactoren

γ_G is de partiële factor voor een permanente belasting

γ_Q is de partiële factor voor een **veranderlijke** belasting

γ_A is de partiële factor voor een bijzondere belasting

G_K is de **karakteristieke waarde** van het eigen gewicht van geleiders, isolatoren en masten

Q_K is de karakteristieke waarde van de **constructie en onderhoudbelastingen**

Q_{WK} is de karakteristieke waarde van de wind belasting

Q_{IK} is de karakteristieke waarde van de **ijsbelasting** op de geleiders

A_k is de karakteristieke waarde van een bijzondere belasting

3.7 Conclusie

Naar mijn idee is dit hoofdstuk samen met het volgende hoofdstuk de kern **van** de scriptie. De indeling van de belastingen op de mast in **permanente**, veranderlijke **en** bijzondere belastingen wordt zoveel mogelijk door het hoofdstuk heen aangehouden en **geeft** op deze manier ook houvast bij het maken van een logische opbouw.

De **formules** voor de **windbelasting** hebben **allemaal** een zelfde opbouw:

$$Q_{wx} = q_h \times G_q \times G_x \times C_x \times A$$

q_h de **dynamische winddruk** waar de windsnelheid en de luchtdichtheid **inzitten** als maat voor de **druk**

G_q deze factor brengt de **vlagerigheid** van de wind in rekening

G_x deze factor brengt **de** gevoeligheid voor resonantie van het beschouwde onderdeel in rekening

C_x deze factor brengt de vorm van het beschouwde onderdeel in rekening

A brengt het **oppervlak** in **rekening**

Van een aantal formules is door **mij** niet af te leiden waar ze **vandaan** komen. Bijvoorbeeld de formule op blz 19 voor de karakteristieke ijsbelasting. Ik gebruik deze formules wel want ze **geven** wel de **juiste** uitkomsten **als** ik de uitkomsten vergelijk met vergelijkbare gevallen **van** Essent.

De in dit hoofdstuk behandelde **rekenwijze** en formules worden **gebruikt** in het volgende hoofdstuk om de belastingen op de mast uit te **kunnen** rekenen. Deze belastingen worden dan in **hoofdstuk 5** **ingevoerd** in het Ansys model om zo de **staafkrachten en spanningen** uit te kunnen rekenen.

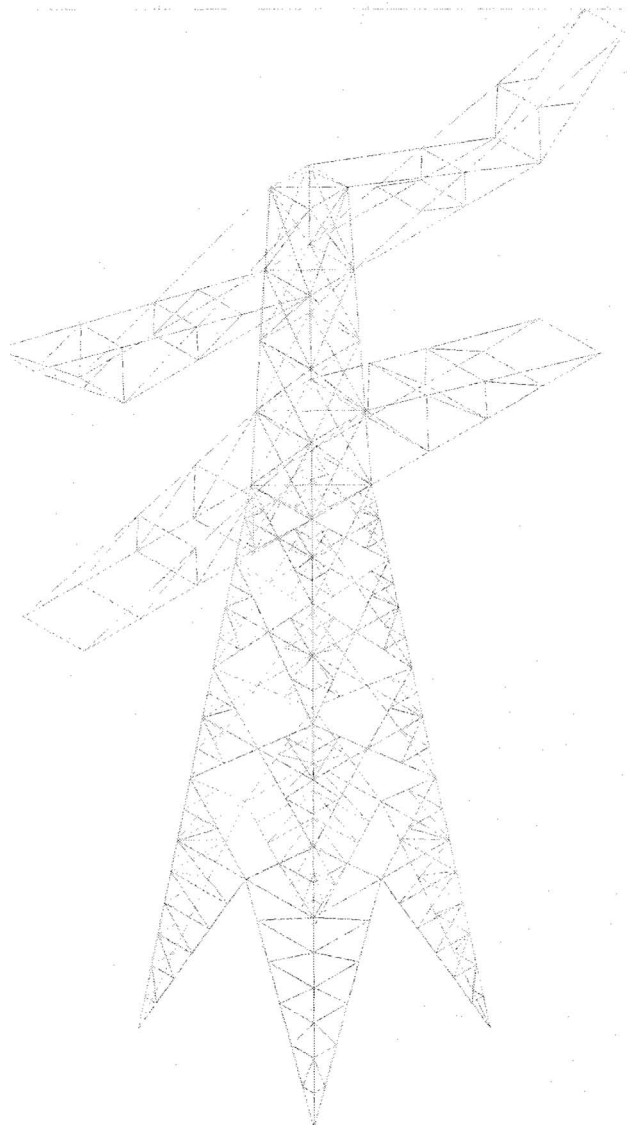
Ik doe dit voor vijf **belastinggevallen** die variëren in o.a. temperatuur, wind- en ijsbelasting. Meer hierover staat in hoofdstuk 4.

4 Berekenen van de belastingen op de mast

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk worden de **belastingen** op de mast aan de hand van de **rekenwijze** en de **formules** uit hoofdstuk 3 bepaald. Deze belastingen kunnen dan worden gebruikt om met behulp van Ansys de **staafkrachten** en **spanningen** in elk staafelement van de mast te berekenen. Dit gebeurt voor de vier verschillende belastingscombinaties zoals genoemd in hoofdstuk 3.

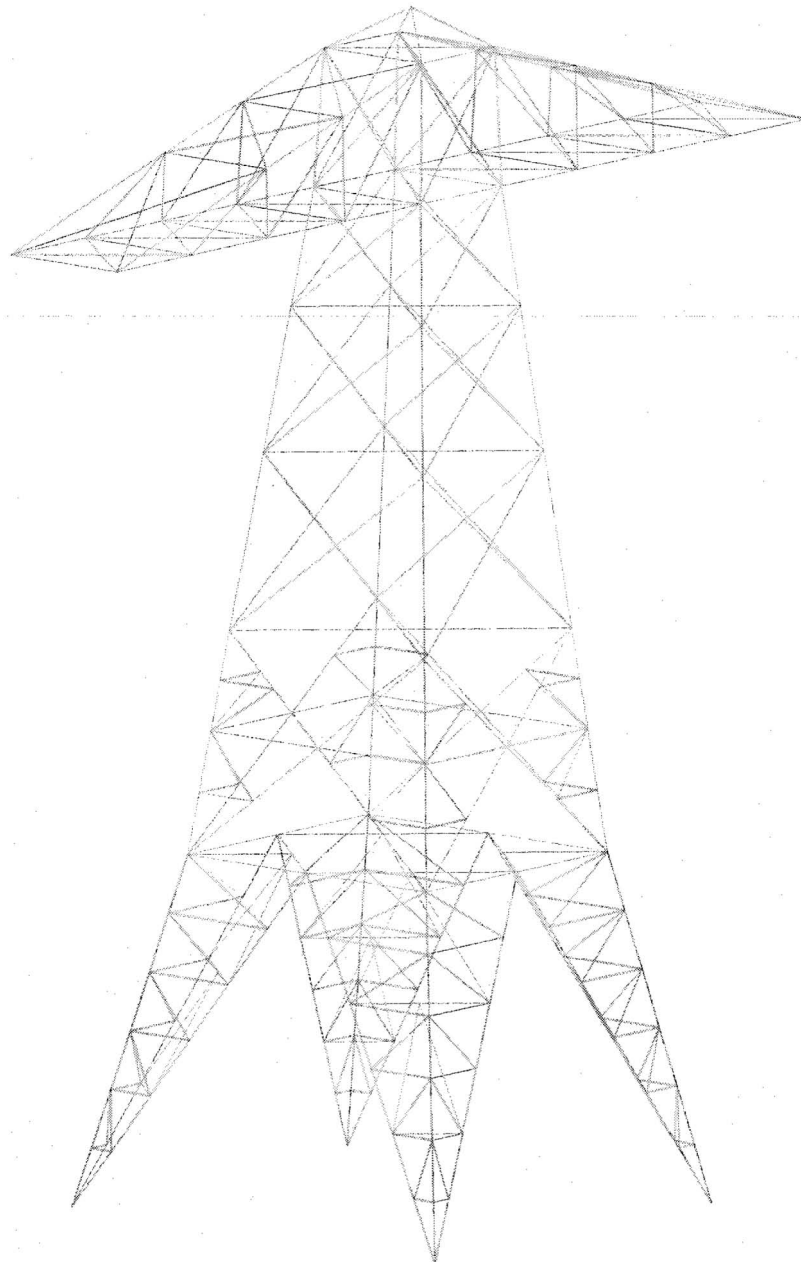
Ik ben de scriptie begonnen met de berekeningen voor de mast zoals in figuur 4.1.1. Ik had verwacht dat mijn versie **van** Ansys 1000 elementen aankon maar dat bleken er maar 500 te **zijn**. Deze mast heeft ± 700 elementen en was dus veel te **groot voor** mijn Ansys versie. Een **‘uitgeklede’** versie van deze mast bleek te slap wat wel te verwachten was dus heb ik een aangepaste versie **van** een andere mast gemaakt. Om niet boven de 500 elementen te komen **en** de mast toch sterk genoeg te laten zijn heb ik de bovenste traverse weg moeten **laten**.



Figuur 4.1.1 Oorspronkelijkemast

42 Algemene gegevens van de mast en de geleider

De te berekenen mast is een **steunmast** uitgevoerd als vakwerk en opgebouwd uit gelijkzijdige hoekstalen. Er zijn drie verschillende soorten hoekstalen gebruikt. Waar welke profielen gebruikt zijn is te zien in figuur 4.2.1. De belangrijkste gegevens van de hoekstalen zoals afmetingen en de traagheidsstraal bij de verschillende assen staan in tabel 4.2.1.



Hoekstalen:
50 x 50 x 5 ———
80 x 80 x 8 - - -
120 x 120 x 12 ———

Figuur 4.2.1 **Overzicht gebruikte hoekstalen**

Hoekprofiel	A (m^2)	M (N/m)	$I_x = I_y$ (m^4)	$i_x = i_y$ (m)	I_v (m^4)	i_v (m)	E (N/m^2)	ρ (kg/m^3)
	$\times 10^{-6}$		$\times 10^{-8}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-8}$	$\times 10^{-3}$	$\times 10^6$	$\times 10^3$
50×50×5	480	37,7	11	15,1	4,59	9,8	210	7,8
80×80×8	1230	96,6	72,3	24,2	29,6	15,5	210	7,8
120×120×12	2750	216,0	367	36,4	151	23,5	210	7,8

Tabel 4.2.1 Afmetingen en waarden voor hoekstalen

De hoogte van de mast bedraagt $h = 30,8\text{ m}$ en de breedte aan de basis $b = 11,1\text{ m}$. De traverse heeft een breedte $b_t = 27,6\text{ m}$ en deze bevindt zich op een hoogte van $h_t = 25,3\text{ m}$.

Op de traverse bevinden zich vier kabelbundels. Elke bundel is samengesteld uit drie geleiders die uit elkaar worden gehouden door afstandhouders.

De geleider is een staal/aluminium kabel (St/Al 25/152). Dit is een kabel met een kern van stalen strengen voor de sterkte en daaromheen aluminium strengen voor de stroomgeleiding. In tabel 4.2.2 staat een overzicht van algemene gegevens van de geleider en de isolator. Ook staan er de gegevens van de bliksemdraden. Er bevinden zich één bliksemdraad op de mast. Deze bevindt zich bovenop de punt van de mast. De lengten van de velden zijn voor de bliksemdraad en de geleiders natuurlijk gelijk.

Veld 1 en 2 zijn de twee aangrenzende velden van de mast.

Mastafstand veld 1 in m : 281

Mastafstand veld 2 in m : 350

Soort kabel	geleider	bliksemdraad
Benaming kabel	St/Al 25/152	St/Al 40/68
Diameter in mm	17,3	13,5
Doorsnede in mm^2	177	108
Gewicht in N/m	6,12	4,97
Gewicht met ijs in N/m	13,61	11,59
Elasticiteitsmodulus in N/mm^2	77000	107000
Temperatuurcoëfficiënt in $^{\circ}C^{-1}$	$18,9 \times 10^{-6}$	$15,3 \times 10^{-6}$
Trekspanning bij $-5\text{ }^{\circ}C$ en ijs in N/mm^2	100	118,7
Trekkracht bij $-5\text{ }^{\circ}C$ en ijs in N	17700	12815
Breukbelasting in N	54435	55718
Verhouding St/Al	1:6	1:1,7
Gewicht isolator in N	1500	
Lengte isolator in m	3,0	
Diameter isolator in m	0,16	

Tabel 4.2.2 Algemene gegevens geleider, bliksemdraad en isolator

4.3 Belastinggevallen

Ik kijk **naar** vijf verschillende belastinggevallen. Belastinggeval 1 is een vrij eenvoudige die ik gebruik om het model van de mast te controleren. De belastinggevallen 2 t/m 5 zijn **specialere** gevallen waarbij bijvoorbeeld de mast niet symmetrisch wordt belast of waarbij de mast zwaar wordt belast.

- Belastinggeval 1:** Er **werken** op de mast alleen de **permanente** belastingen zonder de horizontale component van de trekspanning van de geleider. Temperatuur is 10 °C.
- Belastinggeval 2:** Een hoge windsnelheid loodrecht op de hoogspanningslijn in combinatie met de **permanente** belastingen en een gematigde ijsbelasting. Temperatuur is -20 °C.
- Belastinggeval 3:** Een extreme **ijsbelasting** gecombineerd met een gematigde windbelasting **evenwijdig** aan de **hoogspanningslijn**, en de **permanente belastingen**. Temperatuur is -5 °C.
- Belastinggeval 4:** Een overhoekse momentane windbelasting **en** de **permanente** belastingen. Temperatuur is 10 °C.
- Belastinggeval 5:** Draadbreek **in** een **van** de geleiders, waardoor het mastlichaam op **torsie** wordt **belast**, gecombineerd met de **permanente belastingen** en een **momentane** waarde voor de windbelasting loodrecht op de hoogspanningslijn. Temperatuur is 10 °C.

Belastinggeval 1 gebruik ik **voornamelijk** om het model te kunnen controleren. Hier ga ik verder op in, in **hoofdstuk 6** Controle van de mast.

Belastinggeval 2 en 3 zijn extreme situaties waarbij een veranderlijke belasting een extreme waarde heeft **en** de andere een momentane waarde.

Belastinggeval 4 laat zien wat het **effect** is van een overhoekse windbelasting.

Bij **belastinggeval 5** is **er** sprake van een extreme bijzondere **belasting**. De veranderlijke belastingen zijn **momentaan** (wind) of niet aanwezig (ijs).

Voordat deze vijf **belastinggevallen** daadwerkelijk berekend kunnen worden in **Ansys** heb ik een **grote** hoeveelheid gegevens **nodig**. Deze gegevens **worden** in dit hoofdstuk **uitgerekend en** verklaard. Dit doe ik aan de hand van de **onderverdeling in belastingen** zoals staat in § 3.2 (blz 7). Aan het eind van dit hoofdstuk worden alle gegevens per **belastinggeval** in een tabel **verzameld**.

4.4 Belastingen

4.4.1 Permanente belastingen

De **permanente** belastingen bestaan uit het gewicht van de geleiders van de twee aanliggende velden, het gewicht van **de** isolatoren en het eigen gewicht van de mast. Ook de trekkracht **van** de geleiders wordt tot de permanente belastingen gerekend.

Het eigen gewicht **van** de geleider is een vast gegeven afhankelijk **van** het type geleider dat **gebruikt** wordt. In dit **geval** is dat een **staal/aluminium** kabel met een eigen gewicht van **6,12 N/m**. Totale gewicht per geleider is dus de overspanning L x eigen gewicht.

E_f wordt gerekend **net** de overspanning L als vast gegeven en niet met de werkelijke kabellengte ℓ . Dit geeft een te verwaarlozen fout in de uiteindelijk berekende waarde van maximaal 0,5%. Er **zijn** steeds 3 geleiders per kabelbundel. Het gewicht van de kabelbundel grijpt als **puntlast** aan, **aan** het **ophangpunt** van de **kabelbundel** aan de isolator.

Het eigen gewicht van de isolator is ook een vast gegeven afhankelijk van het type isolator. Er wordt hier gerekend met een gewicht van 1500 N, inclusief **ophangklemmen** en andere **armatuur**. De kabelbundel zit met twee verticaal **hangende** isolatoren aan de mast vast. De **kracht** grijpt **aan** als puntlast op het **ophangpunt** van de isolatoren aan de mast. De **kracht** t.g.v. het eigen gewicht van de isolator plus het eigen gewicht van de geleider en de trekkracht in de geleider wordt dus verdeeld over 2 **ophangpunten**.

Het gewicht van de mast wordt rechtstreeks in Ansys ingevoerd. Voor elk **staafelement** wordt de dichtheid in N/m^3 in **rekening** gebracht (vermenigvuldigt met de partiële **veiligheidsfactor**) en samen **met de lengte en het oppervlak** van de dwarsdoorsnede van elk element **levert** dit het **eigen** gewicht van de mast op.

De dichtheid voor staal is: $\rho_{staal} = 7,8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

De **trekkracht bij verschillende temperaturen** staat in tabel 4.4. k. Bij -5 °G is de ijsbelasting meegerekend en zo kom Je bij deze temperatuur op de **maximale trekspanning**. Met de EDS (every day stress) wordt gerekend bij **een temperatuur** van 10 °C. De maximale zeeg wordt bereikt bij 80 °C. Dit is ook de hoogste **temperatuur** die de geleider mag hebben onder **normale bedrijfsomstandigheden**. De **trekkracht** in de geleider **zorgt** in het **ophangpunt** aan de **isolator** voor een horizontale en een **verticale component** van de **trekkracht**.

Veld 1			Veld 2		
Temperatuur (°C)	Trekkracht (N)	Zeeg (m)	Temperatuur (°C)	Trekkracht (N)	Zeeg (m)
-20	10460,7	5,76	-20	9487,2	9,89
-15	10142,1	5,94	-15	9310,2	10,08
-10	9841,2	6,12	-10	9133,2	10,27
-5 + ijs	17700,0	7,57	-5 + ijs	17700,0	11,77
0	9310,2	6,47	0	8814,6	10,63
5	9080,1	6,64	5	8673,0	10,81
10	8850,0	6,81	10	8531,4	10,99
15	8637,6	6,98	15	8407,5	11,16
20	8425,2	7,15	20	8265,9	11,34
25	8230,5	7,31	25	8142,0	11,51
30	8053,5	7,48	30	8035,8	11,68
35	7894,2	7,64	35	7911,9	11,85
40	7734,9	7,79	40	7805,7	12,01
45	7575,6	7,95	45	7699,5	12,18
50	7434,0	8,10	50	7593,3	12,34
55	7292,4	8,26	55	7504,8	12,50
60	7168,5	8,41	60	7398,6	12,66
65	7044,6	8,56	65	7310,1	12,82
70	6920,7	8,70	70	7221,6	12,98
75	6814,5	8,85	75	7133,1	13,13
80	6708,3	8,99	80	7062,3	13,29

Tabel 4.4.1 **Trekspanning en zeeg bij een bekende geleidertemperatuur (Bron: Essent)**

De totale horizontale en verticale **belasting per ophangpunt** aan de mast (**F_x**) zijn als volgt berekend. (Zie **figuur 4.4.1**)

De trekkracht **kan** worden ontbonden, in het **ophangpunt** aan de isolator, in een horizontale (F_H) en een **verticale** component (F_V). Als de beide **aanliggende velden** van de **mast** even lang **zijn** heffen de beide **horizontale** componenten **elkaar** mooi op. Dat is hier niet het geval dus **er** blijft **een** kleine horizontale component over. De verticale componenten van de twee **aanliggende** velden kunnen bij elkaar worden opgeteld.

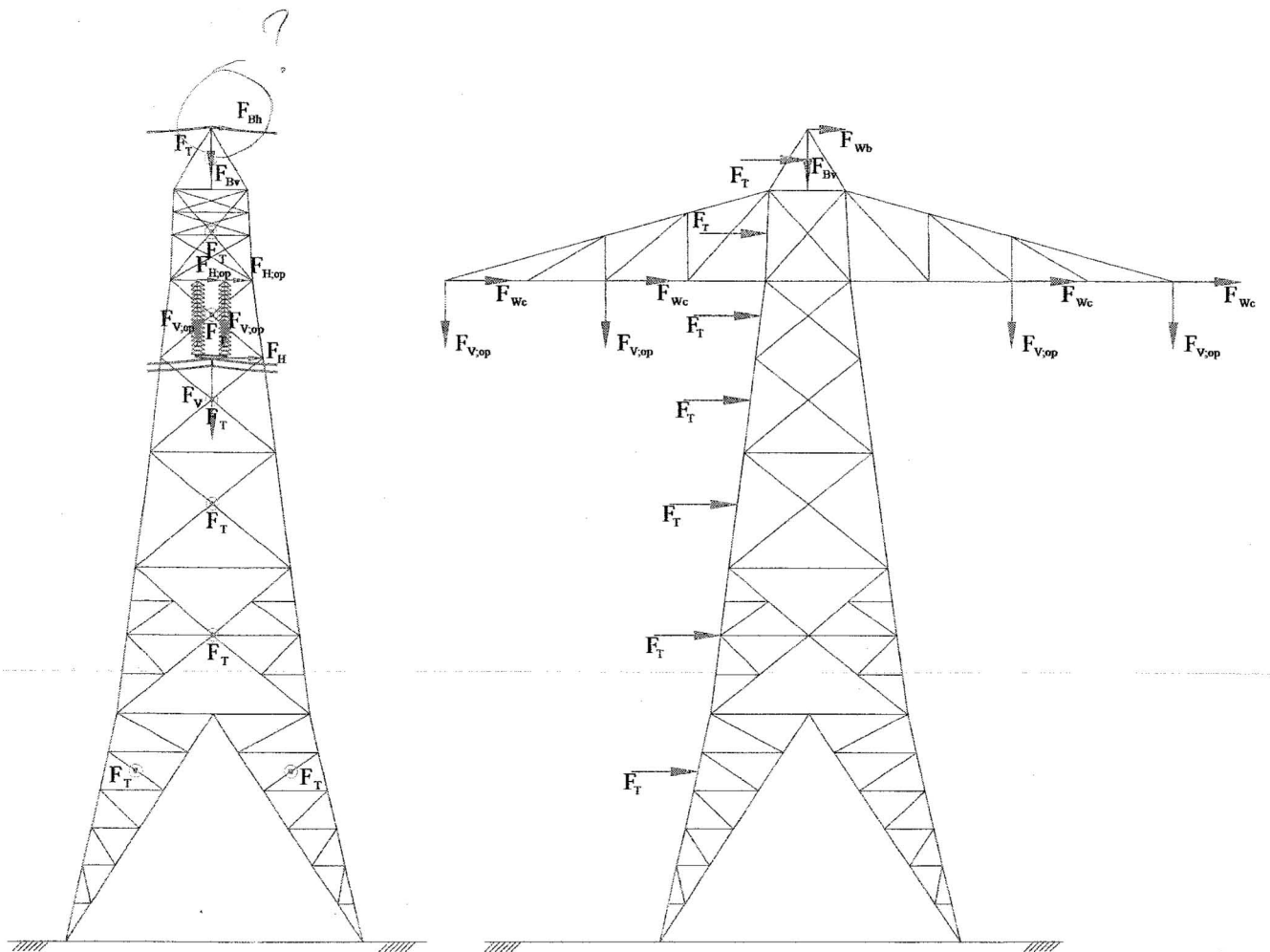
Elke kabelbundel zit **met** twee isolatoren aan de mast vast dus de totale **horizontale** en verticale belasting per **kabelbundel** wordt verdeeld over twee punten ($F_{H;op}$ en $F_{V;op}$).

De **bliksemdraad** heeft, om dezelfde redenen als de geleiders, ook een **horizontale** en **verticale** component. Deze grijpen aan in de top **van de mast**.

De waarden van deze horizontale en verticale component zijn berekend volgens de methode van § 3.3 voor de berekening van de zeeg en de trekspanning met behulp van de **formule** voor de kettinglijn. Deze waarden staan vermeld in **tabel 4.4.2**. Verder **staan** in **deze** tabel alle waarden voor de permanente belastingen. De **partiële veiligheidsfactor** γ , (zie §3.6.2) is nog **niet** meegerekend in **tabel 4.4.2** omdat deze per **belastingsgeval** zal variëren.

Onderdeel		Eigen gewicht (N) onderdeel	Kracht (N) per ophangpunt totaal.
T.g.v. geleider $\frac{L_1+L_2}{2}$ (per stuk)		1931	
Kabelbundel (3 geleiders)		3x1931	$\frac{5793}{2} = 2897$?
T.g.v. trekspanning in de geleider bij 10 °C	horizontaal		$\frac{276}{2} = 138$
	verticaal		$\frac{1935}{2} = 967,5$
Isolator (per stuk)		1800	1500
F _{H;op} Totale horizontale belasting per ophangpunt aan de mast			414 ?
F _{V;op} Totale verticale belasting per ophangpunt aan de mast			6149
F _{Bh} Horizontale belasting t.g.v. de bliksemdraad		106	106
F _{Bv} Verticale belasting t.g.v. de bliksemdraad		1568	1568
Eigen gewicht mast		Dichtheid x lengte x γ_G in ANSYS	Dichtheid x lengte x γ , in ANSYS

Tabel 4.4.2 Permanente belastingen zonder partiële veiligheidsfactor γ_G



Figuur 44.1 Permanente en veranderlijke belastingen op de mast; windrichting loodrecht op de geleiders

442 Veranderlijke belastingen

Algemeen

Aangezien bij de berekening van de **windbelasting** tabel 3.4.1 wordt gebruikt met daarin de extreme waarden voor de **windstuwdruk** is de berekende **windbelasting** in **eerste instantie** ook **een** extreme waarde. Door het toepassen van de, voor een bepaalde **belastingcombinatie** **geschikte, partiële veiligheidsfactor** dan wel **combinatiefactor** wordt dit bv. een **momentane** of een gematigde **windbelasting**.

Overal waar staat belasting op de geleiders wordt ook bedoelt belasting op de **bliksemdraad**. De manier van berekenen gaat **hetzelfde**.

Windbelasting op de geleiders

De windbelasting op de geleider wordt berekend met de volgende formule:

$$Q_{wc} = q_h \times G_q \times G_c \times C_c \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi \quad (\text{zie ook §3.4.1, blz 15})$$

Q_{wc} is de windbelasting op een steunmast, veroorzaakt door elke subgeleider van de twee aangrenzende velden (zie figuur 4.4.1)

In tabel 4.4.3 staan alle variabele waarden nodig voor de berekening van Q_{wc} voor veld 1 en 2. Er is een onderscheid gemaakt in de drie temperaturen die horen bij de belastinggevallen die ik in deze scriptie bekijk.

		Veld 1 en 2	Bliksemdraad
Gemiddelde hoogte van de geleider/bliksemdraad (m)	-20 °C	18,4	25,9
	-5 °C en ijs	17,7	25,2
	10 °C	17,8	25,3
Windstuwdruk $q_h \times G_q$ (kN/m ²)	-20 °C, -5 °C en ijs, 10 °C	0,90	1,0
Constructie resonantiefactor G_c	-20 °C, -5 °C en ijs, 10 °C	0,49	0,49
Weerstandsfactor C_c	-20 °C, 10 °C	1	1
	-5 °C en ijs	1,2	1,2

Tabel 4.4.3 Variabele waarden nodig voor de berekening van Q_{wc}

De gemiddelde hoogte is berekend met de zeeg uit tabel 4.4.1, bij de verschillende temperaturen, de hoogte van het ophangpunt en de twee verschillende mastafstanden. Het verschil in hoogte vertaalt zich niet naar een verschil in windstuwdruk. Daarvoor zijn de verschillen bij deze temperaturen te klein.

De windstuwdruk $q_h \times G_q$, komt uit tabel 3.4.1 blz 14.

De constructie resonantie factor G_c is afgelezen uit figuur 3.4.3 blz 15.

De weerstandsfactor C_c wordt bepaald volgens de methode in §3.4.1. blz 16.

Met behulp van de volgende berekening heb ik voor alle gevallen de windbelasting op de geleider berekend. Voorbeeld berekening voor tabel 4.4.4 bij -20 °C en de windbelasting loodrecht op de geleider:

$$Q_{wc} = q_h \times G_q \times G_c \times C_c \times d \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi$$

$$= 0,90 \times 10^3 \times 0,52 \times 1 \times 0,0173 \times \frac{631}{2} \times \cos^2 0^\circ = 2554 \text{ N per geleider} \times 3 = 7662 \text{ N per kabelbundel}$$

De diameter:

$$d = 17,3 \text{ mm} = 0,0173 \text{ m}$$

Overspanning veld 1 en 2:

$$L_1 + L_2 = 281 + 350 = 631 \text{ m}$$

ϕ :

de invalshoek van de wind in graden; 0° en 45°
(zie §3.4.1 blz 15)

	Invalshoek ϕ van de wind	0°	45°
Q_{wc} per kabelbundel (N)	Toename kracht loodrecht op de geleider	7662	3831
	Toename trekkracht in de geleider		3831
Q_{wb} bliksemdraad (N)	Toename kracht loodrecht op de geleider	2212	1106
	Toename trekkracht in de geleider	-	1106

Tabel 4.4.4 Windbelasting per kabelbundel

Windbelasting op de isolatoren

De waarde van de kracht Q_{w} ten gevolge van een horizontale wind loodrecht op de isolator volgt uit de volgende formule:

$$Q_{w_{ins}} = q_h \times G_q \times G_{ins} \times C_{ins} \times A_{ins}$$

waarbij:

De windstuwdruk op $h = 23,83 \text{ m}$ (de hoogte van ~~het~~ zwaartepunt van de isolator) is

$$q_h \times G_q = 0,99 \text{ kN/m}^2$$

Voor G_q dien je de waarde van G_q te nemen: $G_q = 1,51$

$$C_{ins} = 1,2$$

$$A_{ins} = 3 \times 0,16 = 0,48 \text{ m}^2$$

$$Q_{w_{ins}} = 0,99 \times 10^3 \times 1,51 \times 1,2 \times 0,48 = 861 \text{ N}$$

Per kabelbundel zijn er twee isolatoren.

Ijsbelasting op de geleiders

Ijsbelasting op de geleiders zorgt op twee manieren voor een grotere windbelasting op de mast. In de eerste plaats door de toename van het gewicht van de geleider en op de tweede plaats doordat de diameter van de geleider **groter** is geworden door de **ijsschil** die zich om de geleider vormt. De **eerste** reden wordt hier besproken en de tweede reden wordt besproken bij de **combinatie van wind- en ijsbelasting**.

De **kenmerkende ijsbelasting** oftewel het gewicht **van de geleider met ijs** is (zie § 3.4.2 blz 19):

$$g_R = 1,8 \sqrt{17,3} = 13,61 \text{ N/m}$$

De karakteristieke ijsbelasting is dan:

$$Q_{ic} = 13,61 \left(\frac{281 + 350}{2} \right) = 4294 \text{ N per geleider en dat is } 12882 \text{ N per kabelbundel.}$$

De berekening van de karakteristieke ijsbelasting op de bliksemdraad gaat analoog aan die van de geleider en ik volsta hier met het tussen- en eindresultaat van deze berekening.

$$g_R = 11,59 \text{ N/m}$$

$$Q_{ib} = 3657 \text{ N}$$

Combinatie van wind- en ijsbelasting op de geleider

Een geleider met daarop ijsafzetting heeft een andere diameter als een geleider zonder ijs. De nieuwe diameter wordt met de volgende formule berekend (zie §3.4.3 blz 20):

$$D = \sqrt{\left(d^2 + \frac{4I}{9,81\pi\rho_i} \right)} = \sqrt{\left(0,0173^2 + \frac{4 \times 13,61}{9,81 \times \pi \times 900} \right)} = 0,0476 \text{ m}$$

Ik ga hier uit van ijzel waarvan de dichtheid 900 kg/m^3 is.

Deze nieuwe diameter wordt gebruikt om de windbelasting op de geleider met ijs te bepalen. De formule hiervoor is identiek aan die voor de bepaling van de windbelasting op de geleiders (zie blz 32) alleen de waarde voor de diameter en de waarde voor de weerstandsfactor C_d zijn anders. De kracht grijpt in het zelfde punt aan en werkt ook in de zelfde richting als Q (zie figuur 4.4.1).

De waarde voor de weerstandsfactor C_d is 1,2.

$$Q_{w,ic} = q_h \times G_q \times G_e \times C_e \times D \times \frac{L_1 + L_2}{2} \times \cos^2 \phi = 0,90 \times 10^3 \times 0,49 \times 1,2 \times 0,0476 \times \frac{281 + 350}{2} \times \cos^2 0^\circ \\ = 7947 \text{ N per geleider en dat is dus } 23841 \text{ N per kabelbundel.}$$

De berekening van de karakteristieke wind- en ijsbelasting op de bliksemdraad gaat analoog aan die van de geleider en ik volsta ook hier met het tussen- en eindresultaat van deze berekening.

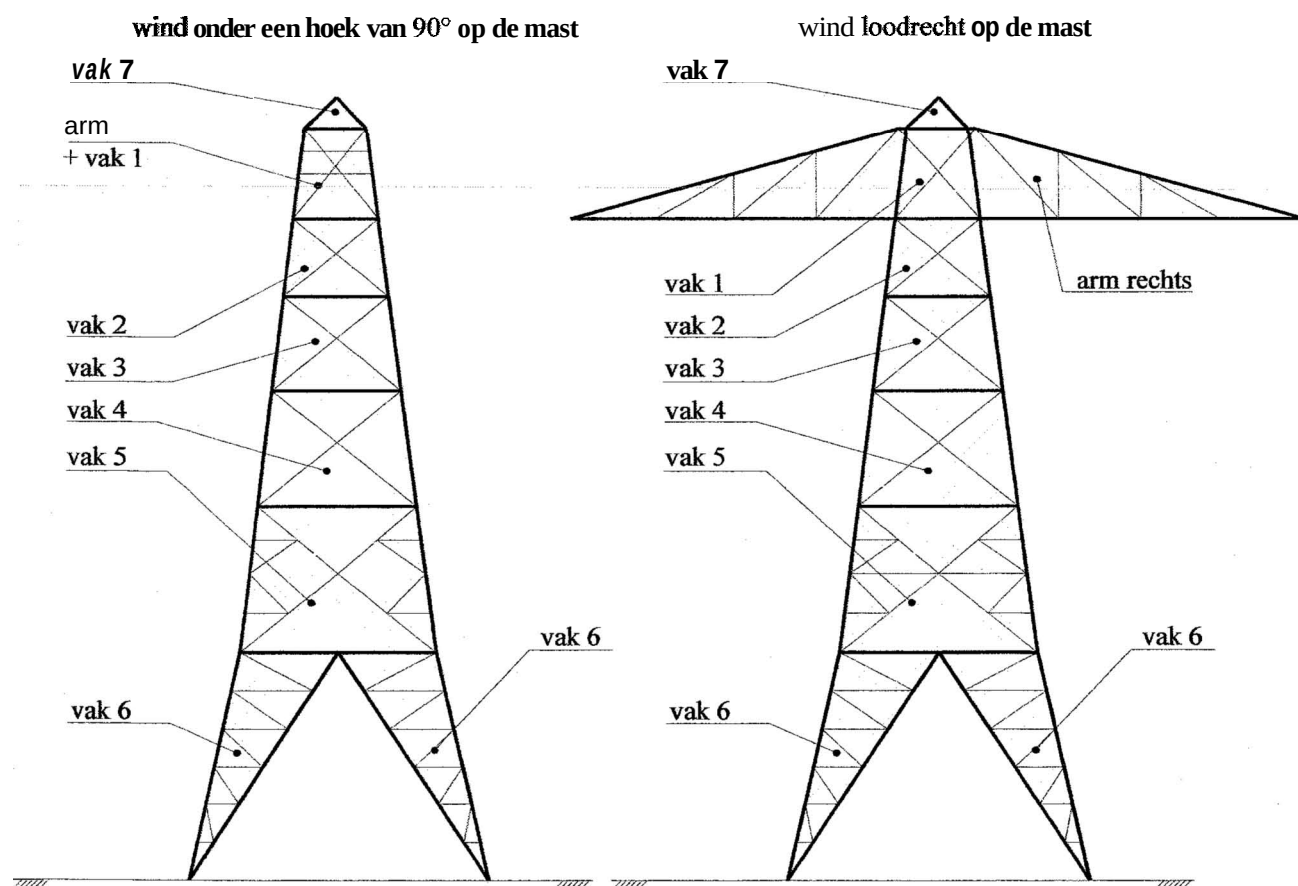
$$D = 0,0463 \text{ m}$$

$$Q_{w,ib} = 8589 \text{ N}$$

Het feit dat deze hoger is als de karakteristieke wind- en ijsbelasting op de geleider komt doordat de bliksemdraad 7,5 m hoger hangt dan de geleider waardoor de windstuwdruk groter is.

Windbelasting op de vakwerkmast

Naast de windbelasting op de geleider en op de isolator die overgebracht wordt op de mast in het ophangpunt van de isolator is er natuurlijk de windbelasting op de mast zelf. De windbelasting wordt berekend per vak van de mast en de onderverdeling in vakken is aangegeven in figuur 4.4.2. De windbelasting grijpt in het model als puntlast aan in het zwaartepunt van vak. Bij een windbelasting onder een hoek van 45° wordt deze gesplitst in een component loodrecht op het mastvlak en een component evenwijdig hieraan. Het aangrijpingspunt blijft het zwaartepunt van het vak.



Figuur 4.4.2 Vakindeling voor de berekening van de vullingsgraad

De windbelasting F_T wordt bepaald met de volgende formule:

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times C_T \times G_{sT} \times A_t \quad (\text{zie ook §3.4.1, blz 17})$$

Als voorbeeld de berekening van vak 1.

De windstuwdruk op $h = 27,15$ m (de hoogte van het zwaartepunt van vak 1) is $q, \times G, = 1,02 \text{ kN/m}^2$ (zie tabel 3.4.1, blz 14)

De formule voor de constructieresonantie factor **voor** een **vakwerkmast** (zie ook blz 17):

$$G_T = \left(1 + 2 \times g \times I(z) \times \sqrt{(B)}\right) / \left(1 + 2 \times g \times I(z)\right) = \left(1 + 2 \times 3,5 \times 0,22 \times \sqrt{(0,75)}\right) / \left(1 + 2 \times 3,5 \times 0,22\right) = 0,92$$

waarbij:

$$I(z) = 1/\ln(z/z_0) = 1/\ln(27,15/0,3) = 0,22$$

$$z_0 = 0,3 \text{ voor windzone 3}$$

$$B = 1/\left(0,94 + 0,021 \times h^{2/3} + 0,029 \times b^{2/3}\right) = 1/\left(0,94 + 0,021 \times 30,8^{2/3} + 0,029 \times 17,5^{2/3}\right) = 0,75$$

$$h = \text{hoogte van de mast in m}$$

$$b = \text{gemiddelde breedte van de mast in m}$$

Voor dit soort mast geldt voor de **weerstandsfactor** C_T de **formule** (zie ook blz 17):

$$C_T = 3,96 \times \left(1 - 1,5 \times \chi + \chi^2\right) = 3,96 \times \left(1 - 1,5 \times 0,092 + 0,092^2\right) = 3,38$$

waarbij:

$$\chi = A_t \frac{2}{h(b_1 + b_2)} = 0,99 \frac{2}{3,47(2,94 + 3,23)} = 0,092$$

$$\chi = \text{de vullingsgraad van het vak}$$

$$A_t = \text{het oppervlak van de staven in het vak in } m^2$$

G_{sT} is de dynamische resonantie factor voor een **vakwerkmast** (zie ook blz 18):

$$G_{sT} = \left(1 + 2 \times g \times I(z) \times \sqrt{(B + E)}\right) / \left(1 + 2 \times g \times I(z) \times \sqrt{(B)}\right) = \left(1 + 2 \times 3,5 \times 0,22 \times \sqrt{(0,75 + 0,056)}\right) / \left(1 + 2 \times 3,5 \times 0,22 \times \sqrt{(0,75)}\right) = 1,02$$

waarbij:

$$I(z) = 1/\ln(z/z_0) = 1/\ln(30,8/0,3) = 0,22$$

$$B = 1/\left(0,94 + 0,021 \times h^{2/3} + 0,029 \times b^{2/3}\right) = 1/\left(0,94 + 0,021 \times 30,8^{2/3} + 0,029 \times 17,5^{2/3}\right) = 0,75$$

$$f_e = 60/h = 60/30,8 = 1,95 \text{ Hz}$$

$$E = \left(0,0394 \times f_e^{-2/3}\right) / \left(D \times (1 + 0,1 \times f_e \times h)(1 + 0,16 \times f_e \times b)\right)$$

$$= \left(0,0394 \times 1,95^{-2/3}\right) / \left(0,01 \times (1 + 0,1 \times 1,95 \times 30,8)(1 + 0,16 \times 1,95 \times 17,5)\right) = 0,056$$

$$D = 0,01$$

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times C_T \times G_{sT} \times A_t = 1,02 \times 10^3 \times 0,92 \times 3,38 \times 1,02 \times 0,99 = 3203 \text{ N}$$

De overhoekse windbelasting wordt bepaald met de volgende formule:

$$F_T = q_h \times G_q \times G_T \times \left(1 + 0,2 \times \sin^2 2\phi\right) \times \left(C_{T1} \times A_{t1} \times \cos^2 \phi + C_{T2} \times A_{t2} \times \sin^2 \phi\right) \times G_{sT}$$

In tabel 4.4.5 staat voor alle vakken de berekende waarde voor de windbelasting F_T .

Vak nummer (zie figuur 4.4.2)	Windbelasting F_T (N)	Overhoekse windbelasting
		Windbelasting F_T evenwijdig aan = F_T loodrecht op de mast (N)
1	3203	
2	4706	1997
3	5642	2394
4	6967	2927
5	9099	3823
6	4883	2051
7	815	346
Arm links + half vak 1	8602	1848
Arm rechts + half vak 1	8602	1848
Arm onder een hoek van 90°	5510	

Tabel 4.4.5 Windbelasting op de vakwerkmast per vak

4.43 Constructie- en onderhoudsbelastingen

Deze belastingen komen niet in mijn vijf belastinggevallen voor.

Voor de onderhoudsbelasting geldt dat alle onderdelen waarop geklommen kan worden en die een hoek met de horizontaal maken van minder dan 30° een verticale puntbelasting van 1 kN in het midden van het onderdeel moet kunnen dragen.

Dit zou bij deze mast in ieder geval gecontroleerd moeten worden voor de staven die het torsieverband vormen in de mast (de kruisende horizontale staven binnen in de mast) aangezien dit de langste horizontale lengten zijn.

4.44 Tabellen van de vijf belastinggevallen

In onderstaande tabellen staan alle belastinggegevens van de 5 belastinggevallen die nodig zijn voor de berekeningen in Ansys. Ze staan per belastinggeval in één tabel. Bij de permanente belastingen staan steeds de krachten per ophangpunt in zowel de horizontale (y-richting) als de verticale richting (z-richting) aangegeven. Bij de windbelasting staat de kracht in horizontale richting (x en/of y-richting) per aangrijppunt. Voor de windbelasting op de mast zelf staat voor de vakken bij de opmerkingen de totale windbelasting per vak. Deze is verdeelt over 3 tot 7 puntenbelastingen in dit vak en de waarde voor een afzonderlijke puntbelasting staat in de kolom Q_w . Voor de ijsbelasting staat hier de verticale kracht t.g.v. de ijsbelasting per ophangpunt en voor de combinatie van wind en ijsbelasting staat hier de horizontale kracht per ophangpunt van de isolator aan de mast.

Belastinggeval 1: Er werken op de mast alleen de permanente belastingen zonder de **horizontale component van de trekspanning van de geleider**.
Temperatuur is 10 °C.

Belastinggeval 1			
Permanente belastingen	Belastings factor	$Q_G (N)$	Opmerkingen
$F_{V;op}$ Totale verticale belasting per ophangpunt aan de mast	$\gamma_G = 1,35$	8301	$F_{V;op} = 6149 \times 1,35$
F_{Bv} Verticale belasting t.g.v. de bliksemdraad	$\gamma_1 = 1,35$	2117	$F_{Bv} = 1568 \times 1,35$
Eigen gewicht mast	$\gamma_1 = 1,35$	$Dichtheid \times$ $lengte \times \gamma_1$	$\rho = 7,8 \times 10^3 \times 1,35 = 10530 kg/m^3$

Tabel 4.4.6 Belastinggeval 1

Belastinggeval 2: Een hoge windsnelheid loodrecht op de **hoogspanningslijn** in combinatie met de **permanente** belastingen en een gematigde **ijsbelasting**.
Temperatuur is $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Belastinggeval 2			
Permanente belastingen	Belastings factor	$Q_G (N)$	Opmerkingen
$F_{H,op}$ Totale horizontale belasting per ophangpunt aan de mast	$\gamma_f = 1,2$	497	$F_{H,op} = 414 \times 1,2$
$F_{V,op}$ Totale verticale belasting per ophangpunt aan de mast		7379	$F_{V,op} = 6149 \times 1,2$
F_{Bh} Horizontale belasting t.g.v. de bliksemdraad		106	$F_{Bh} = 106 \times 1,2$
F_{Bv} Verticale belasting t.g.v. de bliksemdraad		1882	$F_{Bv} = 1568 \times 1,2$
Eigen gewicht mast		$Dichtheid \times lengte \times \gamma_G$	$\rho = 7,8 \times 10^3 \times 1,2 = 9360 \text{ kg/m}^3$
Windbelasting	Belastings factor	$Q_w (N)$	Opmerkingen
Q_{wc} ; Geleider	$\gamma_f = 1,50$	11493	$Q_{wc} = 7662 \times 1,50$
Q ; Isolator		1292	$Q = 861 \times 1,50$
Q ; Bliksemdraad		3318	$Q_{wb} = 2212 \times 1,50$
F_T Vak 2		1765	$F_T = 4706 \times 1,50 = 7059$
F_T Vak 3		2116	$F_T = 5642 \times 1,50 = 8463$
F_T Vak 4		2613	$F_T = 6967 \times 1,50 = 10451$
F_T Vak 5		3412	$F_T = 9099 \times 1,50 = 13649$
F_T Vak 6		3663	$F_T = 4883 \times 1,50 = 7325$
F_T Vak 7		272	$F_T = 815 \times 1,50 = 815$
F_s Arm onder een hoek van $90^{\circ} + \text{vak 1}$		2066	$F_s = 5510 \times 1,50 = 8265$
Ijsbelasting	Belastings factor	$Q_i (N)$	Opmerkingen
Q_{gi} ; geleider	$\gamma_{Q,i} = 0,35$	1241	Gewicht geleider met ijs – gewicht geleider zonder ijs: $12882 - 5793 = (7089/2) \times 0,35$
Q_{bi} ; bliksemdraad		731	Gewicht bliksemdraad met ijs - gewicht bliksemdraad zonder ijs: $3657 - 1568 = 2089 \times 0,35$
Combinatie van wind- en ijsbelasting	Belastings factor	$Q_{w,i} (N)$	Opmerkingen
$Q_{w,i}$; geleider	$\gamma_{Q,w,i} = 0,35$	4172	$Q_{w,i} = \frac{23841 \times 0,35}{0,35} = 4172 N$
; bliksemdraad		3006	$Q_{w,i} = 8589 \times 0,35$

Tabel 4.4.7 Belastinggeval 2

Belastinggeval 3: Een extreme ijsbelasting gecombineerd met een gematigde windbelasting evenwijdig aan de hoogspanningslijn en de permanente belastingen. Temperatuur is $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Belastinggeval 3			
Permanente belastingen	Belastings factor	$Q_G\text{ (N)}$	Opmerkingen
$F_{H,op}$ Totale horizontale belasting per ophangpunt aan de mast	$\gamma_G = 1,2$	497	$F_{H,op} = 414 \times 1,2$
$F_{V,op}$ Totale verticale belasting per ophangpunt aan de mast		7379	$F_{V,op} = 6149 \times 1,2$
F_{Bh} Horizontale belasting t.g.v. de bliksemdraad		106	$F_{Bh} = 106 \times 1,2$
F_{Bv} Verticale belasting t.g.v. de bliksemdraad		1882	$F_{Bv} = 1568 \times 1,2$
Eigen gewicht mast		Dichtheid $\times$ lengte $\times y$,	$\rho = 78 \times 10^3 \times 1,2 = 9360 \text{ kg/m}^3$
Windbelasting	Belastings factor	$Q_W\text{ (N)}$	Opmerkingen
Q_{wc} ; Geleider	$\gamma_{Q,W} = 0,45$	0	Geen component van de wind loodrecht op de geleider
Q_{wins} ; Isolator		387	$Q_{Wins} = 861 \times 0,45$
Q_{wb} ; Bliksemdraad		0	Geen component van de wind loodrecht op de bliksemdraad
F_T Vak 1		360	$F_T = 3203 \times 0,45 = 1441$
F , Vak 2		530	$F_T = 4706 \times 0,45 = 2118$
F_T Vak 3		635	$F_T = 5642 \times 0,45 = 2539$
F_T Vak 4		784	$F_T = 6967 \times 0,45 = 3135$
F , Vak 5		1024	$F_T = 9099 \times 0,45 = 4095$
F , Vak 6		1099	$F_T = 4883 \times 0,45 = 2197$
F , Vak 7		122	$F_T = 815 \times 0,45 = 367$
F_T Arm links		553	$F_T = 8602 \times 0,45 = 3871$
F , Arm rechts		553	$F_T = 8602 \times 0,45 = 3871$
Ijsbelasting	Belastings factor	$Q_i\text{ (N)}$	Opmerkingen
Q_{ic} ; geleider	$\gamma_{Q,i} = 1,5$	5317	Gewicht geleider met ijs – gewicht geleider zonder ijs: $12882 - 5793 = (7089/2) \times 15$
Q ; bliksemdraad		3134	Gewicht bliksemdraad met ijs - gewicht bliksemdraad zonder ijs: $3657 - 1568 = 2089 \times 15$

Tabel 4.4.8 Belastinggeval 3

Geen component van de wind loodrecht op de geleider en bliksemdraad dus ook geen combinatie van wind- en ijsbelasting.

Belastinggeval 4: Een overhoekse momentane windbelasting en de permanente belastingen.
Temperatuur is 10 °C.

Belastinggeval 4			
Permanente belastingen	Belastings factor	Q_G (N)	Opmerkingen
$F_{H;op}$ Totale horizontale belasting per ophangpunt aan de mast	$\gamma_G = 1,2$	497	$F_{H;op} = 414 \times 1,2$
$F_{V;op}$ Totale verticale belasting per ophangpunt aan de mast		7379	$F_{V;op} = 6149 \times 1,2$
F_{Bh} Horizontale belasting t.g.v. de bliksemdraad		106	$F_{Bh} = 106 \times 1,2$
F_{Bv} Verticale belasting t.g.v. de bliksemdraad		1882	$F_{Bv} = 1568 \times 1,2$
Eigen gewicht mast		$Dichtheid \times lengte \times \gamma_G$	$\rho = 7,8 \times 10^3 \times 1,2 = 9360 \text{ kg/m}^3$
Windbelasting	Belastings factor	Q_W (N)	Opmerkingen
Q_{wc} ; Geleider F_T loodrecht = F_T evenwijdig	$\gamma_{Q;W} = 0,3$	554	$Q_{wc} = 1848 \times 0,3$
Q_{wins} ; Isolator F_T loodrecht = F_T evenwijdig		258	$Q_{wins} = 861 \times 0,3$
Q_{wb} ; Bliksemdraad F_T loodrecht = F_T evenwijdig		995	$Q_{wb} = 2212 \times 0,45$
F_T Vak 2 F_T loodrecht = F_T evenwijdig		100	$F_T = 1997 \times 0,3$
F_T Vak 3 F_T loodrecht = F_T evenwijdig		120	$F_T = 2394 \times 0,3$
F_T Vak 4 F_T loodrecht = F_T evenwijdig		146	$F_T = 2927 \times 0,3$
F_T Vak 5 F_T loodrecht = F_T evenwijdig		191	$F_T = 3823 \times 0,3$
F_T Vak 6 F_T loodrecht = F_T evenwijdig		103	$F_T = 2051 \times 0,3$
F_T Vak 7 F_T loodrecht = F_T evenwijdig		26	$F_T = 346 \times 0,3$
F_T Vak 1 + Arm links F_T loodrecht = F_T evenwijdig		80	$F_T = 1848 \times 0,3$
F_T Vak 2 + Arm rechts F_T loodrecht = F_T evenwijdig		80	$F_T = 1848 \times 0,3$

Tabel 4.4.9 Belastinggeval 4

Belastinggeval 5: Draadbreek in een van de geleiders, waardoor het **mastlichaam** op torsie wordt belast, gecombineerd met de permanente belastingen en een momentane waarde voor de **windbelasting** loodrecht op de **hoogspanningslijn**. **Temperatuur** is 10 °C.

Belastinggeval 5			
Permanente betastingen	Belastings factor	Q_G (N)	Opmerkingen
$F_{H,op}$ Totale horizontale belasting per ophangpunt aan de mast	$\gamma_G = 1,2$	497	$F_{H,op} = 414 \times 1,2$
$F_{V,op}$ Totale verticale belasting per ophangpunt aan de mast		7379	$F_{V,op} = 6149 \times 1,2$
F_{Bh} Horizontale belasting t.g.v. de bliksemdraad		106	$F_{Bh} = 106 \times 1,2$
F_{Bv} Verticale belasting t.g.v. de bliksemdraad		1882	$F_{Bv} = 1568 \times 1,2$
Eigen gewicht mast		<i>Dichtheid x lengte x y,</i>	$p = 7,8 \times 10^3 \times 1,2 = 9360 \text{ kg/m}^3$
Windbelasting	Belastings factor	Q (N)	Opmerkingen
Q_{wc} ; Geleider	$\gamma_{Q,w} = 0,3$	2299	$Q_{wc} = 7662 \times 0,3$
Q ; Isolator		258	$Q_{wis} = 861 \times 0,3$
Q_{wb} ; Bliksemdraad		664	$Q_{wb} = 2212 \times 0,3$
F_i Vak 2		353	$F_i = 4706 \times 0,3$
F_T Vak 3		423	$F_T = 5642 \times 0,3$
F_i Vak 4		523	$F_i = 6967 \times 0,3$
F_i Vak 5		683	$F_T = 9099 \times 0,3$
F_i Vak 6		733	$F_i = 4883 \times 0,3$
F_T Vak 7		382	$F_T = 815 \times 0,3$
F_i Arm onder een hoek van 90°		413	$F_T = 5510 \times 0,3$

Tabel 4.4.10 Belastinggeval 5

4.5 Conclusie

In het **geval** van een **extreme windbelasting** is deze **verantwoordelijk** voor een grote **extra** belasting boven op de **permanente belastingen** (verticale belastingen op elk **ophangpunt** van de **geleider** bijna twee keer zo groot).

Wat **mij** toch nog verbaasde was de grote toename **van** de **trekspanning** in de geleider bij **een** **ijsbelasting** in combinatie met de **windbelasting** loodrecht op de geleiders. Het is niet **een** van de vijf **belastinggevallen** die ik hier bespreek maar ik heb er toch even aan gerekend.

De combinatie **extreme** ijsbelasting en momentane **windbelasting** geeft een horizontale belasting op elk **ophangpunt** van de geleider **aan** de mast die ruim drie keer groter is als die bij een **zelfde** soort belasting zonder wind of met een wind evenwijdig aan de geleiders.

Dit zal ongetwijfeld terug te zien zijn in de **staafkrachten** in het Ansys model in hoofdstuk 5.

5 Model en berekeningen in Ansys

5.1 Inleiding

Een vakwerk is een uit rechte stalen staven opgebouwde draagconstructie. De staven zijn onderling verbonden door, in dit geval, bouten. Hoewel deze verbindingen in werkelijkheid tamelijk star **zijn**, kunnen ze in vakwerkberekeningen **opgevat** worden als wrijvingsloze scharnieren. Dat de staven in werkelijkheid niet wrijvingsloos scharnierend aan elkaar zijn verbonden hoeft geen probleem te zijn. Als de **staven lang zijn** (en dat wil zeggen dat de lengte aanzienlijk groter is dan de grootste **afmeting** van de doorsnede) is de optredende **kracht in de lengterichting van de staaf** (de trek- of drukkracht) bepalend voor de optredende spanningen en voor de **stijfheid** van de constructie. Eventuele optredende dwarskrachten en momenten kunnen dan buiten beschouwing worden **gelaten**. De fout die met dit weglaten wordt **gemaakt** is dan te verwaarlozen.

Indien **diagonalen** of wandstaven van twee aansluitende wanden van de mast niet op dezelfde hoogte op de randstaven **aansluiten**, moeten de randstaven in het driedimensionale rekenmodel **als balkelementen** worden geschematiseerd (**dat** is hier niet **het** geval).

De verbindingen van de wandstaven kunnen hier altijd als **scharnier** worden **beschouwd**.

De norm NEN 6770 geeft ook aan wanneer een verbinding als scharnierend dan wel stijf moet worden **beschouwd**:

- Scharnierend aangesloten: met één bout
- Stijf aangesloten: gelast of ≥ 2 bouten

Het grootste deel van de verbindingen bestaat uit een verbinding met maar één bout en in ieder geval alle wandstaven zijn met één bout aan de randstaven **bevestigd**.

5.2 Model in Ansys

Voor dat ik **begon** met de invoer in Ansys heb ik **eerst** een stappenplan gemaakt aan de hand van de gegevens die nodig zijn voor het modelleren van een vakwerk in Ansys.

Deze gegevens staan in onderstaand overzicht

- de keuze van het type element
- de 'real constants' van de gebruikte elementen
- isotroop materiaal of niet
- de 'material props' van het materiaal
- de coördinaten van de knooppunten
- de nummering van de knooppunten
- tussen welke knooppunten welke elementen worden **aangebracht**
- welke **knooppunten** niet, of slechts beperkt kunnen verplaatsen (de **oplegpunten**)
- de plaats, richting en grootte van de uitwendige **krachten**

- De keuze van het type element

Ik heb **gekozen** voor de elementen LINK8 en BEAM4 (voor de informatie van Ansys over deze elementen: zie bijlage 1).

LINK8 is een staaf element dat alleen **trek** en **drukkrachten** kan opnemen. Het heeft drie vrijheidsgraden. Dit zijn verplaatsing in de **x-richting (UX)**, de **y-richting (UY)** en de **z-richting (UZ)**. Deze elementen heb ik in het hele vakwerk gebruikt behalve voor de randstaven. Er komen in het model twee soorten LINK8 voor met beide een ander waarde voor het **oppervlak** van de **doorsnede**. De een is een hoekstaal 50 x 50 x 5 mm en de andere is een hoekstaal 80 x 80 x 8 mm.

Voor de randstaven heb ik gekozen voor het element BEAM4. Dit is een 3-D balk element dat naast **normaalkrachten** ook geschikt is voor torsie en buiging. Het heeft drie **vrijheidsgraden**. Dit zijn naast de verplaatsingen in de x, y en z-richting **rotaties** om de x-as (ROTX), de y-as (ROTY) en de z-as (ROTZ). **Van** het BEAM4 element zijn er ook twee soorten met beide een ander waarde voor het **oppervlak** van de doorsnede. De een is een hoekstaal $80 \times 80 \times 8$ mm ende andere is een **hoekstaal** $120 \times 120 \times 12$ mm.

Wat in werkelijkheid dus een hoekstaal $80 \times 80 \times 8$ mm is kan in het model een LINK8 zijn of een **B W 4** al naar gelang de **functie** (rand-of wandstaaf) in het vakwerk.

Voor beide elementen geldt bovendien dat je ze een waarde voor de dichtheid kunt geven en zo dus het eigen gewicht van de **constructie** mee kunt laten berekenen.

- De 'real constants' van de **gebruikte** elementen

Van LINK8 is dit: de **oppervlakte** van de doorsnede en van BEAM4 zijn dit de oppervlakte van de doorsnede, de **oppervlakte traagheidsmoment** IZZ en IYY, en de kwadratisch oppervlakte moment IXX. Voor LINK8 heb ik twee verschillende elementen **gebruikt** met beide een andere doorsnede oppervlakte. Voor BEAM4 heb ik ook twee verschillende elementen **gebruikt** met beide een andere doorsnede oppervlakte.

- Isotroop **materiaal** of niet

Het materiaal is isotroop.

Wet **materiaal** heeft in alle richtingen **dezelfde** fysische en mechanische eigenschappen.

- De 'material props' van het materiaal

Hieronder vallen onder de **elasticiteitsmodulus** en de dichtheid van de elementen.

- De coördinaten en de nummering van de knooppunten

Ik heb de mast eerst in AutoCad in 3-D getekend waarna ik hier alle coördinaten voor de knooppunten uit kon halen. Voor deze versie van Ansys bestaat **al** helaas geen mogelijkheid om rechtstreeks AutoCad of Excel bestanden in te lezen. Het **invoeren** van de knooppunten en elementen moest dus volledig handmatig gebeuren (zie bijlage 2 voor een overzicht van de knooppunten).

Bij **het** invoeren van de coördinaten **geef** je meteen het **nummer** voor deze coördinaat op.

Normaal gesproken nummer je gewoon oplopend vanaf nummer 1. In Ansys kun je de nummers tussentijds comprimeren waardoor je altijd aansluitende nummers hebt.

- Tussen welke knooppunten **welke elementen** worden aangebracht

Aangezien ik de mast eerst in AutoCad heb getekend was al duidelijk **waar** elementen moesten komen. De **keuze van de elementen** was ook al gemaakt op basis van hun functie dus het was een kwestie van 500 elementen op z'n plaats zetten (zie bijlage 3 voor een overzicht van de elementen).

Elementen in Ansys gaan **altijd** van knooppunt naar knooppunt. Wet is niet **mogelijk** om een doorlopend element te maken waarbij op plaatsen waar geen knooppunten zitten andere elementen aangrijpen. En op het moment dat je andere knooppunten plaatst op een doorlopend element wordt deze **opgesplitst** in meerdere elementen.

- Welke knooppunten niet, of slechts beperkt kunnen verplaatsen (de oplegpunten)

Dit is bij een hoogspanningsmast vrij duidelijk. De vier uiteinden van de poten zijn voor alle zes de **vrijheidsgraden** vastgelegd. Geen verplaatsing mogelijk in de x, y- of z-richting en ook geen rotatie mogelijk om de x, y- of z-as.

- De plaats, richting en grootte van de uitwendige krachten

Er waken drie soorten belastingen op de mast langs drie verschillende assen. Alle belastingen zijn opgesplitst in componenten langs de drie assen. Deze zijn daarna als puntbelasting in Ansys ingevoerd. Deze puntbelastingen moeten aangrijpen in een knooppunt. Alle belastingen op en van de geleider grijpen samen met de belastingen van de isolator aan in het ophangpunt van de isolator aan de traverse van de mast. De belastingen van de bliksemdraad grijpen aan in het topje van de mast. De windbelastingen zijn verdeeld per vak en grijpen verdeelt aan over het vak.

5.3 Invoer in Ansys

In tabel 5.3.1 staan de gegevens die ik heb gebruikt bij de invoer van de elementen in Ansys. Ansys vraagt niet zelf om specifieke eenheden bij deze invoerwaarden dus je moet zelf zorgen dat deze consistent zijn. Ik heb gekozen voor $[m]$, $[N]$ en N/m^2 .

De dichtheid staat in kg/m^3 .

	LINK8	LINK8	BEAM4	BEAM4
A (m^2)	0,00048	0,00123	0,00123	0,00275
ρ (kg/m^3)	10530	10530	10530	10530
E (N/m^2)	210×10^9	210×10^9	210×10^9	210×10^9
ν	0,3	0,3	0,3	0,3
I_z (m^4)			$72,3 \times 10^{-8}$	367×10^{-8}
I_y (m^4)			$72,3 \times 10^{-8}$	367×10^{-8}
T_x (m)			0,08	0,12
T_y (m)			0,08	0,12
I_x (m^4)			$29,6 \times 10^{-8}$	151×10^{-8}

Tabel 5.3.1 Invoerwaarden voor de elementen in Ansys

waarbij:

A = het oppervlak van de doorsnede van het hoekprofiel in (m^2)

ρ = de dichtheid in (kg/m^3)

E = de elasticiteitsmodulus voor staal in (N/m^2)

ν = de dwarscontractiecoëfficiënt

I_z = oppervlakte traagheidsmoment t.o.v. de z-as in (m^4)

I_y = oppervlakte traagheidsmoment t.o.v. de y-as in (m^4)

T_x = dikte in de x-richting in (m)

T_y = dikte in de y-richting in (m)

I_x = kwadratisch oppervlakte moment in (m^4)

5.4 Conclusie

De invoer in Ansys is iets wat, door het vele handmatige werk, vooral veel tijd kost. Ook is er een kans op fouten door het vele typewerk wat gedaan moet worden om bv. coördinaten in te voeren. Het vergt wat inzicht en overleg om de juiste elementen te kiezen uit de vele elementen die in Ansys beschikbaar zijn. Kies in ieder geval zo eenvoudig mogelijk. Een 2-D element als het kan; een 3-D element als het moet. En verder een element met zo weinig mogelijk extra functies.

De resultaten van de berekeningen die in Ansys gedaan zijn worden in hoofdstuk 6 gebruikt om te kunnen controleren of de mast qua sterkte aan de norm NEN-EN 50341 voldoet.

6 Controle van de mast

6.1 Inleiding

De uitkomsten uit de berekeningen met **Ansys gebruik** ik in dit laatste hoofdstuk om te kunnen controleren of de mast voldoet aan een aantal eisen die gesteld worden in NEN-EN 50341. Ik **kijk** daarbij naar de optredende maximale trek- en drukspanningen en naar de stabiliteit van de mast. Dit laatste houdt in dat ik een controle uitvoer op **knik**. Door de aanwezige belastingen ondergaan de mast en onderdelen van de mast vervormingen die afhankelijk zijn van de optredende spanningen. Bij de berekening wordt uitgegaan van **elastische** vormveranderingen, hetgeen betekent dat de optredende spanningen de 0,2% rekgrens ($\sigma_{0,2}$) niet mogen overschrijden.

Voor het staal gebruikt in deze mast geldt:

$$\sigma_{0,2} = 195 \text{ N/mm}^2$$

De hoekprofielen vallen, volgens NEN 6770, artikel 10.2.4.1, alle drie in doorsnede klasse 3. Dit is alleen van **belang** omdat voor klasse 4 soms **afwijkende rekenregels** gelden. Interne krachten en momenten worden berekend volgens de **elasticiteitsleer waarmee** de in de vakwerkmast optredende **vervormingen** en **spanningen** worden berekend. Dit wordt gedaan met **gebruikmaking** van de begin geometrie. Met eventuele 2^e orde effecten op de geometrie **wordt** in deze scriptie niet gerekend.

Buigende momenten in de staven, als gevolg van de **directe** aanstroming van de profielen door de wind, **kan** worden verwaarloosd.

In bijlage 2 en 3 staan een aantal **afbeeldingen** met daarop de **knooppuntnummers** respectievelijk de elementnummers.

6.2 Trek- en drukspanningen

De maximale spanning, in dit geval is dat een drukspanning, komt voor bij belastinggeval 2 bij element nummer E01 (deze zit tussen knooppunt 50 en 53). De spanning is hier $\sigma = 79,6 \text{ N/mm}^2$. In element 34 zit een **bijna** even hoge drukspanning ($\sigma = 76,2 \text{ N/mm}^2$).

In de tegenover liggende elementen 29 en **163** zit een hoge trekspanning ($\sigma = 66,4 \text{ N/mm}^2$ respectievelijk $\sigma = 63,0 \text{ N/mm}^2$). Dat de **spanningen** in element **101** en 34 en in element 29 en 163 niet gelijk zijn komt door de horizontale componenten van de trekkracht in de **ophangpunten** van de geleiders. De belasting is **niet helemaal** symmetrisch. Doordat de windbelasting loodrecht op de geleiders staat **helt de mast een beetje** over naar de lijzijde van de mast. Hierdoor worden de elementen **101 en 34** op druk belast terwijl de elementen 29 en **163** op trek worden belast.

Alle vier de elementen liggen op de overgang van het **mastlichaam** naar de broek van de mast. De krachten worden hier geconcentreerd in de knooppunten 16, 14, 50 en 77 en vervolgens verspreiden ze zich weer door de rest van de poot. Vandaar dus de grote kracht en ook grote spanning in deze vier elementen.

De spanningen blijven in alle gevallen onder de 0,2% rekgrens en de mast voldoet dus op **dit punt**. Over het algemeen zijn de trek en drukspanningen vrij laag. Zelfs de maximale spanning zit nog ver onder het toelaatbare.

6.3 Stabiliteit van op druk belaste staven

Inleiding

Staven in constructies vertonen imperfecties:

- de staven zijn nooit zuiver recht
- in de doorsnede zijn restspanningen aanwezig
- de vorm van de doorsnede vertoont afwijkingen ten opzichte van de gewenste vorm
- de belasting grijpt niet precies aan op die plaatsen waar dat theoretisch is bedoeld

Door deze imperfecties vallen de zwaartepunten van de staafdoorsneden niet overal samen met de werklijn van de drukkracht en ontstaat buiging in de staaf. Wanneer nu de drukkracht op de staaf toeneemt, neemt de buiging van de staaf meer dan evenredig toe. Dit verschijnsel kan bij toename van de drukkracht leiden tot bezwijken van de staaf door instabiliteit.

Een andere naam hiervoor is knikken.

Er moet worden aangetoond dat een op druk belaste staaf niet bezwijkt door instabiliteit.

In de normen NEN 6770 en NEN 6771 worden drie afzonderlijke vormen van instabiliteit behandeld:

- knikstabiliteit
- torsiestabiliteit
- torsieknikstabiliteit

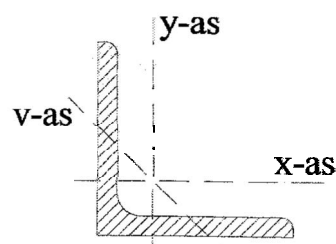
Knikstabiliteit

Knikstabiliteit is de mate waarin een op druk belaste staaf weerstand biedt aan instabiliteit als gevolg van een doorgaande uitbuiging van de staaf in één van beide hoofdrichtingen.

De toetsingsregels die hier van toepassing zijn komen uit NEN 6770, artikel 12.1. i.

Op druk belaste staven zijn knikstabil in, in dit geval, de y- en de v-as als kan worden aangetoond dat aan deze twee toetsingsregels wordt voldaan:

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc} N_{c;u;d}} \leq 1 \text{ en } \frac{N_{c;s;d}}{\omega_{v;buc} N_{c;u;d}} \leq 1$$



Figuur 6.3.1 Hoekprofiel met de hoofdassen

Ik ga hier kijken naar belastinggeval 2 waar in randstaaf 101 een maximale drukkracht van 219,07 kN optreedt. Dit is een hoekprofiel 120×120×12 mm.

Voor de rekenwaarde van de druknormaalkracht geldt:

$$N_{c;u;d} = N_{pl;d} = A \times f_{t,y} = 2750 \times 195 = 536 \text{ kN}$$

waarbij:

A is de oppervlak van de dwarsdoorsnede in mm^2
 f is de rekenwaarde van de 0,2% rekgrens

De relatieve slankheid $\lambda_{y,rel}$ volgt uit:

$$F_{y,E} = \frac{\pi^2 E_d I_y}{\ell_{y;buc}^2} = \frac{\pi^2 \times 2,1 \times 10^5 \times 368 \times 10^4}{1530^2} = 3258 \text{ kN}$$

waarbij:

$F_{y,E}$ is de Eulerse knikkracht met betrekking tot knikken om de y-as in kN
 I_y is het traagheidsmoment in mm^4
 $\ell_{y;buc}^2$ is de kniklengte

$$\lambda_{y,rel} = \sqrt{\frac{N_{pl;d}}{F_{y,E}}} = \sqrt{\frac{536}{3258}} = 0,41$$

De knikfactor $\omega_{y;buc}$ kan nu worden berekend. Knikkromme c uit NEN 6770 is van toepassing voor dit profiel. Uit tabel 24 van NEN 6770, met $\lambda_{y,rel} = 0,41$ en kromme c, volgt dat

$$\omega_{y;buc} = 0,90$$

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc} N_{c;u;d}} = \frac{219,07}{0,9 \times 536} = 0,45 \leq 1 \quad \text{voldoet}$$

Analoog aan deze berekening gaat de berekening voor de v-as. Ik volsta hier met alleen de uitkomst van de toetsingsregel.

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc} N_{c;u;d}} = \frac{219,07}{0,76 \times 536} = 0,54 \leq 1 \quad \text{voldoet}$$

Het profiel voldoet.

Torsiestabiliteit

Torsiestabiliteit is de mate waarin een op druk belaste staaf weerstand biedt aan instabiliteit als gevolg van een doorgaande rotatievervorming van die staaf om de lengte-as. Deze vorm van instabiliteit hoeft voor de hoekprofielen niet getoetst te worden.

Torsieknikstabiliteit

Torsieknikstabiliteit is de mate waarin een op druk belaste **staaf** weerstand biedt aan **instabiliteit** door een combinatie **van** een doorgaande **uitbuiging van** de doorsnede én een doorgaande **rotatievervorming** om de lengte as van de staaf. Een **speciaal geval** hiervan is de kruisende wandstaven zoals hieronder is beschreven.

Kruisende wandstaven

Bij de **dimensionering** van de wandstaven in de zijvlakken van het de **vakwerkmast** is de **drukkracht** meestal maatgevend. Een specifiek aspect bij **vakwerkmasten** betreft de **kruisende wandstaven**.

Kruisende diagonalen in vakwerkmasten kunnen, **afhankelijk** van de belastingen, gelijktijdig op **druk** of **trek** worden belast. **Daarnaast** kan **zich** ook de situatie voordoen **waarbij** de ene diagonaal **op trek** en de andere op druk wordt belast. In **een** dergelijke situatie **ondersteunt** de **trekdiagonaal** de **drukdiagonaal** tegen knik uit het vlak.

Instabiliteit van kruisende diagonalen **treedt op bij uitknikken en torderen** van één van de diagonalen, dit is een combinatie van **torsieknik en** buiging Bij toetsing van de **stabiliteit** van elkaar **kruisende** staven moet de slankheid worden bepaald op basis van de traagheidsstraal i behorende bij de zwakke **as** van de staafdoorsnede en de kniklengte gelijk aan de ongesteunde lengte.

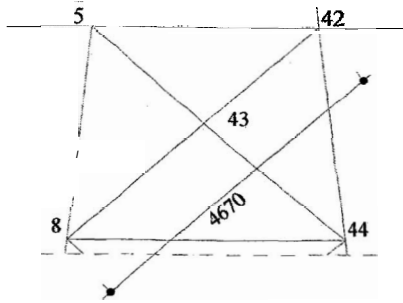
In NEN 6771, artikel 12.1.1.3, is een **rekenregel opgenomen voor het** vaststellen van de effectieve **kniklengte** voor **knik** uit het vlak. De slankheid met betrekking tot deze **kniklengte** moet zijn bepaald op basis van de traagheidsstraal behorende bij de **as van de staafdoorsnede die evenwijdig loopt aan het vlak van de kruisende staven**. Hoewel de norm aangeeft dat deze **rekenregel alleen geldt voor centrish gedrukte staven is toepassing van deze rekenregel** acceptabel voor de beoordelingen van kruisende diagonalen ten behoeve van de **dimensionering van de betreffende staven** mits de aanwezige excentriciteit in rekening wordt gebracht. Deze wordt op de volgende manier in rekening gebracht.

Bij **wandstaven** die stijf (met **méér dan 1 bout**) **zijn verbonden aan de randstaaf** wordt een verkorting toegepast op de **kniklengte**. Bij wandstaven die **scharnierend zijn bevestigd (met 1 bout)** moet voor de kniklengte de systeemplengte worden genomen. Dit laatste is bij de wandstaven in deze scriptie het geval.

Ik **bekijk** nu één geval **waarbij een** van de **twee kruisende diagonalen op trek** wordt belast en de andere diagonaal op druk (zie figuur 6.3.2). Het **belastinggeval is belastinggeval 3**. De te **berekenen elementen zijn element 80, 81, 83 en 84**. Het vlak wordt begrensd door de knooppunten 5, 42, 8 en 44 met **in het midden knooppunt 43**.

De beide diagonalen zijn **hoekstaven** $80 \times 80 \times 8 \text{ mm}$ ($A = 1230 \text{ cm}^2$) met een systeemplengte $L_s = 4670 \text{ mm}$. De traagheidsstraal om de **v-as**: $i_v = 15,5 \text{ mm}$ en om de **y-as**: $i_y = 29,6 \text{ mm}$.

De diagonalen zijn onderling in het **kruispunt verbonden**.



Figuur 6.3.2 Kruisende staven

Kniklengte om de y-as

Er is hier sprake van een steungevende staaf en er wordt voldaan aan de gestelde voorwaarden a en b van NEN 6771, artikel 12.1.1.3.1.

$$f_{uit,gest;buc} = \left(\frac{3}{4} - \frac{3}{8} \alpha_1 \left(1 + \frac{\ell_{uit,ongest,sys}}{\ell_{uit,ongest;buc}} \right) \right) \frac{F_{1;s;d}}{F_{2;s;d}} + \frac{1}{4} \alpha_1 \left(1 + \frac{\ell_{uit,ongest,sys}}{\ell_{uit,ongest;buc}} \right) + \frac{1}{2}$$

$$= \left(\frac{3}{4} - \frac{3}{8} \times 0,55 \left(1 + \frac{4670}{4670} \right) \right) \frac{-11226}{11226} + \frac{1}{4} \times 0,55 \left(1 + \frac{4670}{4670} \right) + \frac{1}{2} = 0,438$$

Als voorwaarde geldt:

$$\frac{1}{2} \alpha_1 \left(\frac{\ell_{uit,ongest,sys}}{\ell_{uit,ongest;buc}} \right) = \frac{1}{2} 0,55 \left(\frac{4670}{4670} \right) = 0,275 \leq f_{uit,gest;buc} \leq 1 \quad \text{Dit klopt dus } f_{uit,gest;buc} = 0,438$$

waarbij:

- $\ell_{uit,gest;buc}$ is de kniklengte van de gestemde staaf uit het vlak
- $\ell_{uit,ongest;buc}$ is de kniklengte van de gestemde staaf als de steungevende staaf niet aanwezig zou zijn
- $f_{uit,gest;buc}$ is de verhouding tussen de kniklengte van de gesteunde staaf en de kniklengte van dezelfde gesteunde staaf als de steungevende staaf niet aanwezig zou zijn
- α_1 is de verhouding tussen de grootste ongesteunde lengte en de systeemlengte van de gesteunde staaf, waarin deze door de steungevende staaf is verdeeld
- $\ell_{uit,ongest,sys}$ is de systeemlengte van de gesteunde staaf uit het vlak als de steungevende staaf niet aanwezig zou zijn
- $F_{1;s;d}$ is de rekenwaarde van de normaalkracht in de steungevende staaf ten gevolge van de belasting
- $F_{2;s;d}$ is de rekenwaarde van de normaaldrukkracht in de gestemde staaf ten gevolge van de belasting

Invullen geeft een kniklengte:

$$\ell_{uit;gest;buc} = f_{uit;gest;buc} \times \ell_{uit;ongest;buc} = 0,438 \times 4670 = 2046 \text{ mm}$$

Kniklengte om de v-as

Er zijn geen verkortende factoren dus:

$$\ell_v = 4670 \text{ mm}$$

Relatieve slankheid om de y-as

De slankheid om de y-as is: $\lambda_y = \frac{\ell_{uit;gest;buc}}{i_y} = \frac{2046}{24,2} = 84,5$ en de relatieve slankheid om de y-as is dan:

$$\lambda_{y,rel} = \frac{\lambda_y}{\lambda_e} = \frac{84,5}{76,4} = 1,11 \quad \lambda_e \text{ is materiaal afhankelijk en is hier: } \lambda_e = 76,4$$

Relatieve slankheid om de v-as

De slankheid om de v-as is: $\lambda_v = \frac{\ell_v}{i} = \frac{4670}{15,5} = 301,2$ en de relatieve slankheid om de v-as is dan:

$$\lambda_{v,rel} = \frac{301,2}{76,4} = 3,94$$

Toetsing om de y-as

Volgens NEN 6771, art.12.1.1.1. moet de toetsing voldoen aan:

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc} N_{c;u;d}} \leq 1$$

De capaciteit van de druknormaalkracht is: $N_{c;u;d} = A \times f_{y;d} = 1230 \times 195 = 239,9 \text{ kN}$

De waarde van $\omega_{y;buc}$ wordt bepaald volgens NEN 6770, art. 12.1.1.4 met tabel 24.

Voor hoekstalen geldt altijd instabiliteitskromme c.

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{y;buc} N_{c;u;d}} = \frac{11,226}{0,48 \times 239,9} = 0,097 \leq 1 \quad \text{voldoet}$$

Toetsing om de v-as

$$\frac{N_{c;s;d}}{\omega_{v;buc} N_{c;u;d}} = \frac{11,226}{0,1 \times 239,9} = 0,47 \leq 1 \quad \text{voldoet}$$

6.4 Validatie

Validatie doe ik op een aantal manieren.

Allereerst een doe ik een input validatie. Ik controleer aan de hand van het geometrische model in Ansys of mijn invoel: van de coördinaten wel goed is geweest. Afwijkingen vallen hierbij meteen op. Verder genereer ik uit Ansys een lijst met alle elementen met de daarbij behorende 'real constants' en 'material props' zodat ik kan controleren of alle elementen wel de bijbehorende eigenschappen mee hebben gekregen.

Belastinggeval 1 gebruik ik voornamelijk om het model te kunnen valideren. Ik kan hier door de symmetrische belasting snel zien of beoogde nulstaven ook echt nulstaven zijn. Ik kan zien of knooppunten die zich niet in de y-richting mogen verplaatsen dit ook echt niet doen (bv. punten op de middenlijn van de traverse). De trekspanning van de geleider neem ik in de berekening van belastinggeval 1 niet mee omdat deze een kleine horizontale kracht heeft die zorgt voor een totale belasting die niet symmetrisch is.

Bij elk belastingsgeval is makkelijk te controleren of de reactiekrachten in de poten van de mast gelijk zijn aan de totale uitwendige belastingen (maar tegengesteld van richting). Bij het in bijlage 4 toegevoegde belastinggeval 2 is dit ook te controleren.

6.5 Conclusie

Over het algemeen zijn de trek en drukspanningen vrij laag. Zelfs de maximale spanning zit maar op ongeveer 40% van de maximaal toelaatbare spanning.

De globale knik voldoet aan de toetsingsregels uit NEN 6770. Ik weet alleen niet of de globale knik ook aan de norm voldoet.

Literatuuroverzicht

Geraadpleegde bronnen:

Mechanica voor technici Statica

auteur: Russel C. Hibbeler

Sterkteleer voor technici

auteur: Russel C. Hibbeler

Overspannend staal Construeren A en B

auteur: Staalbouwkundig genootschap

NEN-EN 50341-1

auteur: Nederlands Normalisatie-instituut

NEN-EN 50341-2

NEN-EN 50341-3

NEN 6770

auteur: Nederlands Normalisatie-instituut

NEN 6771

auteur: Nederlands Normalisatie-instituut

Ansys handleiding versie 5.3

auteurs: H.J.M. Geijselaars,

Universiteit Twente

A.H. van den Boogaard

Bijlagen

Bijlage 1	Gegevens van de elementen LINK8 en BEAM4
Bijlage 2	Overzicht knooppunten
Bijlage 3	Overzicht elementen
Bijlage 4	Output uit Ansys van belastinggeval 2
Bijlage 5	Output uit Ansys van belastinggeval 3

Bijlage I Gegevens van de elementen LINK8 en BEAM4

11-11-2018



LINK8

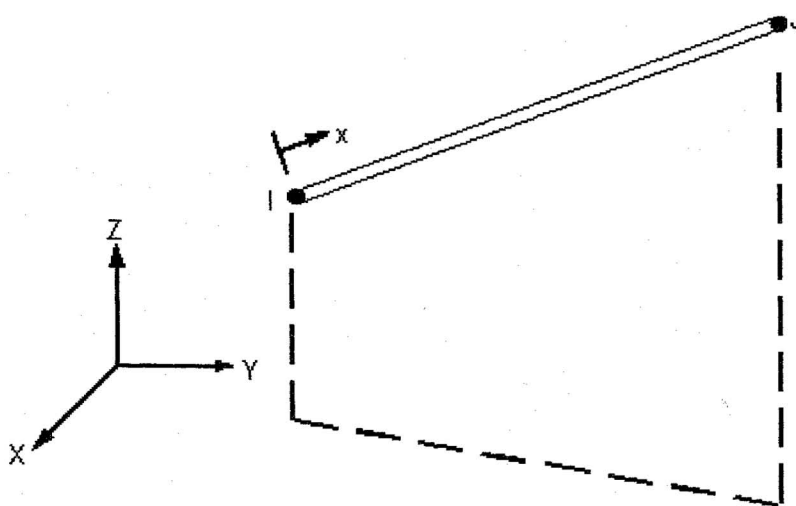
LINK8 — 3-D Spar

MP ME ST PR PP ED

Element Description

LINK8 is a spar which may be used in a variety of engineering applications. This element can be used to model trusses, sagging cables, links, springs, etc. The three-dimensional spar element is a uniaxial tension-compression element with three degrees of freedom at each node: translations in the nodal x, y, and z directions. As in a pin-jointed structure, no bending of the element is considered. Plasticity, creep, swelling, stress stiffening, and large deflection capabilities are included. See Section 14.8 in the ANSYS *Theory Reference* for more details about this element. See LINK10 for a tension-only/compression-only element.

Figure 1. LINK8 3-D Spar



Input Data

The geometry, node locations, and the coordinate system for this element are shown in . The element is defined by two nodes, the cross-sectional area, an initial strain, and the material properties. The element x-axis is oriented along the length of the element from node I toward node J. Properties not input default as described in *Linear Material Properties*. The initial strain in the element (ISTRN) is given by δ/L , where δ is the difference between the element length, L, (as defined by the I and J node locations) and the zero strain length.

Element loads are described in *Node and Element Loads*. Temperatures and fluences may be input as element body loads at the nodes. The node I temperature T(I) defaults to TUNIF. The node J temperature T(J) defaults to T(I). Similar defaults occurs for fluence except that zero is used instead of TUNIF.

A summary of the element input is given in *Input Summary*. A general description of element input is given in *Element Input*.

LINK8 Input Summary

Element Name	LINK8
Nodes	I, J
Degrees of Freedom	UX, UY, UZ
Real Constants	AREA, ISTRN
Material Properties	EX, ALPX, DENS, DAMP
Surface Loads	None
Body loads	Temperatures - T (I), T (J) Fluences - FL (I), FL (J)
Special Features	Plasticity, Creep, Swelling, Stress stiffening, Large deflection, Birth and death

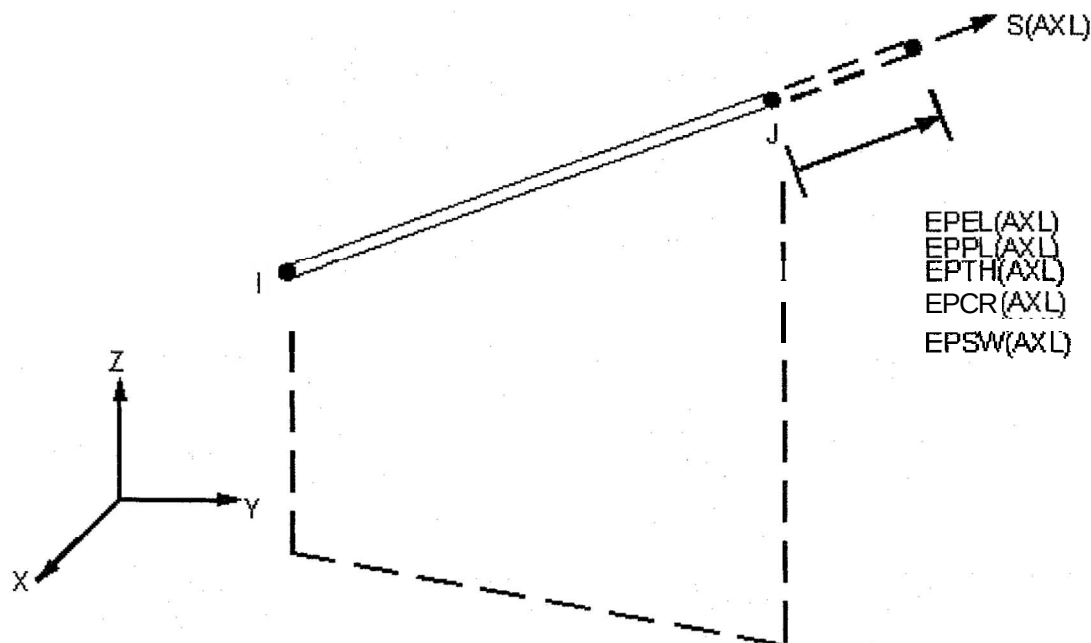
Output Data

The **solution** output associated with the element is in **two** forms:

- m nodal displacements included in the overall nodal solution
- m additional element output as shown in *LINK8 Element Output Definitions*.

Several items are illustrated in *3-D Spar Output*. A general description of solution output is given in *Solution Output*. See the *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* for ways to view results.

Figure 2. LINK8 3-D Spar Output



The Element Output Definitions table uses the following notation:

A colon (:) in the Name column indicates the item can be accessed by the Component Name method [ETABLE, ESOL]. The O column indicates the availability of the items in the file *Jobname.OUT*. The R column indicates the availability of the items in the results file.

In either the O or R columns, Y indicates that the item is *always* available, a number refers to a table footnote that describes when the item is *conditionally* available, and a – indicates that the item is *not* available.

Table 1. LINK8 Element Output Definitions

Name	Definition	O	R
------	------------	---	---

EL	Element Number	Y	Y
NODES	Nodes - I, J	Y	Y
MAT	Material number	Y	Y
VOLU:	Volume	—	Y
XC, YC, ZC	Location where results are reported	Y	2
TEMP	Temperatures T(I), T(J)	Y	Y
FLUEN	Fluences FL(I), FL(J)	Y	Y
MFORX	Member force in the element coordinate system	Y	Y
SAXL	Axial stress	Y	Y
EPELAXL	Axial elastic strain	Y	Y
EPHAXL	Axial thermal strain	Y	Y
EPINAXL	Axial initial strain	Y	Y
SEPL	Equivalent stress from stress-strain curve	1	1
SRAT	Ratio of trial stress to stress on yield surface	1	1
EPEQ	Equivalent plastic strain	1	1
HPRES	Hydrostatic pressure	1	1
EPPLAXL	Axial plastic strain	1	1
EPCRAXL	Axial creep strain	1	1
EPSWAXL	Axial swelling strain	1	1

1. Nonlinear solution, only if element has a nonlinear material.

2. Available only at centroid as a *GET item.

LINK8 Item and Sequence Numbers lists output available through the **ETABLE** command using the **Sequence Number** method. See *The General Postprocessor (POST1)* in the *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* and *The "Item and Sequence Number" Table* of this manual for more information. The following notation is used in *LINK8 Item and Sequence Numbers*:

Name output quantity as defined in the *LINK8 Element Output Definitions*

Item predetermined item label for **ETABLE** command

E sequence number for single-valued or constant element data

I,J sequence number for data at nodes I and J

Table 2. LINK8 Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

Name	Item	E	I	J
SAXL	LS	1	—	—
EPELAXL	LEPEL	1	—	—
EPHAXL	LEPTH	1	—	—
EPSWAXL	LEPTH	2	—	—
EPINAXL	LEPTM	3	—	—
EPPLAXL	LEPPL	1	—	—
EPCRAXL	LEPCR	1	—	—
SEPL	NLIN	1	—	—
SRAT	NLIN	2	—	—
HPRES	NLIN	3	—	—
EPEQ	NLIN	4	—	—
MFORX	SMISC	1	—	—

FLUEN	NMISC	—	1	2
TEMP	LBFE	—	1	2

Assumptions and Restrictions

The spar element assumes a straight bar, axially loaded at its ends, and of uniform properties from end to end. The length of the spar must be greater than zero so nodes I and J must not be coincident. The area must be greater than zero. The temperature is **assumed** to **vary linearly** along the length of the spar.

This displacement function implies a uniform stress in the spar. The initial strain is also used in calculating the stress **stiffness** matrix, if any, for the first cumulative iteration.

Product Restrictions

When used in the product(s) listed below, the stated product-specific restrictions apply to this element in addition to the general assumptions and restrictions given in the previous section.

ANSYS/Professional.

- The DAMP material property is not allowed.
- Fluence body loads are not applicable.
- The only special features **allowed** are stress stiffening and large deflections.





BEAM4

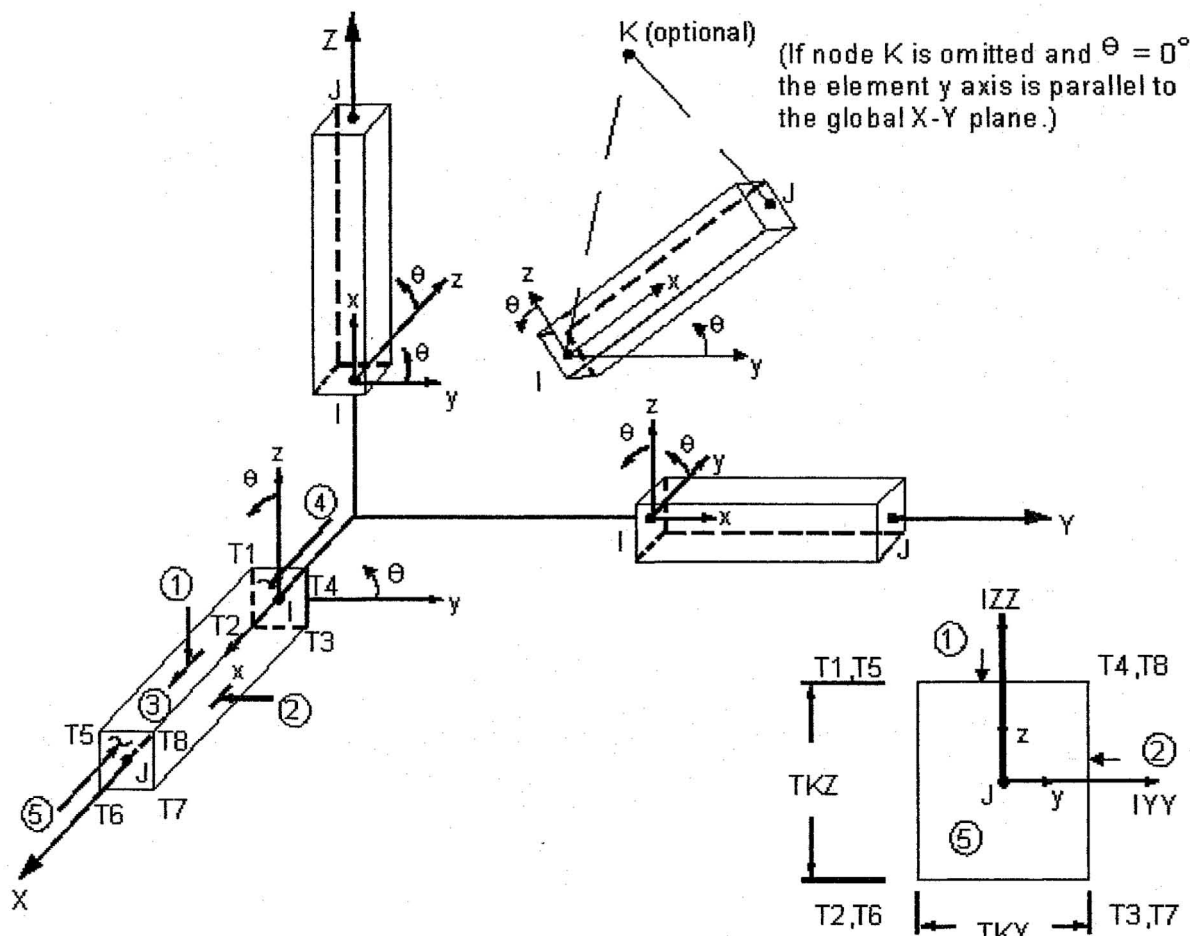
BEAM4 — 3-D Elastic Beam

MP ME ST PR PP ED

Element Description

BEAM4 is a uniaxial element with tension, compression, **torsion**, and **bending** capabilities. The element has six **degrees of freedom** at **each** node: translations in the nodal **x**, **y**, and **z** directions and rotations about the nodal **x**, **y**, and **z** axes. Stress stiffening and large deflection capabilities are included. A consistent tangent stiffness matrix option is available for use in large deflection (finite rotation) analyses. See Section 14.4 of the *ANSYS Theory Reference* for more details about this element. A tapered unsymmetrical elastic beam is described in [BEAM44](#) and a three-dimensional plastic beam in [BEAM24](#).

Figure i. BEAM4 3-D Elastic Beam



Input Data

The geometry, node locations, and coordinate systems for this element are shown in [BEAM4](#). The element is defined by two or three nodes, the cross-sectional area, two area moments of inertia (**IZZ** and **IYY**), two

thicknesses (TKY and TKZ), an angle of orientation (θ) about the element x-axis, the torsional moment of inertia (IXX), and the material properties. Properties not input default as **described in *Linear Material Properties***. If IXX is not **specified** or is equal to 0.0, it is assumed equal to the **polar moment of inertia (IYY+IZZ)**. IXX should be positive and is usually **less** than the **polar moment of inertia**. The element torsional stiffness decreases with decreasing values of IXX. An added mass per unit length may be input with the ADDMAS value.

The element x-axis is oriented from node I toward node J. For the two-node option, the default ($\theta = 0^\circ$) orientation of the element y-axis is automatically calculated to be parallel to the global X-Y plane. Several orientations are shown in *BEAM4*. For the case where the element is parallel to the global Z axis (or within a 0.01 percent slope of it), the element y axis is oriented parallel to the global Y axis (as shown). For user control of the element orientation about the element x-axis, use the θ angle (THETA) or the third node option. If both are defined, the third node option takes precedence. The third node (K), if used, defines a plane (with I and J) containing the element x and z axes (as shown). If this element is used in a large deflection analysis, it should be noted that the location of the third node (K), or the angle (THETA), is used only to **initially** orient the element. (For information about orientation nodes and beam meshing, see *Meshing Your Solid Model* of the *ANSYS Modeling and Meshing Guide*.)

The initial strain in the element (ISTRN) is given by δ/L , where δ is the **difference between** the element length, L, (as defined by the I and J node locations) and the zero strain length. The shear deflection constants (SHEARZ and SHEARY) are used only if shear deflection is to be included. A zero value of SHEAR_ may be used to **neglect** shear deflection in a **particular** direction. See *Shear Deflection* for details.

KEYOPT(2) is used to activate the consistent tangent stiffness matrix (i.e., a matrix composed of the main tangent stiffness matrix plus the consistent stress stiffness matrix) in large deflection analyses **[NLGEOM,ON]**. You can often obtain more rapid convergence in a **geometrically nonlinear** analysis, such as a nonlinear buckling or postbuckling analysis, by activating this option. However, you should not use this option if you are using the element to simulate a **rigid link** or a group of **coupled** nodes. The **resulting** abrupt changes in **stiffness** within the **structure** make the consistent tangent stiffness matrix **unsuitable** for such applications.

KEYOPT(7) is used to compute an **unsymmetric** gyroscopic **damping matrix** (often used for rotordynamic analyses). The rotational **frequency** is input with the SPIN **real** constant (**radians/time**, positive in the positive element x direction). The element must be **symmetric** with this option (e.g., IYY=IZZ and SHEARY=SHEARZ).

Element loads are described in *Node and Element Loads*. Pressures may be input as **surface** loads on the element **faces** as shown by the circled numbers on *BEAM4*. Positive **normal** pressures act into the element. Lateral pressures are input as a force per unit length. End "pressures" are input as a force. KEYOPT(10) allows **tapered lateral** pressures to be **offset** from the nodes. Temperatures may be input as element body loads at the eight "corner" locations shown in *BEAM4*. The first corner temperature T1 defaults to TUNIF. If all other temperatures are **unspecified**, they default to T1. If only T1 and T2 are input, T3 defaults to T2 and T4 defaults to T1. If only T1 and T4 are input, T2 defaults to T1 and T3 defaults to T4. In both cases, T5 through T8 default to T1 through T4. For any other input pattern, unspecified temperatures default to TUNIF.

KEYOPT(9), used to request output at intermediate locations, is not valid if

- stress stiffening is turned on **[SSTIF,ON]**
- more than one component of angular velocity is applied **[OMEGA]**
- any angular velocities or accelerations are applied with the **CGOMGA, DOMEGA, or DCGOMG** commands.

A summary of the element input is given in *Input Summary*. A general description of element input is given in *Element Input*.

BEAM4 Input Summary

Element Name	BEAM4
Modes	I, J, K (K orientation node is optional)

Degrees of Freedom	UX, UY, UZ, ROTX, R ON, ROTZ
Real Constants	AREA, IZZ, IVW, TKZ, TKY, THETA, ISTRN, IXX, SHEARZ, SHEARY, SPIN, ADDMAS
Material Properties	EX, ALPX, DENS, GXY, DAMP
Surface Loads	Pressures - face 1 (I-J) (-Z normal direction), face 2 (I-J) (-Y normal direction), face 3 (I-J) (+X tangential direction), face 4 (I) (+X axial direction), face 5 (J) (-X axial direction) (use negative value for opposite loading)
Body Loads	Temperatures - T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8
Special Features	Stress stiffening, Large deflection, Birth and death
KEYOPT(2)	0 - Use only the main tangent stiffness matrix when NLGEOM is ON. (Stress stiffening effects used in linear buckling or other linear prestressed analyses must be activated separately with PSTRES,ON .) 1 - Use the consistent tangent stiffness matrix (i.e., a matrix composed of the main tangent stiffness matrix plus the consistent stress stiffness matrix) when NLGEOM is ON. (SSTIF,ON will be ignored for this element when KEYOPT(2) = 1 is activated.) Note that if SOLCONTROL is ON and NLGEOM is ON, KEYOPT(2) is automatically set to 1; i.e, the consistent tangent will be used.
KEYOPT(6)	0 - No printout of member forces or moments 1 - Print out member forces and moments in the element coordinate system
KEYOPT(7)	0 - No gyroscopic damping matrix 1 - Compute gyroscopic damping matrix. Real constant SPIN must be greater than zero. IYY must equal IZZ .
KEYOPT(9)	Used to control additional output between ends I and J N - Output at N intermediate locations (N= 0, 1, 3, 5, 7, 9)
KEYOPT(10)	Used only for tapered surface loads with the SEBEAM command. 0 - Offset for load placement is in terms of length units 1 - Offset is in terms of a length ratio (0.0 to 1.0)



Note—**SHEARZ** goes with **IZZ**, if **SHEARZ** = 0, there is no shear deflection in the element Y direction **SHEARY** goes with **IYY**, if **SHEARY** = 0, there is no shear deflection in the element Z direction

Output Data

The solution output associated with the element is in two forms:

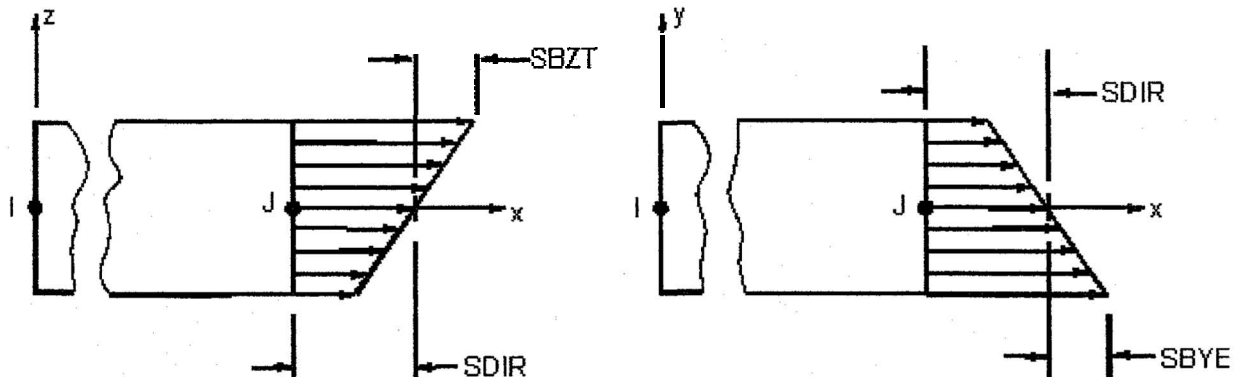
- nodal displacements included in the overall nodal solution
- additional element output as shown in *3-D BEAM4 Element Output Definitions*.

Several items are illustrated in *Stress Output*.

The maximum stress is computed as the direct stress plus the absolute values of both bending stresses. The minimum stress is the direct stress minus the absolute value of both bending stresses. A general description of solution output is given in *Solution Output*. See the *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* for ways to

view results.

Figure 2.3-D **BEAM4** Stress Output



The Element Output Definitions table uses the following notation:

A colon (:) in the Name column indicates the item can be accessed by the Component Name method [ETABLE, ESOL]. The O column indicates the availability of the items in the file Jobname.OUT. The R column indicates the availability of the items in the results file.

In either the O or R columns, Y indicates that the item is *always* available, a number refers to a table footnote that describes when the item is *conditionally* available, and a -- indicates that the item is not available.

Table 1.3-D BEAM4 Element Output Definitions

Name	Definition	O	R
EL	Element number	Y	Y
NODES	Element node number (I and J)	Y	Y
MAT	Material number for the element	Y	Y
VOLU:	Element volume	--	Y
XC, YC, ZC	Location where results are reported	Y	3
TEMP	Temperatures at integration points T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8	Y	Y
PRES	Pressure P1 at nodes I,J; OFFST1 at I,J; P2 at I,J; OFFST2 at I,J; P3 at I,J; OFFST3 at I,J; P4 at I; P5 at J	Y	Y
SBYT	Axial direct stress	1	1
SBYB	Bending stress on the element +Y side of the beam	1	1
SBZT	Bending stress on the element -Y side of the beam	1	1
SBZB	Bending stress on the element +Z side of the beam	1	1
SMBZ	Bending stress on the element -Z side of the beam	1	1
SMAX	Maximum stress (direct stress + bending stress)	1	1
SMIN	Minimum stress (direct stress - bending stress)	1	1
EPELDIR	Axial elastic strain at the end	1	1
EPELBYT	Bending elastic strain on the element *Y side of the beam	1	1
EPELBYB	Bending elastic strain on the element -Y side of the beam	1	1
EPELBZT	Bending elastic strain on the element +Z side of the beam	1	1
EPELBZB	Bending elastic strain on the element -Z side of the beam	1	1

EPELBZB	beam	<u>1</u>	<u>1</u>
EPTHDIR	Axial thermal strain at Me end	<u>1</u>	<u>1</u>
EPHBYT	Bending thermal strain on the element +Y side of the beam	<u>1</u>	<u>1</u>
	Bending thermal strain on the element -Y side of the beam	<u>1</u>	<u>1</u>
EPHBTZ	Bending thermal strain on the element +Z side of the beam	<u>1</u>	<u>1</u>
EPHBTB	Bending thermal strain on the element -Z side of the beam	<u>1</u>	<u>1</u>
EPINAXL	Initial axial strain in the element	<u>1</u>	<u>1</u>
	Member forces in the element coordinate system X, Y, Z directions	<u>2</u>	<u>Y</u>
MMOM(X, Y, Z)	Member moments in the element coordinate system X, Y, Z directions	<u>2</u>	<u>Y</u>

1. The item repeats for end I, intermediate locations (see KEYOPT(9)), and end J.
2. If KEYOPT(6)=1.
3. Available only at centroid as a *GET item.

The following tables list output available through the **ETABLE** command using the Sequence Number method. See *The General Postprocessor (POST1)* of the *ANSYS Basic Analysis Procedures Guide* and *The "Item and Sequence Number" Table* of this manual for more information. The following notation is used in *BEAM4 (KEYOPT(9)=0) Item and Sequence Numbers* through *BEAM4 (KEYOPT(9)=9) Item and Sequence Numbers* 4.4-6e:

Name output quantity as defined in the *3-D BEAM4 Element Output Definitions*
Item predetermined Item label for **ETABLE** command
E sequence number for single-valued or constant element data
I,J sequence number for data at nodes I and J
ILN sequence number for data at Intermediate Location N

Table 2. BEAM4 (KEYOPT(9)=0) Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

KEYOPT(9)=0				
Name	Item	E	I	J
SDIR	LS	—	1	6
SBYT	LS	—	2	7
SBYB	LS	—	3	8
SBZT	LS	—	4	9
SBZB	LS	—	5	10
EPELDIR	LEPEL	—	2	7
EPELBM	LEPEL			
EPELBYB	LEPEL	—	3	8
EPELBZT	LEPEL	—	4	9
EPELBZB	LEPEL	—	5	10
SMAX	NMISC	—	2	4
SMIN	NMISC			
EPHDIR	LEPTH	—	1	6
EPHBM	LEPTH	—	2	7

EPHBYB	LEPth	—	3	8
EPHBZT	LEPth	—	4	9
EPHBZB	LEPth	—	5	10
EPINAXL	LEPth	11	—	—
MFORX	SMISC	—	1	7
MFORY	SMISC	—	2	8
MFORZ	SMISC	—	3	9
MMOMX	SMISC	—	4	10
MMOMY	SMISC	—	5	11
MMOMZ	SMISC	—	6	12
P1	SMISC	—	13	14
OFFST1	SMISC	—	15	16
P2	SMISC	—	17	18
OFFST2	SMISC	—	19	20
P3	SMISC	—	21	22
OFFST3	SMISC	—	23	24
P4	SMISC	—	25	—
P5	SMISC	—	—	26

		Pseudo Node							
		1	2	3	4	5	6	7	8
TEMP	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

Table 3. BEAM4 (KEYOPT(9)=1) Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

KEYOPT(9)=1					
Name	Item	E	I	IL1	J
SDIR	LS	—	1	6	11
SBYT	LS	—	2	7	12
SBYB	LS	—	3	8	13
SBZT	LS	—	4	9	14
SBZB	LS	—	5	10	15
EPELDIR	LEPEL	—	1	6	11
EPELBYT	LEPEL	—	2	7	12
EPELBYB	LEPEL	—	3	8	13
EPELBZT	LEPEL	—	4	9	14
EPELBZB	LEPEL	—	5	10	15
SMAX	NMISC	—	1	3	5
SMIN	NMISC	—	2	4	6
EPHDIR	LEPth	—	1	6	11
EPHBYT	LEPth	—	2	7	12
EPHBYB	LEPth	—	3	8	13
EPHBZT	LEPth	—	4	9	14
EPHBZB	LEPth	—	5	10	15
EPINAXL	LEPth	16	—	—	—
MFORX	SMISC	—	1	7	13

MFORY	SMISC	–	2	8	14
MFORZ	SMISC	–	3	9	15
MMOMX	SMISC	–	4	10	16
MMOMY	SMISC	–	5	11	17
MMOMZ	SMISC	–	6	12	18
P1	SMISC	–	19	–	20
OFFST1	SMISC	–	21	–	22
P2	SMISC	–	23	–	24
OFFST2	SMISC	–	25	–	26
P3	SMISC	–	27	–	28
OFFST3	SMISC	–	29	–	30
P4	SMISC	–	31	–	–
P5	SMISC	–	–	–	32

		Pseudo Node							
		1	2	3	4	5	6	7	8
TEMP	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

Table 4. BEAM4 (KEYOPT(9)=3) Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

KEYOPT(9)=3							
Name	Item	E	I	IL1	IL2	IL3	J
SDIR	LS	–	1	6	11	16	21
SBYT	LS	–	2	7	12	17	22
SBYB	LS	–	3	8	13	18	23
SBZT	LS	–	4	9	14	19	24
SBZB	LS	–	5	10	15	20	25
EPELDIR	LEPEL	–	1	6	11	16	21
EPELBYT	LEPEL	–	2	7	12	17	22
EPELBYB	LEPEL	–	3	8	13	18	23
EPELBZT	LEPEL	–	4	9	14	19	24
EPELBZB	LEPEL	–	5	10	15	20	25
SMAX	NMISC	–	1	3	5	7	9
SMIN	NMISC	–	2	4	6	8	10
EPTHDIR	LEPTH	–	1	6	11	16	21
EPTHBYT	LEPTH	–	2	7	12	17	22
EPTHBYB	LEPTH	–	3	8	13	18	23
EPTHBZT	LEPTH	–	4	9	14	19	24
EPTHBZB	LEPTH	–	5	10	15	20	25
EPINAXL	LEPTH	26	–	–	–	–	–
MFORX	SMISC	–	1	7	13	19	25
MFORY	SMISC	–	2	8	14	20	26
MFORZ	SMISC	–	3	9	15	21	27
MMOMX	SMISC	–	4	10	16	22	28
MMOMY	SMISC	–	5	11	17	23	29
MMOMZ	SMISC	–	6	12	18	24	30

P1	SMISC	—	31	—	—	—	32
OFFST1	SMISC	—	33	—	—	—	34
P2	SMISC	—	35	—	—	—	36
OFFST2	SMISC	—	37	—	—	—	38
P3	SMISC	—	39	—	—	—	40
OFFST3	SMISC	—	41	—	—	—	42
P4	SMISC	1-114311-11—n					
P5	SMISC	—	—	—	—	—	44

		Pseudo Node							
		1	2	3	4	5	6	7	8
TEMP	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

Table 5. BEAM4 (KEYOPT(9)=5) Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

KEYOPT(9)=5									
Name	Item	E	I	IL1	IL2	IL3	IL4	IL5	J
SDIR	LS	—	1	6	11	16	21	26	31
SBYT	LS	—	2	7	12	17	22	27	32
SBYB	LS	—	3	8	13	18	23	28	33
SBZT	LS	—	4	9	14	19	24	29	34
SBZB	LS	—	5	10	15	20	25	30	35
EPDIR	LEPEL	—	1	6	11	16	21	26	31
EPELBYT	LEPEL	—	2	7	12	17	22	27	32
EPELBYB	LEPEL	—	3	8	13	18	23	28	33
EPELBZT	LEPEL	—	4	9	14	19	24	29	34
EPELBZB	LEPEL	—	5	10	15	20	25	30	35
SMAX	NMISC	—	1	3	5	7	9	11	13
SMIN	NMISC	—	2	4	6	8	10	12	14
EPDIR	LEPTH	—	1	6	11	16	21	26	31
EPTHBYT	LEPTH	—	2	7	12	17	22	27	32
EPTHBYB	LEPTH	—	3	8	13	18	23	28	33
EPTBZT	LEPTH	—	4	9	14	19	24	29	34
EPTBZB	LEPTH	—	5	10	15	20	25	30	35
EPINAXL	LEPTH	36	—	—	—	—	—	—	—
MFORX	SMISC	—	1	7	13	19	25	31	37
MFORY	SMISC	—	2	8	14	20	26	32	38
MFORZ	SMISC	—	3	9	15	21	27	33	39
MMOMX	SMISC	—	4	10	16	22	28	34	40
MMOMY	SMISC	—	5	11	17	23	29	35	41
MMOMZ	SMISC	—	6	12	18	24	30	36	42
P1	SMISC	—	43	—	—	—	—	—	44
OFFST1	SMISC	—	45	—	—	—	—	—	46
P2	SMISC	—	47	—	—	—	—	—	48
OFFST2	SMISC	—	49	—	—	—	—	—	50
P3	SMISC	—	51	—	—	—	—	—	52

OFFST3	SMISC	—	53	—	—	—	—	—	54
P4	SMISC	—	55	—	—	—	—	—	—
P5	SMISC	—	—	—	—	—	—	—	56

		Pseudo Node							
		1	2	3	4	5	6	7	8
TEMP	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

Table 6. BEAM4 (KEYOPT(9)=7) Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

KEYOPT(9)=7											
Name	Item	E	I	IL1	IL2	IL3	IL4	IL5	IL6	IL7	J
SDIR	LS	—	1	6	11	16	21	26	31	36	41
SBYT	LS	—	2	7	12	17	22	27	32	37	42
SBYB	LS	—	3	8	13	18	23	28	33	38	43
SBZT	LS	—	4	9	14	19	24	29	34	39	44
SBZB	LS	—	5	10	15	20	25	30	35	40	45
EPELDIR	LEPEL	—	1	6	11	16	21	26	31	36	41
EPELBYT	LEPEL	—	2	7	12	17	22	27	32	37	42
EPELBYB	LEPEL	—	3	8	13	18	23	28	33	38	43
EPELBZT	LEPEL	—	4	9	14	19	24	29	34	39	44
EPELBZB	LEPEL	—	5	10	15	20	25	30	35	40	45
SMAX	NMISC	—	1	3	5	7	9	11	13	15	17
SMIN	NMISC	—	2	4	6	8	10	12	14	16	18
EPTHDIR	LEPTH	—	1	6	11	16	21	26	31	36	41
EPTHBYT	LEPTH	—	2	7	12	17	22	27	32	37	42
EPTHBYB	LEPTH	—	3	8	13	18	23	28	33	38	43
EPTHBZT	LEPTH	—	4	9	14	19	24	29	34	39	44
EPTHBZB	LEPTH	—	5	10	15	20	25	30	35	40	45
EPINAXL	LEPTH	46	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MFORX	SMISC	—	1	7	13	19	25	31	37	43	49
MFORY	SMISC	—	2	8	14	20	26	32	38	44	50
MFORZ	SMISC	—	3	9	15	21	27	33	39	45	51
MMOMX	SMISC	—	4	10	16	22	28	34	40	46	52
MMOMY	SMISC	—	5	11	17	23	29	35	41	47	53
MMOMZ	SMISC	—	6	12	18	24	30	36	42	48	54
P1	SMISC	—	55	—	—	—	—	—	—	—	56
OFFST1	SMISC	—	57	—	—	—	—	—	—	—	58
P2	SMISC	—	59	—	—	—	—	—	—	—	60
OFFST2	SMISC	—	61	—	—	—	—	—	—	—	62
P3	SMISC	—	63	—	—	—	—	—	—	—	64
OFFST3	SMISC	—	65	—	—	—	—	—	—	—	66
P4	SMISC	—	67	—	—	—	—	—	—	—	—
P5	SMISC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68

		Pseudo Node							

		1	2	3	4	5	6	7	8
TEMP	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

Table 7. BEAM4 (KEYOPT(9)=9) Item and Sequence Numbers for the ETABLE and ESOL Commands

KEYOPT(9)=9													
Name	Item	E	I	IL1	IL2	IL3	IL4	IL5	IL6	IL7	IL8	IL9	J
SDIR	LS	—	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51
SBYT	LS	—	2	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52
SBYB	LS	—	3	8	13	18	23	28	33	38	43	48	53
SBZT	LS	—	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54
SBZB	LS	—	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
EPELDIR	LEPEL	—	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51
EPELBYT	LEPEL	—	2	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52
EPELBYB	LEPEL	—	3	8	13	18	23	28	33	38	43	48	53
EPELBZT	LEPEL	—	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54
EPELBZB	LEPEL	—	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
SMAX	NMISC	—	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
SMIN	NMISC	—	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
EPTHDIR	LEPTH	—	1	6	11	16	21	26	31	36	41	46	51
EPTHBYT	LEPTH	—	2	7	12	17	22	27	32	37	42	47	52
EPTHBYB	LEPTH	—	3	8	13	18	23	28	33	38	43	48	53
EPTHBZT	LEPTH	—	4	9	14	19	24	29	34	39	44	49	54
EPTHBZB	LEPTH	—	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
EPINAXL	LEPTH	56	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
MFORX	SMISC	—	1	7	13	19	25	31	37	43	49	55	61
MFORY	SMISC	—	2	8	14	20	26	32	38	44	50	56	62
MFORZ	SMISC	—	3	9	15	21	27	33	39	45	51	57	63
MMOMX	SMISC	—	4	10	16	22	28	34	40	46	52	58	64
MMOMY	SMISC	—	5	11	17	23	29	35	41	47	53	59	65
MMOMZ	SMISC	—	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66
P1	SMISC	—	67	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68
OFFST1	SMISC	—	69	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70
P2	SMISC	—	71	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72
OFFST2	SMISC	—	73	—	—	—	—	—	—	—	—	—	74
P3	SMISC	—	75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	76
OFFST3	SMISC	—	77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	78
P4	SMISC	—	79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
P5	SMISC	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80

Pseudo Node									
		1	2	3	4	5	6	7	8
TEMP	LBFE	1	2	3	4	5	6	7	8

Assumptions and Restrictions

The beam must not have a zero length or area. The moments of inertia, however, may be zero if large

deflections are not used. The beam can have any cross-sectional shape for which the moments of inertia can be computed. The stresses, however, will be determined as if the distance between the neutral axis and the extreme fiber is one-half of the corresponding thickness. The element thicknesses are used only in the bending and thermal stress calculations. The applied thermal gradients are assumed to be linear across the thickness in both directions and along the length of the element.

If you use the consistent tangent stiffness matrix (KEYOPT(2)=1), take care to use realistic (i.e., "to scale") element real constants. This precaution is necessary because the consistent stress-stiffening matrix is based on the calculated stresses in the element—if you use artificially large or small cross-sectional properties, the calculated stresses will become inaccurate, and the stress-stiffening matrix will suffer corresponding inaccuracies. (Certain components of the stress-stiffening matrix could even overshoot to infinity.) Similar difficulties could arise if unrealistic real constants are used in a linear prestressed or linear buckling analysis [PSTRES,ON].

Eigenvalues calculated in a gyroscopic modal analysis can be very sensitive to changes in the initial shift value, leading to potential error in either the real or imaginary (or both) parts of the eigenvalues.

Product Restrictions

When used in the product(s) listed below, the stated product-specific restrictions apply to this element in addition to the general assumptions and restrictions given in the previous section.

ANSYS/Professional.

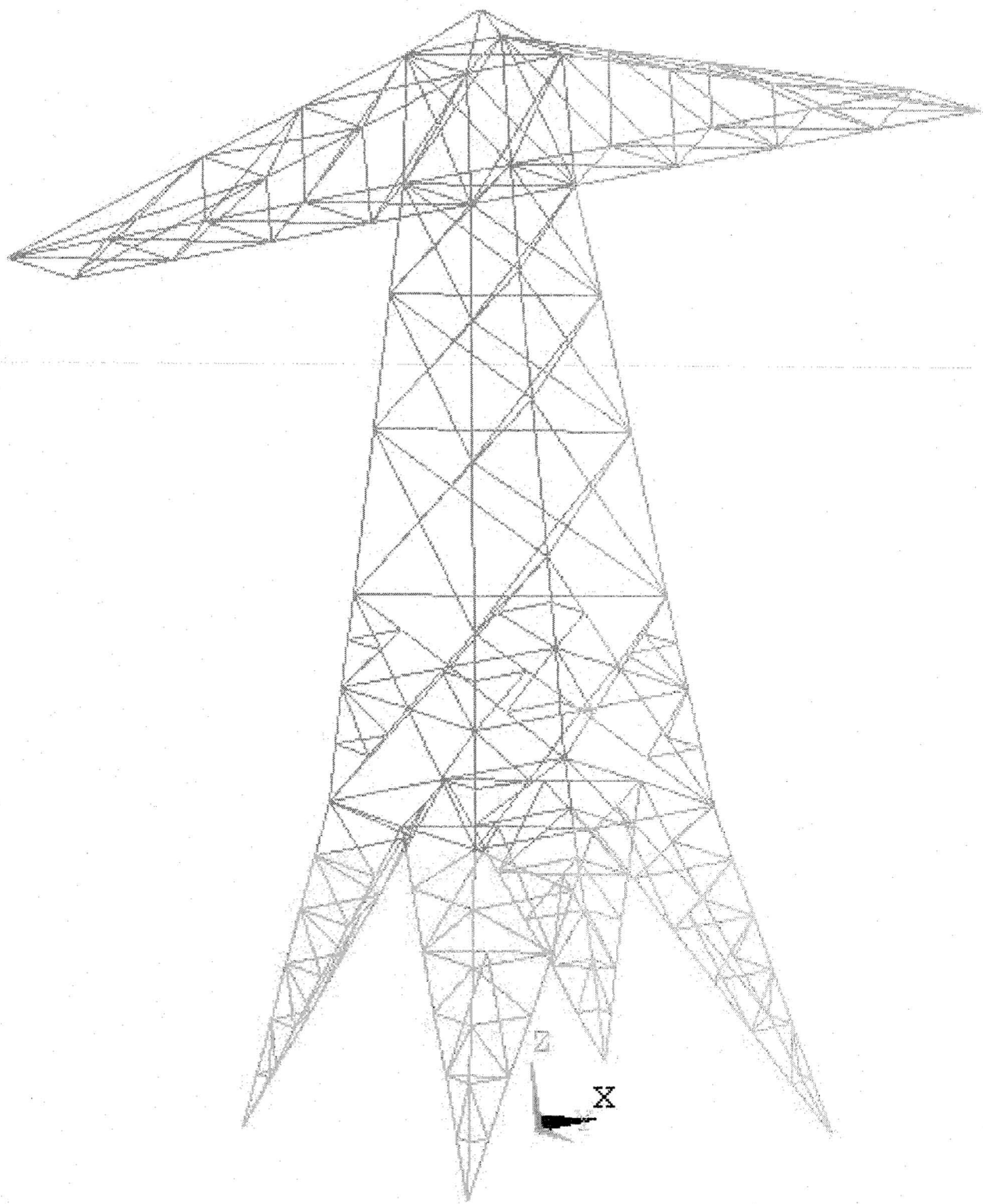
- The SPIN real constant (R11) is not available. Input R11 as a blank
- e The DAMP material property is not allowed.
- e KEYOPT(2) can only be set to 0 (default).
- KEYOPT(7) can only be set to 0 (default).
- The only special features allowed are stress stiffening and large deflections.



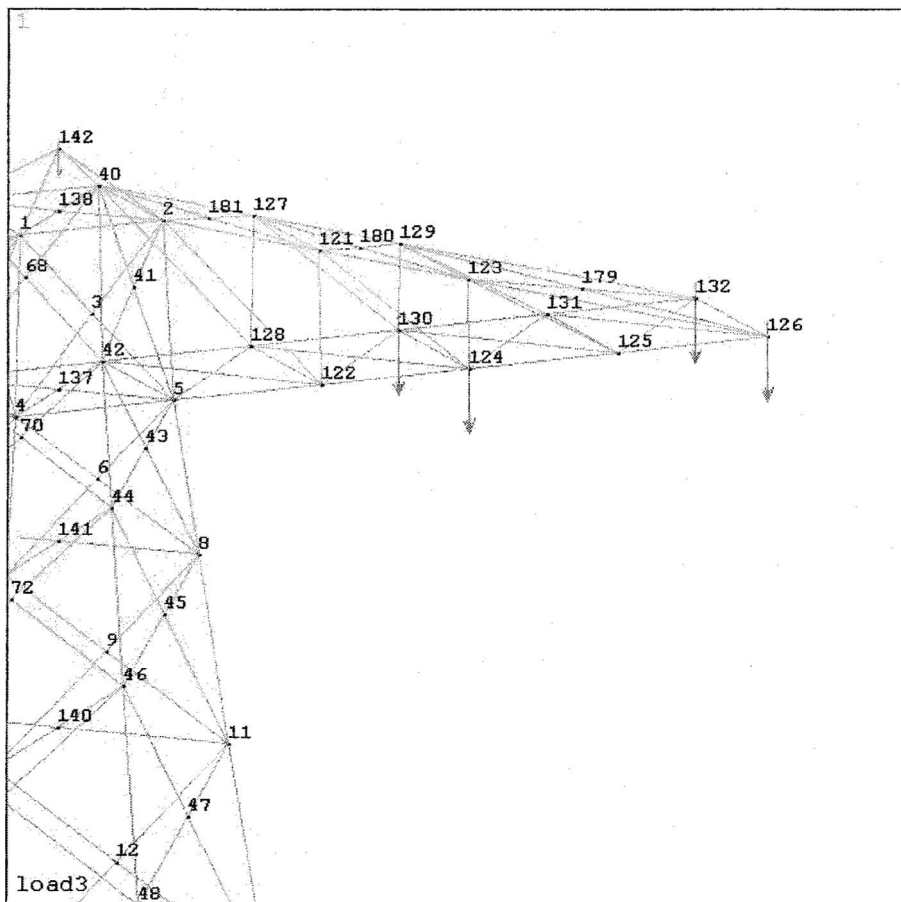
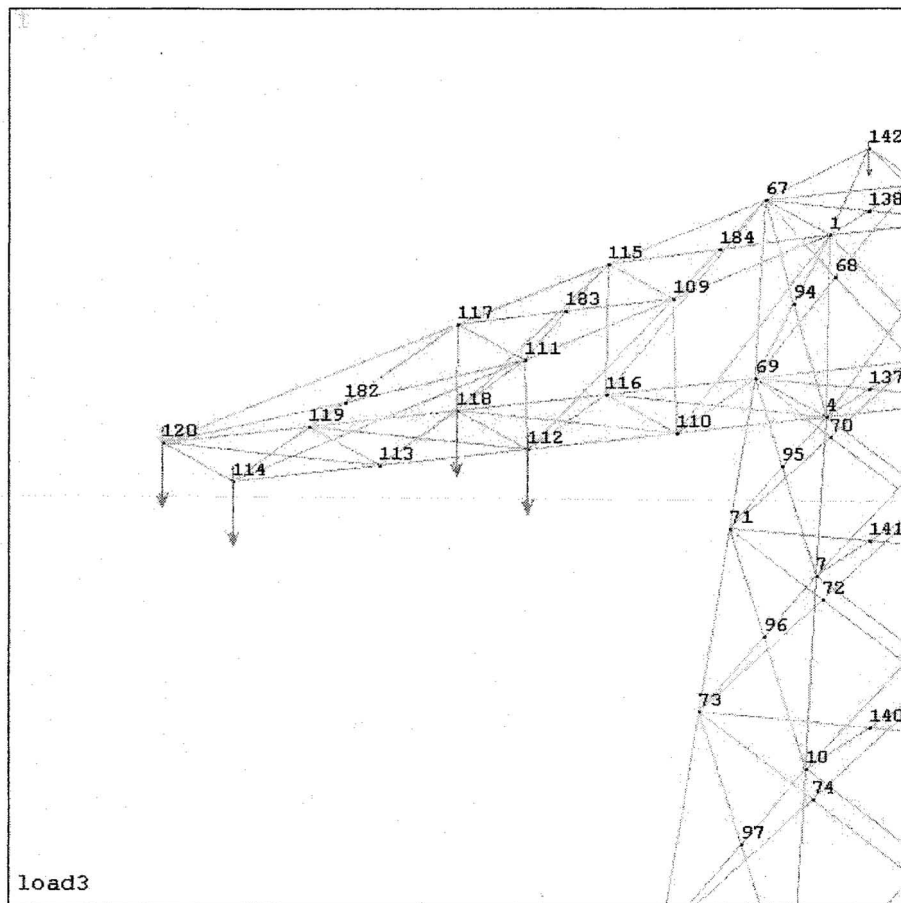
Bijlage 2 Overzicht knooppunten

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100

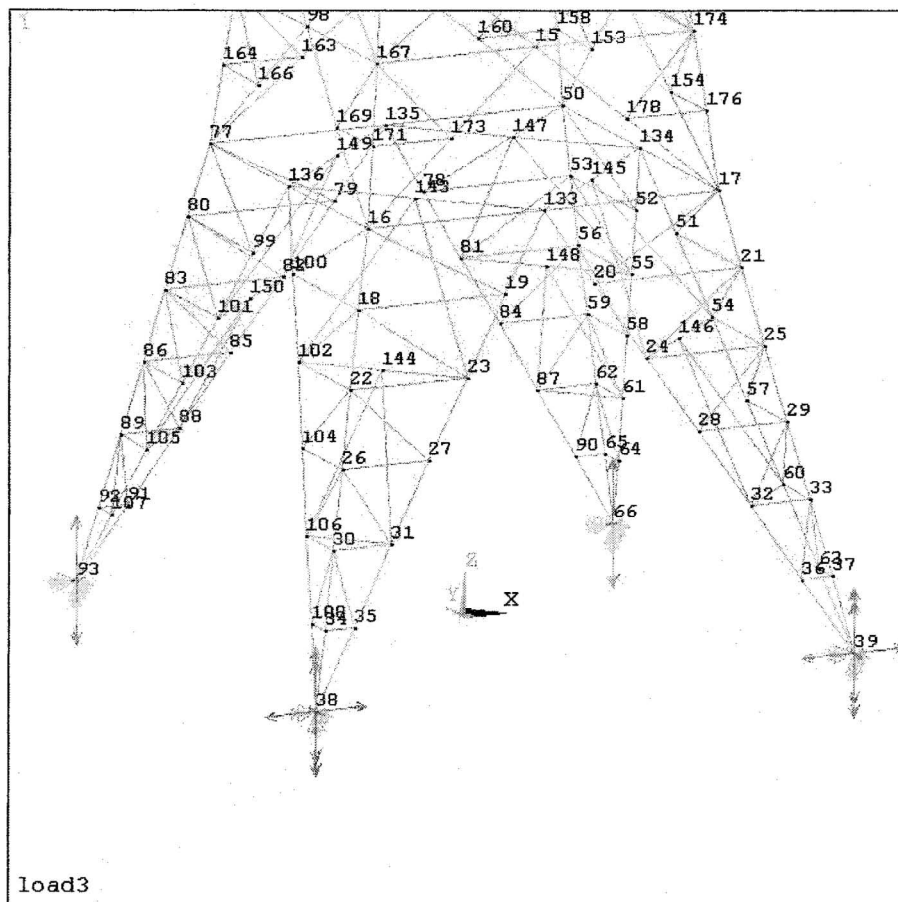
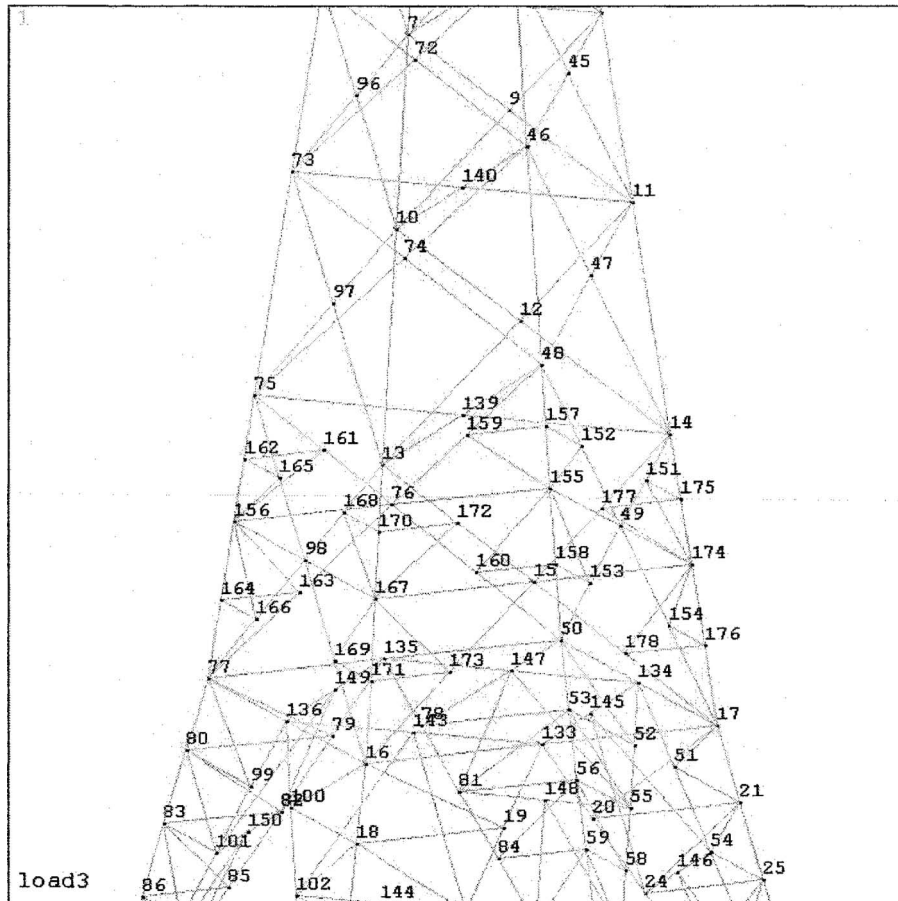
Bijlage 2 Overzicht knooppunten



Bijlage 2 Overzicht knooppunten in detail



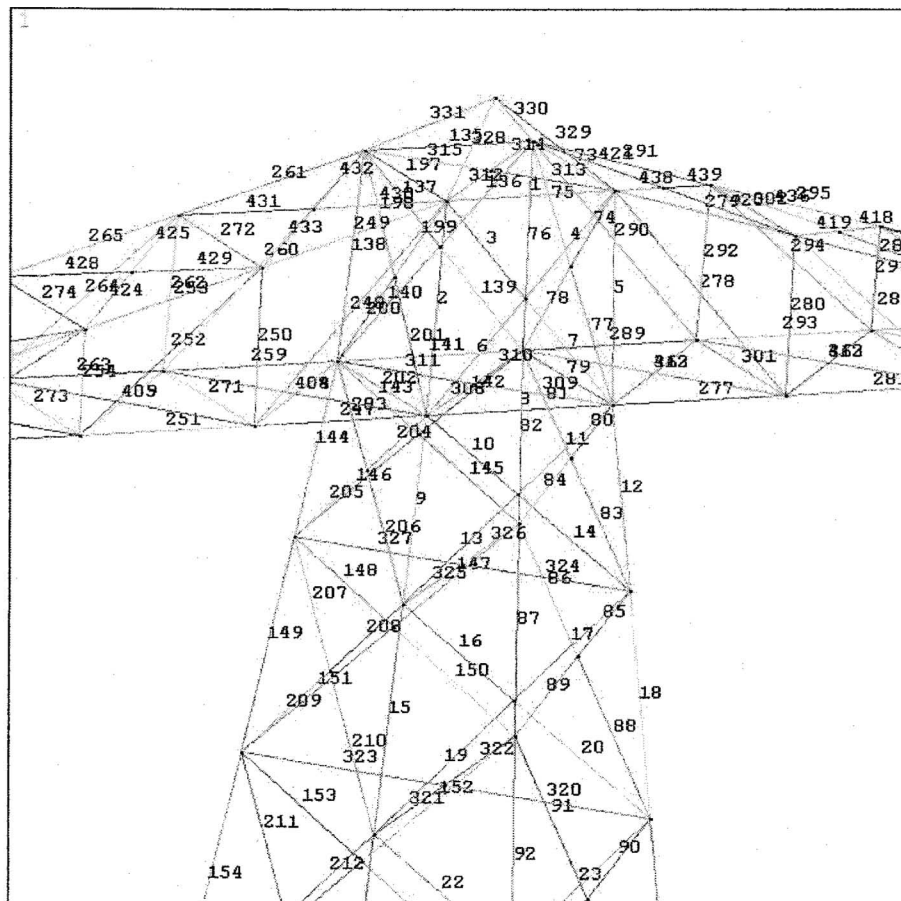
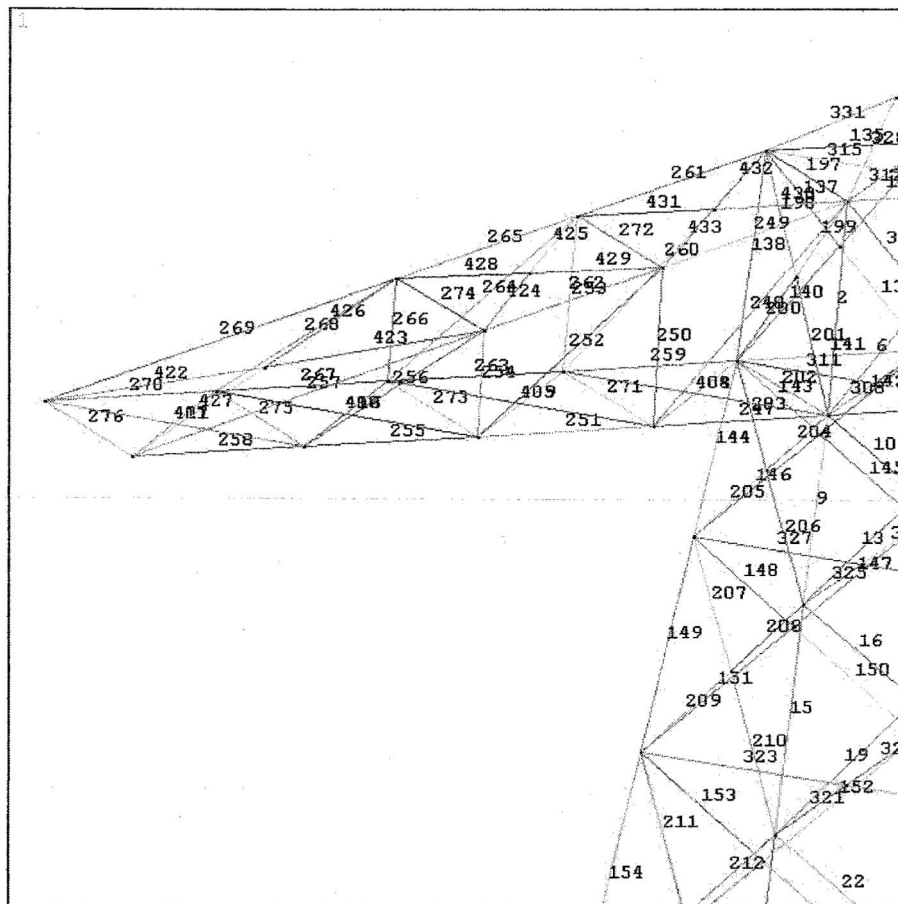
Bijlage 2 Overzicht knooppunten in detail



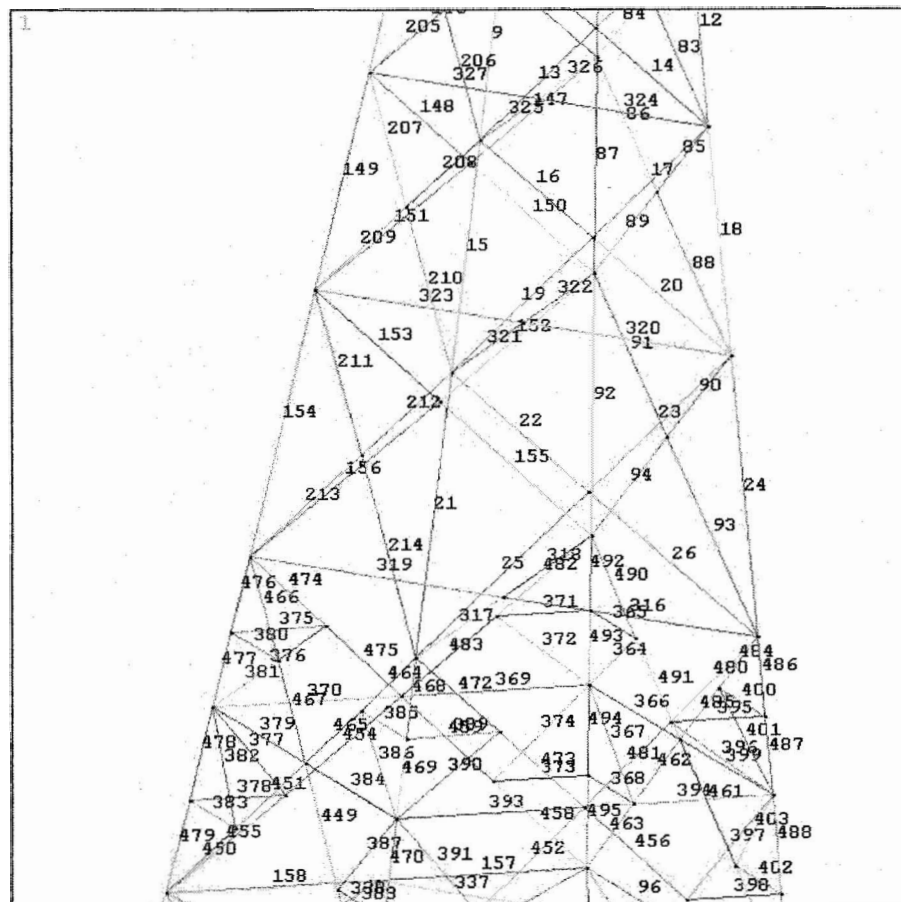
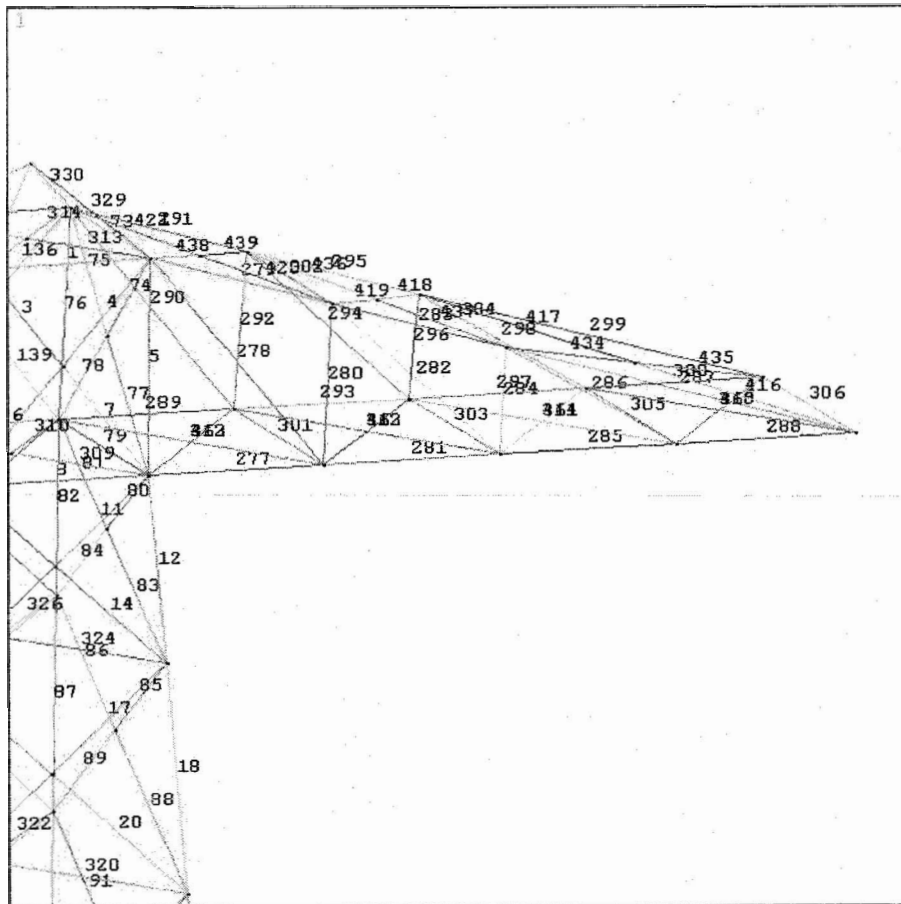
Bijlage 3 Overzicht elementen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029	1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050	1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071	1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092	1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113	1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134	1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155	1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176	1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218	1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239	1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260	1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281	1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302	1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323	1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344	1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365	1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386	1387	1388	1389	1390	1391	1392	1393	1394	1395	1396	1397	1398	1399	1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410	1411	1412	1413	1414	1415	1416	1417	1418	1419	1420	1421	1422	1423	1424	1425	1426	1427	1428	1429	1430	1431	1432	1433	1434	1435	1436	1437	1438	1439	1440	1441	1442	1443	1444	1445	1446	1447	1448	1449	1450	1451	1452	1453	1454	1455	1456	1457	1458	1459	1460	1461	1462	1463	1464	1465	1466	1467	1468	1469	1470	1471	1472	1473	1474	1475	1476	1477	1478	1479	1480	1481	1482	1483	1484	1485	1486	1487	1488	1489	1490	14
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	----

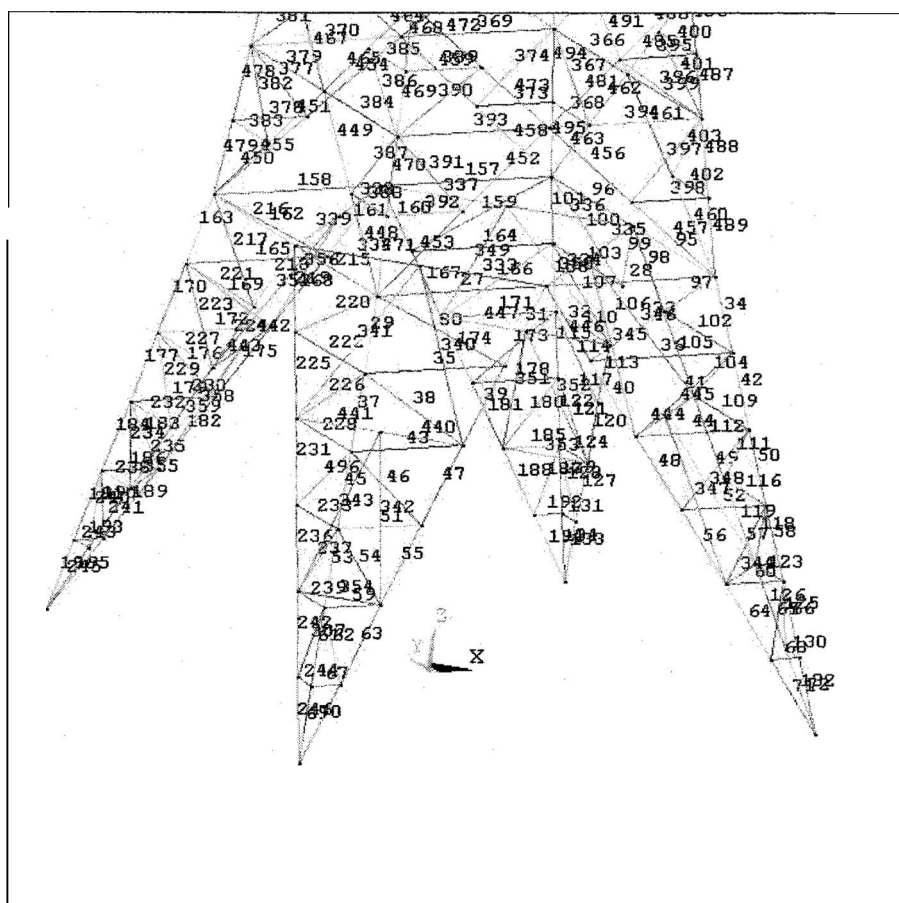
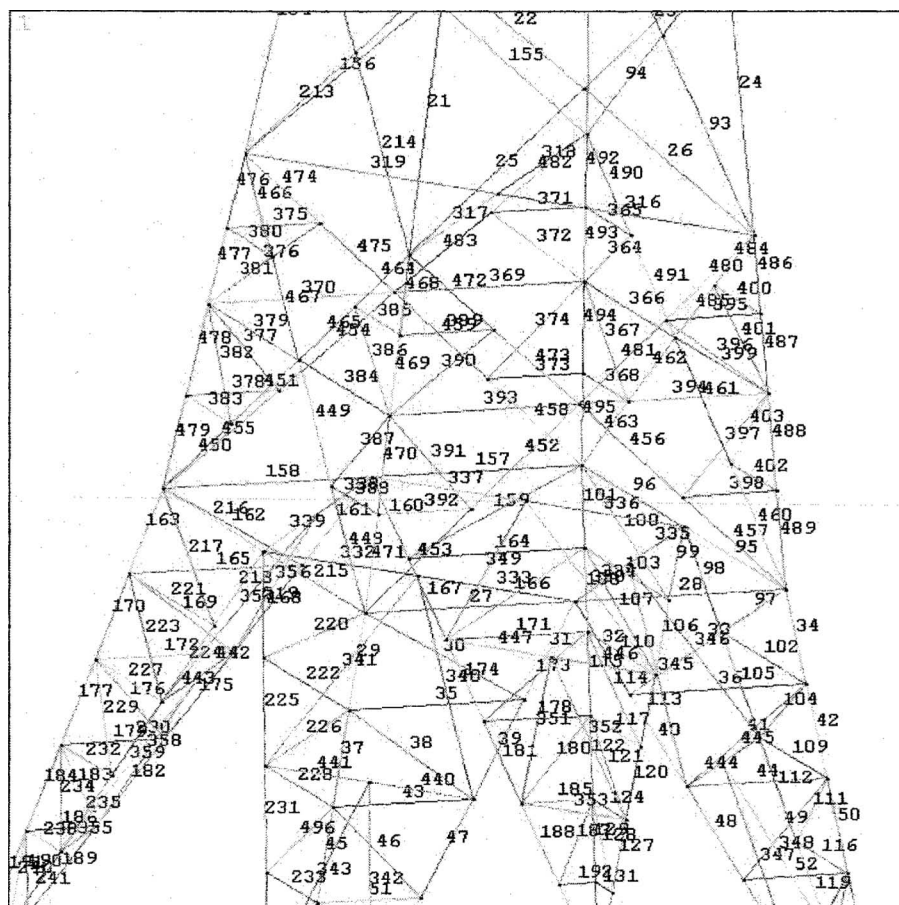
Bijlage 3 Overzicht elementen in detail



Bijlage 3 Overzicht elementen in detail



Bijlage 3 Overzicht elementen in detail



Bijlage 4 Output uit Ansys van belastinggeval 2

Uitkomsten load2

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
1	38483.	0.31287E+08	0.14899E-03
2	-16190.	-0.13163E+08	-0.62680E-04
3	-1772.3	-0.36923E+07	-0.17582E-04
4	1772.3	0.36923E+07	0.17582E-04
5	-18964.	-0.15418E+08	-0.73419E-04
6	1773.3	0.36943E+07	0.17592E-04
7	-1773.3	-0.36943E+07	-0.17592E-04
8	-38083.	-0.30962E+08	-0.14744E-03
9	13829.	0.50288E+07	0.23946E-04
10	-43319.	-0.35219E+08	-0.16771E-03
11	43319.	0.35219E+08	0.16771E-03
12	-47306.	-0.17202E+08	-0.81916E-04
13	43373.	0.35262E+08	0.16792E-03
14	-43373.	-0.35262E+08	-0.16792E-03
15	67513.	0.24550E+08	0.11691E-03
16	-38017.	-0.30908E+08	-0.14718E-03
17	38017.	0.30908E+08	0.14718E-03
18	-98223.	-0.35717E+08	-0.17008E-03
19	38071.	0.30952E+08	0.14739E-03
20	-38071.	-0.30952E+08	-0.14739E-03
21	0.11487E+06	0.41772E+08	0.19891E-03
22	-33688.	-0.27388E+08	-0.13042E-03
23	33688.	0.27388E+08	0.13042E-03
24	-0.14335E+06	-0.52126E+08	-0.24822E-03
25	33659.	0.27365E+08	0.13031E-03
26	-33659.	-0.27365E+08	-0.13031E-03
27	-11593.	-0.94254E+07	-0.44883E-04
28	4871.8	0.39608E+07	0.18861E-04
29	0.18266E+06	0.66422E+08	0.31630E-03
30	2240.6	0.466793107	0.22228E-04
31	15341.	0.55786E+07	0.26565E-04
32	-15499.	-0.56358E+07	-0.26837E-04
33	-1570.7	-0.32722E+07	-0.15582E-04
34	-0.20962E+06	-0.76226E+08	-0.36298E-03
35	-2803.8	-0.58413E+07	-0.27815E-04
36	1630.0	0.33959E+07	0.161713E-04
37	0.18006E+06	0.65475E+08	0.31179E-03
38	3524.1	0.73418E+07	0.34961E-04
39	16708.	0.60755E+07	0.28931E-04
40	-16280.	-0.59202E+07	-0.28191E-04
41	-1147.4	-0.23905E+07	-0.11383E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
42	-0.20821E+06	-0.75712E+08	-0.36053E-03
43	-4253.9	-0.88622E+07	-0.42201E-04
44	1636.5	0.34094E+07	0.16235E-04
45	0.17496E+06	0.63621E+08	0.30296E-03
46	5064.4	0.10551E+08	0.502423E-04
47	19102.	0.69461E+07	0.33077E-04
48	-17139.	-0.62323E+07	-0.29678E-04
49	-2462.2	-0.51295E+07	-0.24426E-04
50	-0.20479E+06	-0.74467E+08	-0.35461E-03
51	-5507.7	-0.11474E+08	-0.54640E-04
52	2432.1	0.50669E+07	0.24128E-04
53	0.17074E+06	0.62089E+08	0.29566E-03
54	2254.8	0.46976E+07	0.22370E-04

55	23152.	0.84190E+07	0.40090E-04
56	-18978.	-0.69013E+07	-0.32863E-04
57	-2680.9	-0.55853E+07	-0.26597E-04
58	-0.19974E+06	-0.72634E+08	-0.34587E-03
59	-2594.7	-0.54056E+07	-0.25741E-04
60	3107.3	0.64735E+07	0.30826E-04
61	0.15198E+06	0.55267E+08	0.26317E-03
62	8845.5	0.18428E+08	0.87753E-04
63	25658.	0.93301E+07	0.44429E-04
64	-21967.	-0.79879E+07	-0.38038E-04
65	-10994.	-0.22904E+08	-0.10907E-03
66	-0.17717E+06	-0.64427E+08	-0.30680E-03
67	-4274.7	-0.89056E+07	-0.42408E-04
68	5303.1	0.11048E+08	0.52610E-04
69	0.15010E+06	0.54582E+08	0.25991E-03
70	34411.	0.12513E+08	0.59586E-04
71	-32841.	-0.11942E+08	-0.56868E-04
72	-0.17491E+06	-0.63603E+08	-0.30287E-03
73	-12603.	-0.10246E+08	-0.48792E-04
74	-396.21	-0.82544E+06	-0.39307E-05
75	396.21	0.82544E+06	0.39307E-05
76	-18359.	-0.14926E+08	-0.71075E-04
77	396.43	0.82589E+06	0.39328E-05
78	-396.43	-0.82589E+06	-0.39328E-05
79	10419.	0.84708E+07	0.40337E-04
80	-1171.2	-0.95218E+06	-0.45342E-05
81	1171.2	0.95218E+06	0.45342E-05
82	-48814.	-0.17751E+08	-0.84526E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
83	1172.6	0.95335E+06	0.45397E-05
84	-1172.6	-0.95335E+06	-0.45397E-05
85	-966.33	-0.78564E+06	-0.37411E-05
86	966.33	0.78564E+06	0.37411E-05
87	-0.10248E+06	-0.37265E+08	-0.17745E-03
88	967.71	0.78676E+06	0.37465E-05
89	-967.71	-0.78676E+06	-0.37465E-05
90	-785.08	-0.63827E+06	-0.30394E-05
91	785.08	0.63827E+06	0.30394E-05
92	-0.14986E+06	-0.54495E+08	-0.25950E-03
93	784.41	0.63773E+06	0.30368E-05
94	-784.41	-0.63773E+06	-0.30368E-05
95	-20525.	-0.16687E+08	-0.79461E-04
96	-20481.	-0.16651E+08	-0.79293E-04
97	-2865.0	-0.59688E+07	-0.28423E-04
98	-776.17	-0.28235E+06	-0.13445E-05
99	-843.08	-0.30657E+06	-0.14599E-05
100	-2921.7	-0.60869E+07	-0.28985E-04
101	-0.21907E+06	-0.79660E+08	-0.37934E-03
102	1388.6	0.28928E+07	0.13775E-04
103	1450.9	0.30227E+07	0.14394E-04
104	-826.27	-0.17214E+07	-0.81971E-05
105	-1372.1	-0.49894E+06	-0.23759E-05
106	-1468.8	-0.53410E+06	-0.25433E-05
107	-887.32	-0.18486E+07	-0.88028E-05
108	-0.21758E+06	-0.79122E+08	-0.37677E-03
109	1715.6	0.35741E+07	0.17019E-04
110	1792.2	0.37338E+07	0.17780E-04
111	-2558.1	-0.53294E+07	-0.25378E-04
112	-2373.6	-0.86311E+06	-0.41101E-05
113	-2511.4	-0.91324E+06	-0.43488E-05
114	-2667.4	-0.55570E+07	-0.26462E-04
115	-0.21401E+06	-0.77821E+08	-0.37058E-03

116	2520.4	0.52508E+07	0.25004E-04
117	2633.5	0.54864E+07	0.26126E-04
118	-2782.5	-0.57969E+07	-0.27604E-04
119	-4281.2	-0.15568E+07	-0.74134E-05
120	-4503.4	-0.16376E+07	-0.77982E-05
121	-2908.8	-0.60599E+07	-0.28857E-04
122	-0.20873E+06	-0.75903E+08	-0.36144E-03
123	3427.4	0.71404E+07	0.34002E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
124	3578.1	0.74543E+07	0.35497E-04
125	-12048.	-0.25100E+08	-0.11953E-03
126	-7690.0	-0.27964E+07	-0.13316E-04
127	-8060.5	-0.29311E+07	-0.13957E-04
128	-12578.	-0.26205E+08	-0.12479E-03
129	-0.18512E+06	-0.67315E+08	-0.32055E-03
130	5742.9	0.11964E+08	0.56973E-04
131	5996.8	0.12493E+08	0.59492E-04
132	-19570.	-0.71165E+07	-0.33888E-04
133	-20464.	-0.74416E+07	-0.35436E-04
134	-0.18274E+06	-0.66452E+08	-0.31644E-03
135	34210.	0.27813E+08	0.13244E-03
136	1795.9	0.37414E+07	0.178163E-04
137	-1795.9	-0.37414E+07	-0.17816E-04
138	-15577.	-0.12664E+08	-0.60304E-04
139	-1796.8	-0.37434E+07	-0.17826E-04
140	1796.8	0.37434E+07	0.17826E-04
141	-45435.	-0.36939E+08	-0.17590E-03
142	43317.	0.35217E+08	0.16770E-03
143	-43317.	-0.35217E+08	-0.16770E-03
144	12326.	0.44821E+07	0.21343E-04
145	-43370.	-0.35260E+08	-0.16791E-03
146	43370.	0.35260E+08	0.16791E-03
147	38017.	0.30908E+08	0.14718E-03
148	-38017.	-0.30908E+08	-0.14718E-03
149	63256.	0.23002E+08	0.10953E-03
150	-38071.	-0.30952E+08	-0.14739E-03
151	38071.	0.30952E+08	0.14739E-03
152	33688.	0.27389E+08	0.130423E-03
153	-33688.	-0.27389E+08	-0.13042E-03
154	0.10836E+06	0.39403E+08	0.18763E-03
155	-33659.	-0.27365E+08	-0.13031E-03
156	33659.	0.27365E+08	0.13031E-03
157	4060.9	0.33016E+07	0.15722E-04
158	-12404.	-0.10085E+08	-0.48023E-04
159	-1709.7	-0.35618E+07	-0.16961E-04
160	-15533.	-0.56484E+07	-0.26897E-04
161	15307.	0.55661E+07	0.26505E-04
162	2101.6	0.43782E+07	0.20849E-04
163	0.17322E+06	0.62988E+08	0.29994E-03
164	1708.9	0.35601E+07	0.16953E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
165	-2725.0	-0.56770E+07	-0.27033E-04
166	-1182.7	-0.24640E+07	-0.11733E-04
167	-16350.	-0.59455E+07	-0.28312E-04
168	16638.	0.60502E+07	0.28810E-04
169	3488.8	0.72683E+07	0.34611E-04
170	0.17068E+06	0.62065E+08	0.29555E-03
171	1711.0	0.35645E+07	0.16974E-04

172	-4179.4	-0.87071E+07	-0.41462E-04
173	-2579.1	-0.53731E+07	-0.25586E-04
174	-17252.	-0.62734E+07	-0.29873E-04
175	18989.	0.69050E+07	0.32881E-04
176	4947.5	0.10307E+08	0.49082E-04
177	0.16574E+06	0.60268E+08	0.28699E-03
178	2547.7	0.53078E+07	0.25275E-04
179	-5392.1	-0.11233E+08	-0.53493E-04
180	-2808.0	-0.58499E+07	-0.27857E-04
181	-19179.	-0.69741E+07	-0.33210E-04
182	22952.	0.83461E+07	0.39743E-04
183	2127.8	0.44329E+07	0.21109E-04
184	0.16176E+06	0.58820E+08	0.28010E-03
185	3260.4	0.67925E+07	0.32345E-04
186	-2441.6	-0.50866E+07	-0.24222E-04
187	-11533.	-0.24028E+08	-0.11442E-03
188	-22315.	-0.81147E+07	-0.38641E-04
189	25309.	0.92033E+07	0.43825E-04
190	8306.1	0.17304E+08	0.82402E-04
191	0.14404E+06	0.52379E+08	0.24942E-03
192	5560.6	0.11584E+08	0.55164E-04
193	-4017.2	-0.83693E+07	-0.39854E-04
194	-33722.	-0.12262E+08	-0.58393E-04
195	33530.	0.12193E+08	0.58061E-04
196	0.14226E+06	0.51732E+08	0.24634E-03
197	-12729.	-0.10349E+08	-0.49279E-04
198	418.48	0.87184E+06	0.41516E-05
199	-418.48	-0.87184E+06	-0.41516E-05
200	-418.71	-0.87231E+06	-0.41538E-05
201	418.71	0.87231E+06	0.41538E-05
202	20188.	0.16413E+08	0.78158E-04
203	1173.6	0.95415E+06	0.45436E-05
204	-1173.6	-0.95415E+06	-0.45436E-05
205	-1175.0	-0.95532E+06	-0.45491E-05

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
206	1175.0	0.95532E+06	0.45491E-05
207	966.29	0.78560E+06	0.37410E-05
208	-966.29	-0.78560E+06	-0.37410E-05
209	-967.67	-0.78673E+06	-0.37463E-05
210	967.67	0.78673E+06	0.37463E-05
211	784.86	0.63810E+06	0.30386E-05
212	-784.86	-0.63810E+06	-0.30386E-05
213	-784.20	-0.63756E+06	-0.30360E-05
214	784.20	0.63756E+06	0.30360E-05
215	13282.	0.10798E+08	0.51419E-04
216	13325.	0.10833E+08	0.51586E-04
217	2797.4	0.58279E+07	0.27752E-04
218	592.18	0.21534E+06	0.10254E-05
219	658.72	0.23953E+06	0.11406E-05
220	2854.1	0.59460E+07	0.28314E-04
221	-1762.0	-0.36708E+07	-0.17480E-04
222	-1824.3	-0.38007E+07	-0.18098E-04
223	540.58	0.11262E+07	0.536293-05
224	1386.7	0.50424E+06	0.24011E-05
225	1483.3	0.53937E+06	0.25684E-05
226	601.63	0.12534E+07	0.59686E-05
227	-1223.3	-0.25486E+07	-0.12136E-04
228	-1300.0	-0.27083E+07	-0.12897E-04
229	2087.1	0.43481E+07	0.207053-04
230	2116.2	0.76954E+06	0.366453-05
231	2254.0	0.81964E+06	0.39031E-05
232	-2054.8	-0.42809E+07	-0.20385E-04

233	-2167.9	-0.45165E+07	-0.21507E-04
234	2221.0	0.46271E+07	0.22034E-04
235	3671.9	0.13352E+07	0.63582E-05
236	3894.0	0.14160E+07	0.67429E-05
237	2347.2	0.48901E+07	0.23286E-04
238	-2768.5	-0.57676E+07	-0.27465E-04
239	-2919.1	-0.60816E+07	-0.28960E-04
240	9760.6	0.20335E+08	0.96832E-04
241	6403.3	0.23285E+07	0.11088E-04
242	6773.7	0.24632E+07	0.11729E-04
243	-4648.8	-0.96849E+07	-0.46119E-04
244	-4902.6	-0.10214E+08	-0.48637E-04
245	16026.	0.58276E+07	0.27751E-04
246	16920.	0.61527E+07	0.29299E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
247	-67454.	-0.54840E+08	-0.26114E-03
248	7800.3	0.16251E+08	0.77384E-04
249	40071.	0.32578E+08	0.15513E-03
250	-5736.6	-0.11951E+08	-0.56910E-04
251	-64100.	-0.52114E+08	-0.24816E-03
252	13302.	0.27712E+08	0.131963-03
253	31039.	0.25235E+08	0.12017E-03
254	52.126	0.10860E+06	0.51712E-06
255	-41888.	-0.34055E+08	-0.16217E-03
256	-0.62497E-11	-0.13020E-07	-0.62001E-19
257	25624.	0.20833E+08	0.992033-04
258	-40771.	-0.33147E+08	-0.15784E-03
259	-73397.	-0.59672E+08	-0.28415E-03
260	7800.2	0.16250E+08	0.77383E-04
261	36304.	0.29515E+08	0.14055E-03
262	-5736.5	-0.11951E+08	-0.56910E-04
263	-67277.	-0.54697E+08	-0.26046E-03
264	13307.	0.27723E+08	0.13201E-03
265	28293.	0.23003E+08	0.10954E-03
266	48.777	0.10162E+06	0.48390E-06
267	-43230.	-0.35147E+08	-0.16736E-03
268	-0.74997E-10	-0.15624E-06	-0.74401E-18
269	24883.	0.20230E+08	0.96333E-04
270	-41218.	-0.33511E+08	-0.15957E-03
271	20010.	0.41688E+08	0.19851E-03
272	-6075.0	-0.12656E+08	-0.60267E-04
273	14814.	0.12044E+08	0.57353E-04
274	-5587.4	-0.11640E+08	-0.55431E-04
275	12599.	0.26247E+08	0.12499E-03
276	3429.3	0.27881E+07	0.13277E-04
277	-8369.6	-0.68046E+07	-0.32403E-04
278	7800.3	0.16251E+08	0.77384E-04
279	40161.	0.32651E+08	0.15548E-03
280	-5736.6	-0.11951E+08	-0.56910E-04
281	-4631.1	-0.37651E+07	-0.17929E-04
282	13302.	0.27712E+08	0.13196E-03
283	30950.	0.25163E+08	0.119823-03
284	52.104	0.10855E+06	0.516913-06
285	-11467.	-0.93230E+07	-0.44395E-04
286	0.57497E-09	0.11979E-05	0.57041E-17
287	26045.	0.21175E+08	0.10083E-03

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
288	-11433.	-0.92951E+07	-0.44262E-04

289	-14358.	-0.11673E+08-0.55585E-04
290	7800.2	0.16250E+08 0.77383E-04
291	36213.	0.29441E+08 0.14020E-03
292	-5736.5	-0.11951E+08-0.56910E-04
293	-7840.0	-0.63740E+07-0.30352E-04
294	13307.	0.27723E+08 0.13201E-03
295	28360.	0.23057E+08 0.10979E-03
296	48.799	0.10166E+06 0.48412E-06
297	-12829.	-0.10430E+08-0.49667E-04
298	-0.32499E-09	-0.67705E-06-0.32241E-17
299	24733.	0.20108E+08 0.95753E-04
300	-11887.	-0.96640E+07-0.46019E-04
301	1801.2	0.37525E+07 0.17869E-04
302	-6071.0	-0.12648E+08-0.60228E-04
303	2196.5	0.17857E+07 0.85035E-05
304	-5549.1	-0.11561E+08-0.55050E-04
305	4012.8	0.83599E+07 0.39809E-04
306	-1356.2	-0.11026E+07-0.52503E-05
307	10291.	0.21439E+08 0.10209E-03
308	-13234.	-0.10759E+08-0.51236E-04
309	-13221.	-0.10749E+08-0.51186E-04
310	-13234.	-0.10759E+08-0.51236E-04
311	-13221.	-0.10749E+08-0.51186E-04
312	11845.	0.96297E+07 0.45856E-04
313	11836.	0.96227E+07 0.45823E-04
314	11845.	0.96297E+07 0.45856E-04
315	11836.	0.96227E+07 0.45823E-04
316	-2035.5	-0.16549E+07-0.78805E-05
317	-2035.4	-0.16548E+07-0.78801E-05
318	-2035.4	-0.16548E+07-0.78801E-05
319	-2035.5	-0.16549E+07-0.78805E-05
320	-1739.6	-0.14143E+07-0.67349E-05
321	-1739.8	-0.14145E+07-0.67358E-05
322	-1739.8	-0.14145E+07-0.67358E-05
323	-1739.6	-0.14143E+07-0.67349E-05
324	-1320.0	-0.10731E+07-0.51101E-05
325	-1322.4	-0.10751E+07-0.51195E-05
326	-1322.4	-0.10751E+07-0.51195E-05
327	-1320.0	-0.10731E+07-0.51101E-05
328	115.88	94211. 0.44863E-06

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
329	-115.88	-94211.	-0.448633-06
330	-106.20	-86338.	-0.41113E-06
331	106.20	86338.	0.41113E-06
332	99.181	80635.	0.383973-06
333	163.53	0.13295E+06	0.63311E-06
334	-187.17	-0.15217E+06	-0.72463E-06
335	-122.62	-99689.	-0.47471E-06
336	-131.19	-0.10666E+06	-0.50790E-06
337	-192.66	-0.15663E+06	-0.74588E-06
338	158.20	0.12862E+06	0.61248E-06
339	90.764	73792.	0.35139E-06
340	-71.674	-58271.	-0.27748E-06
341	71.674	58271.	0.27748E-06
342	-91.406	-74314.	-0.35388E-06
343	91.406	74314.	0.35388E-06
344	908.49	0.73861E+06	0.35172E-05
345	71.900	58455.	0.27836E-06
346	-71.900	-58455.	-0.27836E-06
347	116.55	94752.	0.451203-06
348	-116.55	-94752.	-0.45120E-06
349	68.462	55660.	0.26505E-06

350	-68.462	-55660.	-0.26505E-06
351	117.46	95499.	0.45476E-06
352	-117.46	-95499.	-0.45476E-06
353	949.66	0.77208E+06	0.36766E-05
354	-748.43	-0.60848E+06	-0.28975E-05
355	-707.26	-0.57501E+06	-0.27381E-05
356	-75.111	-61066.	-0.29079E-06
357	75.111	61066.	0.29079E-06
358	-90.487	-73567.	-0.35032E-06
359	90.487	73567.	0.35032E-06
360	-2780.6	-0.22607E+07	-0.10765E-04
361	-2730.4	-0.22198E+07	-0.10571E-04
362	-110.16	-89563.	-0.42649E-06
363	-2366.9	-0.19243E+07	-0.91635E-05
364	5018.4	0.40800E+07	0.19429E-04
365	-7494.8	-0.60933E+07	-0.29016E-04
366	4839.0	0.39342E+07	0.18734E-04
367	3452.5	0.28069E+07	0.13366E-04
368	-5301.6	-0.43103E+07	-0.20525E-04
369	-4783.5	-0.38890E+07	-0.18519E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
370	-4520.0	-0.36748E+07	-0.17499E-04
371	11358.	0.92339E+07	0.43971E-04
372	-7604.9	-0.61829E+07	-0.29442E-04
373	8050.6	0.65452E+07	0.31167E-04
374	-5242.7	-0.42623E+07	-0.20297E-04
375	8376.3	0.68100E+07	0.32429E-04
376	-5608.7	-0.45599E+07	-0.21714E-04
377	-4635.2	-0.37684E+07	-0.17945E-04
378	7117.6	0.57867E+07	0.27556E-04
379	4324.7	0.35160E+07	0.16743E-04
380	-11266.	-0.91597E+07	-0.43617E-04
381	7543.8	0.61332E+07	0.29206E-04
382	5703.7	0.46372E+07	0.22082E-04
383	-8758.5	-0.71207E+07	-0.33908E-04
384	4330.6	0.35208E+07	0.16766E-04
385	-11336.	-0.92161E+07	-0.43886E-04
386	7590.3	0.61710E+07	0.29385E-04
387	5721.7	0.46518E+07	0.22152E-04
388	-8786.2	-0.71433E+07	-0.34015E-04
389	8280.3	0.67320E+07	0.32057E-04
390	-5544.4	-0.45076E+07	-0.21465E-04
391	-4579.0	-0.37227E+07	-0.17727E-04
392	7031.4	0.57166E+07	0.27222E-04
393	-4531.8	-0.36844E+07	-0.17545E-04
394	-4795.2	-0.38985E+07	-0.18564E-04
395	11262.	0.91559E+07	0.43599E-04
396	-7540.7	-0.61306E+07	-0.29193E-04
397	-5186.5	-0.42167E+07	-0.20079E-04
398	7964.3	0.64750E+07	0.30834E-04
399	4845.0	0.39390E+07	0.18757E-04
400	-7564.2	-0.61497E+07	-0.29284E-04
401	5064.9	0.41178E+07	0.19608E-04
402	-5329.3	-0.43328E+07	-0.20632E-04
403	3470.6	0.28216E+07	0.13436E-04
404	-13134.	-0.10678E+08	-0.50847E-04
405	-14351.	-0.11667E+08	-0.55560E-04
406	-7183.5	-0.58403E+07	-0.27811E-04
407	-10119.	-0.82270E+07	-0.39176E-04
408	-15152.	-0.12318E+08	-0.58660E-04
409	-12333.	-0.10027E+08	-0.47747E-04
410	-7836.3	-0.63710E+07	-0.30338E-04

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
411	-9466.4	-0.76962E+07	-0.36649E-04
412	-339.68	-0.27616E+06	-0.13151E-05
413	-2137.4	-0.17377E+07	-0.82749E-05
414	-2068.3	-0.16815E+07	-0.80073E-05
415	-3442.8	-0.27990E+07	-0.13329E-04
416	6647.1	0.13848E+08	0.65944E-04
417	6825.6	0.14220E+08	0.67714E-04
418	3582.2	0.74628E+07	0.35537E-04
419	3585.5	0.74697E+07	0.35570E-04
420	5379.9	0.11208E+08	0.53372E-04
421	5395.6	0.11241E+08	0.53528E-04
422	7958.6	0.16581E+08	0.78955E-04
423	8172.3	0.17026E+08	0.81074E-04
424	2777.2	0.57859E+07	0.27552E-04
425	2779.8	0.57913E+07	0.27577E-04
426	6702.4	0.13963E+08	0.66492E-04
427	7058.6	0.14705E+08	0.70026E-04
428	3610.5	0.75219E+07	0.35819E-04
429	3537.9	0.73705E+07	0.35098E-04
430	6238.0	0.12996E+08	0.61885E-04
431	6219.8	0.12958E+08	0.61704E-04
432	5298.5	0.11039E+08	0.52565E-04
433	5465.8	0.11387E+08	0.54224E-04
434	7757.6	0.16162E+08	0.76960E-04
435	8055.1	0.16781E+08	0.79912E-04
436	2752.2	0.57338E+07	0.27304E-04
437	2845.9	0.59290E+07	0.28233E-04
438	6151.9	0.12816E+08	0.61031E-04
439	6296.5	0.13118E+08	0.62466E-04
440	71.234	0.14840E+06	0.70668E-06
441	26.635	55490.	0.26424E-06
442	68.737	0.14320E+06	0.68191E-06
443	24.587	51223.	0.24392E-06
444	-94.004	-0.19584E+06	-0.93258E-06
445	-37.140	-77374.	-0.36845E-06
446	-39.189	-81644.	-0.38878E-06
447	-96.502	-0.20105E+06	-0.95736E-06
448	7097.2	0.57701E+07	0.27477E-04
449	653.10	0.53097E+06	0.25284E-05
450	5770.7	0.46916E+07	0.22341E-04
451	-653.09	-0.53097E+06	-0.25284E-05

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
452	31586.	0.25680E+08	0.12228E-03
453	26429.	0.21487E+08	0.10232E-03
454	31586.	0.25680E+08	0.12228E-03
455	26366.	0.21435E+08	0.10207E-03
456	-31586.	-0.25680E+08	-0.12228E-03
457	-37427.	-0.30429E+08	-0.14490E-03
458	-37491.	-0.30480E+08	-0.14514E-03
459	-31586.	-0.25680E+08	-0.12228E-03
460	4561.9	0.37089E+07	0.17661E-04
461	653.19	0.53105E+06	0.25288E-05
462	-653.19	-0.53105E+06	-0.25288E-05
463	3235.2	0.26303E+07	0.12525E-04
464	6108.0	0.49659E+07	0.23647E-04
465	-655.90	-0.53325E+06	-0.25393E-05
466	7378.4	0.59987E+07	0.28565E-04

467	655.90	0.53326E+06	0.25393E-05
468	0.15716E+06	0.57150E+08	0.27214E-03
469	0.15680E+06	0.57019E+08	0.27152E-03
470	0.15741E+06	0.57240E+08	0.27257E-03
471	0.15720E+06	0.57165E+08	0.27221E-03
472	-36647.	-0.29794E+08	-0.14188E-03
473	-31706.	-0.25777E+08	-0.12275E-03
474	-36704.	-0.29841E+08	-0.14210E-03
475	-31706.	-0.25777E+08	-0.12275E-03
476	0.14884E+06	0.54123E+08	0.25773E-03
477	0.14850E+06	0.53998E+08	0.25713E-03
478	0.14908E+06	0.54211E+08	0.25815E-03
479	0.14888E+06	0.54140E+08	0.25781E-03
480	24986.	0.20314E+08	0.96733E-04
481	31706.	0.25777E+08	0.12275E-03
482	24929.	0.20267E+08	0.96512E-04
483	31706.	0.25777E+08	0.12275E-03
484	3857.4	0.31361E+07	0.14934E-04
485	-656.00	-0.53333E+06	-0.25397E-05
486	-0.18353E+06	-0.66737E+08	-0.31780E-03
487	-0.18309E+06	-0.66578E+08	-0.31704E-03
488	-0.18363E+06	-0.66776E+08	-0.31798E-03
489	-0.18332E+06	-0.66663E+08	-0.31744E-03
490	5128.0	0.41691E+07	0.19853E-04
491	656.00	0.53333E+06	0.25397E-05
492	-0.19185E+06	-0.69764E+08	-0.33221E-03

***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

STAT ELEM	CURRENT STKRACHT	CURRENT STSPANNI	CURRENT STREK
493	-0.19140E+06	-0.69598E+08	-0.33142E-03
494	-0.19197E+06	-0.69806E+08	-0.33241E-03
495	-0.19164E+06	-0.69687E+08	-0.33184E-03
496	2196.4	0.45758E+07	0.21789E-04

MINIMUM VALUES

ELEM	101	101	101
VALUE	-0.21907E+06	-0.79660E+08	-0.37934E-03

MAXIMUM VALUES

ELEM	29	29	29
VALUE	0.18266E+06	0.66422E+08	0.31630E-03

Belastingen load2

LIST NODAL FORCES FOR SELECTED NODES 1 TO 184 BY 1
CURRENTLY SELECTED NODAL LOAD SET= FX FY FZ MX MY MZ

NODE	LABEL	REAL	IMAG
1	FX	1819.50000	0.00000000
4	FX	3064.80000	0.00000000
7	FX	3104.40000	0.00000000
10	FX	3782.80000	0.00000000
13	FX	4820.00000	0.00000000
16	FX	5171.50000	0.00000000
26	FX	2441.70000	0.00000000
67	FX	1819.50000	0.00000000
69	FX	3064.80000	0.00000000
71	FX	3104.40000	0.00000000
73	FX	3782.80000	0.00000000
75	FX	4820.00000	0.00000000
77	FX	5171.50000	0.00000000
86	FX	2441.70000	0.00000000
95	FX	1411.80000	0.00000000
96	FX	1692.60000	0.00000000
97	FX	2090.20000	0.00000000
98	FX	2729.80000	0.00000000
99	FX	2441.70000	0.00000000
100	FX	2441.70000	0.00000000

NODE	LABEL	REAL	IMAG
112	FX	16957.0000	0.00000000
112	FY	497.000000	0.00000000
112	FZ	-8620.00000	0.00000000
114	FX	16957.0000	0.00000000
114	FY	497.000000	0.00000000
114	FZ	-8620.00000	0.00000000
118	FX	16957.0000	0.00000000
118	FY	497.000000	0.00000000
118	FZ	-8620.00000	0.00000000
120	FX	16957.0000	0.00000000
120	FY	497.000000	0.00000000
120	FZ	-8620.00000	0.00000000
124	FX	16957.0000	0.00000000
124	FY	497.000000	0.00000000
124	FZ	-8620.00000	0.00000000
126	FX	16957.0000	0.00000000
126	FY	497.000000	0.00000000
126	FZ	-8620.00000	0.00000000
130	FX	16957.0000	0.00000000
130	FY	497.000000	0.00000000

NODE	LABEL	REAL	IMAE
130	FZ	-8620.00000	0.00000000
132	FX	16957.0000	0.00000000
132	FY	497.000000	0.00000000
132	FZ	-8620.00000	0.00000000
142	FX	407.700000	0.00000000

Reactiekrachten load2

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****

LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOBAL COORDINATES

	NODE	FX	FY	FZ	MX	MY
MZ	38	-90761.	0.11553E+06	-0.19608E+06	46671.	70751.
		0.36422E+06				
	39	-7879.4	1948.6	0.22140E+06	29265.	32346.
		-3911.1				
	66	-9858.0	-3936.6	0.23056E+06	-29553.	32661.
		3885.7				
	93	-88782.	-0.11752E+06	-0.18692E+06	-46958.	70437.
		-0.36420E+06				
TOTAL VALUES						
VALUE	-0.19728E+06	-3976.0	68960.	-574.77	0.20620E+06	
	0.65212E-02					

Bijlage 5 Output uit Ansys van belastinggeval 3

.....

Belastinggeval 3 met kruisende staven

STAT	CURRENT	CURRENT	CURRENT
ELEM	STKRACHT	STSPANNI	STREK
55	62.629	22774.	0.10845E-06
56	62.673	22790.	0.10853E-06
57	3.0643	6384.0	0.304000-07
58	1602.6	0.58276E+06	0.27750E-05
59	-31.049	-64685.	-0.308023-06
60	-31.046	-64679.	-0.30799E-06
61	1764.9	0.64177E+06	0.305603-05
62	112.22	0.23378E+06	0.11133E-05
63	103.90	37783.	0.17992E-06
64	103.95	37798.	0.179993-06
65	112.21	0.23376E+06	0.11131E-05
66	1761.8	0.64173E+06	0.30558E-05
67	-50.465	-0.10514E+06	-0.50064E-06
68	-50.460	-0.10513E+06	-0.50060E-06
69	1779.5	0.64709E+06	0.30814E-05
70	212.89	77415.	0.36864E-06
71	212.92	77426.	0.36870E-06
72	1779.4	0.64705E+06	0.30812E-05
73	-17807.	-0.14478E+08	-0.68941E-04
74	-2652.8	-0.55267E+07	-0.26317E-04
75	2652.8	0.55267E+07	0.26317E-04
76	-26708.	-0.21713E+08	-0.10340E-03
77	2654.2	0.55296E+07	0.263323-04
78	-2654.2	-0.55296E+07	-0.26332E-04
79	18782.	0.15270E+08	0.72712E-04
80	-5609.5	-0.45605E+07	-0.21717E-04
81	5609.5	0.45605E+07	0.21717E-04
82	-32669.	-0.11880E+08	-0.56570E-04
83	5616.3	0.45661E+07	0.21743E-04
84	-5616.3	-0.45661E+07	-0.21743E-04
85	-5317.2	-0.43229E+07	-0.20585E-04
86	5317.2	0.43229E+07	0.20585E-04
87	-39681.	-0.14429E+08	-0.68711E-04
88	5324.8	0.43291E+07	0.20615E-04
89	-5324.8	-0.43291E+07	-0.20615E-04
90	-5158.1	-0.41938E+07	-0.19971E-04
91	5158.4	0.41938E+07	0.19971E-04
92	-46453.	-0.16892E+08	-0.80439E-04
93	5154.0	0.41903E+07	0.19954E-04
94	-5154.0	-0.41903E+07	-0.19954E-04
95	-5258.8	-0.42754E+07	-0.20359E-04
96	-809.12	-0.65782E+06	-0.31325E-05
97	150.03	0.31255E+06	0.148843-05
98	4096.1	0.14895E+07	0.70928E-05
99	-4316.0	-0.15694E+07	-0.74735E-05
100	-657.86	-0.13705E+07	-0.65264E-05
101	-57973.	-0.21081E+08	-0.10039E-03
102	-450.32	-0.93816E+06	-0.44674E-05
103	508.83	0.10601E+07	0.50479E-05
104	787.21	0.16400E+07	0.78096E-05
105	4325.2	0.15728E+07	0.74895E-05
106	-4552.3	-0.16554E+07	-0.78828E-05
107	-247.23	-0.51506E+06	-0.24526E-05