

## 7.7 Windkrachten op de spits

De spitsopbouw is van hout.

Hout is in meerdere opzichten kwetsbaar: er kan aantasting door houtworm en boktor plaats vinden, het is brandbaar en belasting door wind kan in extreme gevallen tot breuk en totale vernieling leiden.

Aan de aantasting door houtworm is in hoofdstuk 4 al een beschouwinkje gewijd. Vele spitsen zijn in de loop der eeuwen verloren gegaan door brand na blikseminslag. Ook die van Leende trof in 1699 dit lot (wederopbouw in 1714) In 1867 is de spits voorzien van een bliksemafleider dus kans op brand is miniem. Een wind met orkaankracht zou de spits kunnen beschadigen of in het uiterste geval geheel vernielen.

Aanleiding tot deze beschouwing was de opvallend simpele bevestiging van de spitsbasis aan het stenen lichaam die een eventuele omkanteling door harde wind moet tegengaan.

In deze bijlage worden enige rekenexercities gepleegd om daar wat inzicht in te krijgen.

Er zijn de volgende figuren, vanaf pag.5:

7.7-1 Berekenen van oppervlakken en drukpunt

7.7-2 Kantellijnen van de spits

7.7-3 Relatie windkrachten en drukkrachten in kruisbalken

Er worden drie bezwijkscenario's onderzocht:

1. spits kantelt in zijn geheel om
2. de weerstand tegen een kaartenhuseffect bezwijkt
3. de bol kantelt om

Omdat de auteur zijn werkzame leven vóór de omschakeling van kilogram naar Newton als eenheid van kracht heeft doorgebracht is vind u hier nog kg i.p.v. N (1 kg = 10 N)

### 1 spits kantelt in zijn geheel om

Dit veronderstelt dat de spits zich als een onvervormbaar geheel gedraagt.

Schematisch gezien is het dragende deel van de spits een ruimtelijk vakwerk. De kruisbalken in dat geheel moeten voorkomen dat de constructie als een kaartenhuis in elkaar zijgt. In paragraaf 2 wordt nagegaan in hoeverre daar sprake van zou kunnen zijn.

We zullen in eerste instantie nagaan of het eigen gewicht voldoende is om een kanteling tegen te gaan. Als dat namelijk het geval is dan hoeven we ons niet te verdiepen in de belasting op de spijkers waarmee de spitsbasis aan de muurbalken vast zitten [D38]

We moeten even stil staan bij de "scharnierlijn" die we bij het kantelen moeten aanhouden, zie figuur 7.7-2

Door zijn achtkantige vorm zouden er twee scharnieren denkbaar zijn:

Lijn a bij een Wester storm en lijn b bij Zuidzuidwester storm (voor stormen uit andere richtingen gelden vanwege de symmetrie dezelfde redeneringen).

Het blijkt al snel dat bij een Westerstorm zowel het aangeblazen oppervlak als de arm waarmee het eigen gewicht de kanteling tegenwerkt kleiner is dan bij de Zuidzuidwester storm. En ook nog in dezelfde verhouding namelijk  $\cos 22,5^\circ$

Het is dus voldoende om één geval door te rekenen en we kiezen het geval met ZZW-storm

Het berekenen van de opwaartse kantelkracht die door het eigen gewicht wordt tegen gewerkt is eenvoudig als men de zaak tot het ongunstigst denkbare schema reduceert.

Het bepalen van het eigen gewicht is een groot karwei. Daarom is in eerste instantie een globale gewichtsbepaling verricht maar die resulteerde in een waarde die te klein was om het omkantelen tegen te gaan. Daarop is een meer nauwkeurige gewichtsberekening gemaakt die toen veel hoger uitviel (bijlage 7.8)

De zijdelingse kracht is te berekenen met de formule uit de aerodynamica:

$$K = \frac{1}{2} (\text{dichtheid van lucht} = 1/8) \times C_w \times V^2 \times F$$

Hierin  $C_w$  = weerstandscoefficiënt, afhankelijk van de vorm. We hebben de ongunstigst denkbare vorm aangehouden, een platte plaat in de vorm van de spits loodrecht op de windrichting met een  $C_w = 1,25$

$V$  = lichtsnelheid Bij de berekening van de zijdelingse druk door wind is uitgegaan van een windstoot van 130 km/u (36 m/sec). Dit is gebaseerd op een melding van het KNMI op hun website:

Storm van 27 oktober 2002 was zwaarste in twaalf jaar

De hoogste windstoot was rond 14 uur 80 knopen (41 m/s, 148 km/u) in Zeeland, in Noord-Holland werd tegen 15 uur 76 knopen (140 km/u) geregistreerd. Op de meeste plaatsen zijn de maximale windstoten 120-130 km/uur geweest.

De grootste windsnelheid die we in Leende kunnen verwachten is dus 130km/u. Door de opwarming van de aarde zou er in deze regionen zwaardere windstoten kunnen worden verwacht.

F het oppervlak van het object loodrecht op windrichting. In de tabel is uitgerekend hoe groot het oppervlak is en op welke hoogte die aangrijpt (het zwaartepunt van het oppervlak)

De hieruit volgende stuwdruk =  $1/2 \times 1/8 \times 1,25 \times 36^2 = 101,25 \text{ kg/m}^2$

### Zwaartepunt van aangeblazen vlak (geschematiseerd)

Het vlak is opgedeeld in 3 delen: A, B en C [figuur 7.7-2]

Deel	Oppervlak (m <sup>2</sup> )	Arm (m)	Moment (armxoppervlak)
A	21,5x1,3 = 28,0	1/2 x 2150 = 10,8	302
B	1/2 x 5,9 x 21,5 = 63,4	1/3 x 21,5 = 7,2	456
C	1/4 x 3,14 x 3,3 <sup>2</sup> = 8,5	23	196
	Totaal 99,9	Totaal 954/99,9 = 9,5	Totaal 954

Nu kunnen we de formule toepassen om de totale windkracht te berekenen:

$K = 101,25 \times 99,9 = 10115 \text{ kg}$  die werkt op 9,5 m boven de spitsvoet. Het kantelmoment wordt:

$10115 \times 9,5 = 96093 \text{ kgmeter}$ .

De arm bij een ZZW-storm is 3.60 m

Het eigen gewicht (G) wekt een tegen-kantelmoment op van  $G \times 3,60$ , de spits blijft dus staan bij een eigen gewicht van minstens  $96093/3,60 = 26693 \text{ kg}$  afgerond 27 ton

In werkelijkheid zou de kantelarm nog langer kunnen zijn omdat de spaken a.h.w. onder de spits uitsteken.

Echter in dat geval komt het totale gewicht van de spits op de punt van de spaak te rusten hetgeen de spaak zou doen breken.

Het gewicht bepaald in bijlage 9.8 komt uit op 37708 kg. De spijkers in detailtekening D38 zullen door windkrachten bij de zwaarste storm niet belast worden. De spits blijft overeind door eigen gewicht.

## 2.de weerstand tegen een kaartenhuiseffect bezwijkt

In bovenstaande berekening gedraagt de spits zich als een onvervormbaar voorwerp.

De constructie kan ook bezwijken door een in elkaar zijgen van de stoelen (de spakenstelsels en staanders klappen plat op elkaar)

We zullen dit voor het onderste juk bekijken [figuur 7.7-3]

De weerstand tegen samen klappen wordt bepaald door de kruisbalken [514 in V12] en de kruizen [552 in V11] tussen de staanders. Ook het houten dakbeschot zal hierin een stevige bijdrage leveren, de beplanking functioneert als een koker en is zeker in staat belangrijke weerstand te bieden tegen in elkaar zijgen.

Er is alleen iets aan te rekenen als we duchtige simplificaties aanbrengen.

We beginnen met te veronderstellen dat alleen de kruisbalken moeten voorkomen dat juk 1 onder windkracht niet in elkaar klappt. We gaan er ook van uit dat een kruisbalk geen trekbelasting overbrengt omdat de toognagel hiervoor te zwak is en vooral dat het gat in spaak te veel op de rand zit om krachten van belang over te brengen (het gaat om tonnen)

Na beschouwing van de twee stormrichtingen blijkt dat de ZZW-storm het ongunstigste belastingsgeval oplevert.

Er is dan maar één kruisbalk die direct belast wordt. De twee naastliggende staan onder een hoek met de belastingsrichting waardoor ze alleen kunnen bijdragen als er een voorziening is die het uitwijken van de toppen in zijdelingse richting kon voorkomen. De gording [549] kan hierin functioneren maar is slechts met een spijker of toognagel vastgezet en neemt bovendien slechts eensnedig de belasting op [f in D39]

Voorlopig veronderstellen we dat deze in staat is de zijdelingse uitwijking tegen te gaan (door de zijdelingse ontbondene van de windkracht)

Voor de berekening van de horizontale kracht door windbelasting aan de bovenzijde van juk 1 moeten we de totale windbelasting opsplitsen in het deel dat boven juk1 werkt (F1) en een deel dat op het vlak van juk1 zelf

werkt (F2). Die laatste wordt voor de helft (via sporen en stijlen) direct naar de spitsbasis geleid en belast juk 1 niet.

De belasting op bovenkant juk1 is dus  $F1 + \frac{1}{2} F2$

Het aangeblazen vlak van juk1 is [fig.7.7-2] :

$$6,11 \times 5,60 + \frac{1}{2} (7,20 - 5,60) \times 6,11 = 34,6 + 4,9 = 39,5 \text{ m}^2$$

Het totale oppervlak is  $99,9 \text{ m}^2$ , dus

$$F2 = 39,5/99,9 \times 10115 = 4000 \text{ kg en } F1 = 10115 - 4000 = 6115 \text{ kg}$$

Juk1 wordt belast met  $1/2 \times 4000 + 6115 = 8116 \text{ kg}$

We verdelen die kracht over de drie stijltoppen. Van de overige vijf stijltoppen staan er twee loodrecht op de belastingrichting en drie zouden alleen meedragen als de corresponderende kruisbalk trekkrachten kon overbrengen hetgeen we uitgesloten hebben.

We denken dat het robuuste tafelement voor een gelijkmatige verdeling over de drie stijltoppen zal zorgdragen Elk dus  $\approx 2700 \text{ kg}$ . Om de belasting op naastliggende kruisbalken in hun vlak van belasting te vinden dienen we de  $2700 \text{ kg}$  te ontbinden hetgeen in figuur 9.7.3 d.m.v. Cremonadiagrammen is gebeurd.

Het blijkt dat ook de naastliggende stijltoppen door een kracht (richting middelpunt) van  $2700 \text{ kg}$  worden belast (dat is geen toeval, het volgt uit geometrie). De trekbelasting in de koppelbalk wordt  $2000 \text{ kg}$ . Dit is ongetwijfeld te veel voor de toognagel of spijker die de gording verbindt aan de spaak. Echter de planken van het dakbeschoot en vooral het tafelement zelf zullen waarschijnlijk voldoende bijdragen om een echt bezwijken te voorkomen.

De drie stijlen worden aan de toppen met een binnenwaartse kracht van  $2700 \text{ kg}$  belast. Zij worden afgesteund door de kruisbalken die op ongelijke hoogten aangrijpen. De meest extreme posities zijn in figuur 9.7.3 weergegeven.

De horizontale component voor de twee steunpunten zijn:

$$611/460 \times 2700 = 3856 \text{ kg en } 611/300 \times 2700 = 5500 \text{ kg. Via Cremonadiagrammen levert dat een drukkracht voor de lange kruisbalk op van } 4100 \text{ kg en voor de korte } 6300 \text{ kg.}$$

Deze balken met een gemiddelde doorsnede van  $17 \times 15 \text{ cm}$  zijn halverwege verzwakt doordat ze op de kruising met de "trekbalk" half en half op elkaar zijn in gelaten [D38].

Gezien de lengte van de kruisbalken is hier sprake van een mogelijke uitknikking bij een drukkracht. Hier zou de klassieke formule van Euler toegepast kunnen worden. Cruciaal blijkt dan de verzwakking op het kruispunt te zijn. De weerstand tegen uitknikken wordt bepaald door het kleinste traagheidsmoment van de doorsnede die  $17 \times 15 \text{ cm}$  bedraagt. Het uitknikken zal juist door die verzwakking bevorderd worden echter hiervoor zijn geen rekenformules beschikbaar. Om toch enig inzicht in knikweerstand te verkrijgen zijn de kritische drukspanningen berekend voor een volle en een halve balk.

$\sigma = \pi^2 \times E / \lambda^2$  waarin  $E =$  Elasticiteitsmodule ( $9 \text{ tot } 16 \times 10^4$  vlg's Wikipedia, we houden  $15 \cdot 10^4$  aan) en  $\lambda$  staat voor slankheid  $= l / \sqrt{I/O}$ , waarin  $l =$  lengte staaf,  $I = 1/12 \text{ b} \cdot h^3$  en  $O = b \times h$  (de Griekse tekens worden uitgesproken als:  $\sigma =$  sigma en  $\lambda =$  lamda)

$\sqrt{I/O}$  wordt dus  $\sqrt{1/12} h^2$ , bij een halve hoogte wordt deze waarde ook half zo groot

Voor de volle doorsnede

$$I = 1/12 \text{ b} \cdot h^3 = 1/12 \times 17 \times 15^3 = 4781 \text{ cm}^4$$

$$\sqrt{I/O} = \sqrt{4781/17 \times 15} = 4,33$$

$$O = 17 \times 15 = 255 \text{ cm}^2$$

De berekening voor de kruisbalken verloopt als volgt:

		Lengte cm	Drukkracht kg	$\lambda = l / \sqrt{I/O}$	$E^2$	$\sigma = 3,14^2 \times 15 \cdot 10^4 / E^2$ kg/cm <sup>2</sup>	Heersende spanning kg/cm <sup>2</sup>
Korte balk	Vol	460	6300	106	$1,12 \cdot 10^4$	132	25
	Half			212	$4,49 \cdot 10^4$	33	49
Lange balk	Vol	700	4100	162	$2,6 \cdot 10^4$	57	16
	half			324	$10,4 \cdot 10^4$	14	32

Voor een volle balk is er geen vuiltje aan de lucht. De verzwakking echter zou funest kunnen uitpakken, namelijk het in zijdelingse richting uitknikken van de kruisbalken.

Een “verzachtende” factor is dat in de berekening voor de halfvolle balk deze verondersteld wordt over de hele lengte halfvol is.

Daarentegen zal de verzwakking het uitknikken bevorderen. De “collegakruisbalk” zou hier een steunende functie kunnen verlenen ware het niet dat de uitknikking de kruisbalken uiteen drijft terwijl er niet overal een spijker op de kruising aanwezig is en bovendien een spijker niet het geëigende middel is om een zijdelingse belasting op te nemen.

Was de toepassing van de hoogtheoretische formule van Euler op bochtig eikenhout misschien al van twijfelachtige waarde, de complicatie door de plaatselijke halvering maakt de zaak nog meer ongewis.

Er zijn dan nog de niet meegetelde elementen zoals dakbeschot en kruizen tussen de stijlen die een onberekenbare bijdrage leveren in de weerstand tegen het in elkaar klappen.

De eindconclusie is dat de zaak te gecompliceerd is om een tot een echt gefundeerd oordeel over de sterkte tegen een orkaan te geraken. Er is wel het gevoel dat de sterkte marginaal is.

De werkelijkheid van bijna drie eeuwen ongeschonden staat lijkt dit laatste te logenstraffen hoewel zwaardere stormen in de toekomst, zwaarder dan ooit, niet uitgesloten kunnen worden.

### 3 De bol kantelt om

De bol is met 8 ijzeren beslagen aan juk 4 van de spits bevestigd [k in D34]. Daarnaast zijn er nog eens 4 schoren van de bol die met pen en gat verbinding aan het tafelement van juk 4 verankerd zijn. Gezien de smalle basis van de bolbevestiging zou hier een kritische situatie kunnen bestaan bij een wind met orkaankracht.

Het aangeblazen oppervlak van de bol  $F = \frac{1}{4} \times \pi \times 3,3^2 = 8,6 \text{ m}^2$  [figuur 9.7.1].

De windkracht bij 130 km/uur is  $8,6/99,9 \times 10115 = 870 \text{ kg}$  naar boven afgerond vanwege kruis: 1000 kg. Deze werkt op 1,5 m boven de bolbasis, kantelmoment is dus 1500 kgm.

Het tegenmoment door eigen gewicht (2913 kg, zie bijlage 9.8) is  $2913 \times 0,7 = 2039 \text{ kgm}$

Ook de bol blijft staan door eigen gewicht.

Toch zou hier een kritische situatie kunnen ontstaan door massawerking van de bol bij een zwiepende beweging van de spits. Vooral bij hevige windstoten kunnen deze krachten hoog oplopen en mogelijk zelfs kritisch worden voor de bevestigingen. Het zou misschien zinvol zijn de ijzeren beugels qua conditie en bevestiging in 2010 (10 jaar na de grote restauratie van 2000/2001) nog eens zorgvuldig te controleren.

### Samenvatting

De exercitie bleef beperkt tot op het gevoel kritische belastingsgevallen op de spits.

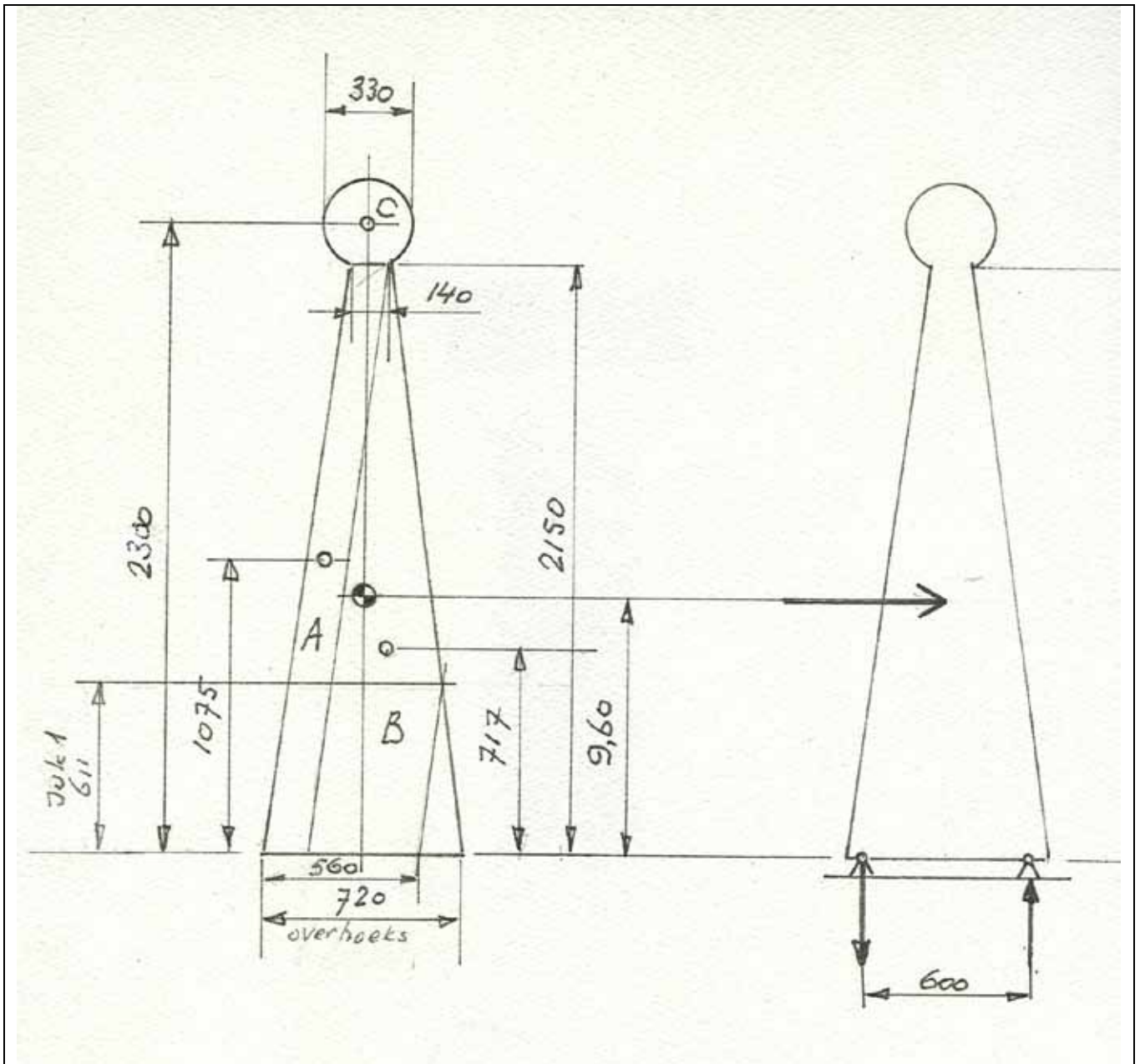
De kruisbalken en de bevestigingsbeugels van de bol zijn in deze studie als mogelijke kritische bouwelementen naar voren gekomen.

### Nabericht

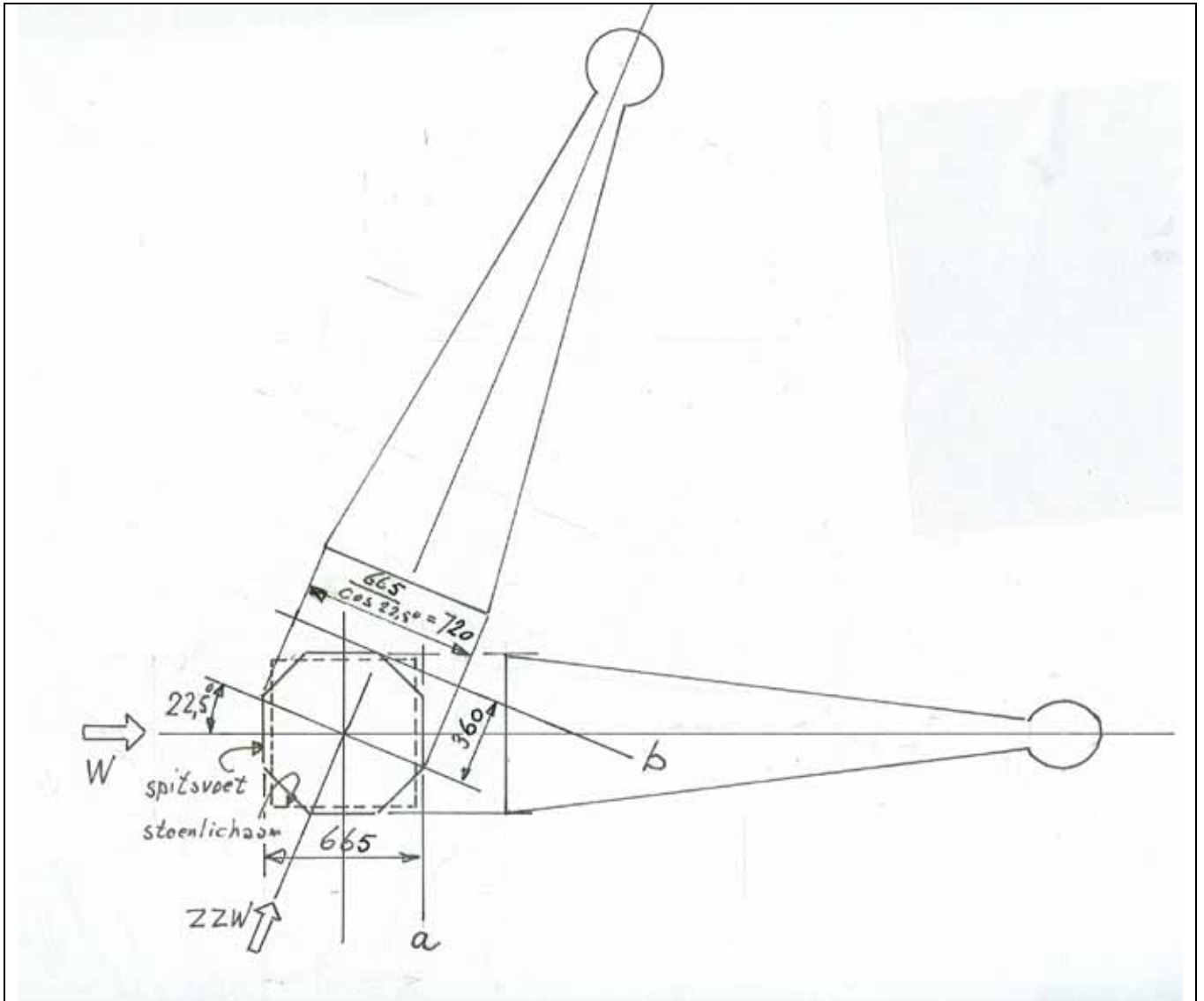
Na het afsluiten van het rapport kwam een NEN-blad over windbelastingen op gebouwen beschikbaar (NEN-blad 6702.2001)

Tabel A.1 geeft voor het binnenland van Nederland op een hoogte van 45 m een waarde van  $1,2 \text{ kN/m}^2$  voor de aan te houden stuwdruk hetgeen omgerekend naar kg overeenkomt met  $122,45 \text{ kg/m}^2$  hetgeen 20 % hoger is dan hiervoor is berekend.

Voor het kantelen van spits en bol blijft ook bij die hogere waarde voldoende veilige marge bestaan. Wat betreft de analyse van de weerstand tegen in elkaar klappen verandert er niet veel omdat de berekening feitelijk te veel onzekerheden telt om echt houvast te bieden.



Figuur 7.7-1 Berekenen van oppervlakken en drukpunt



7.7-2 Kantellijnen van de spits

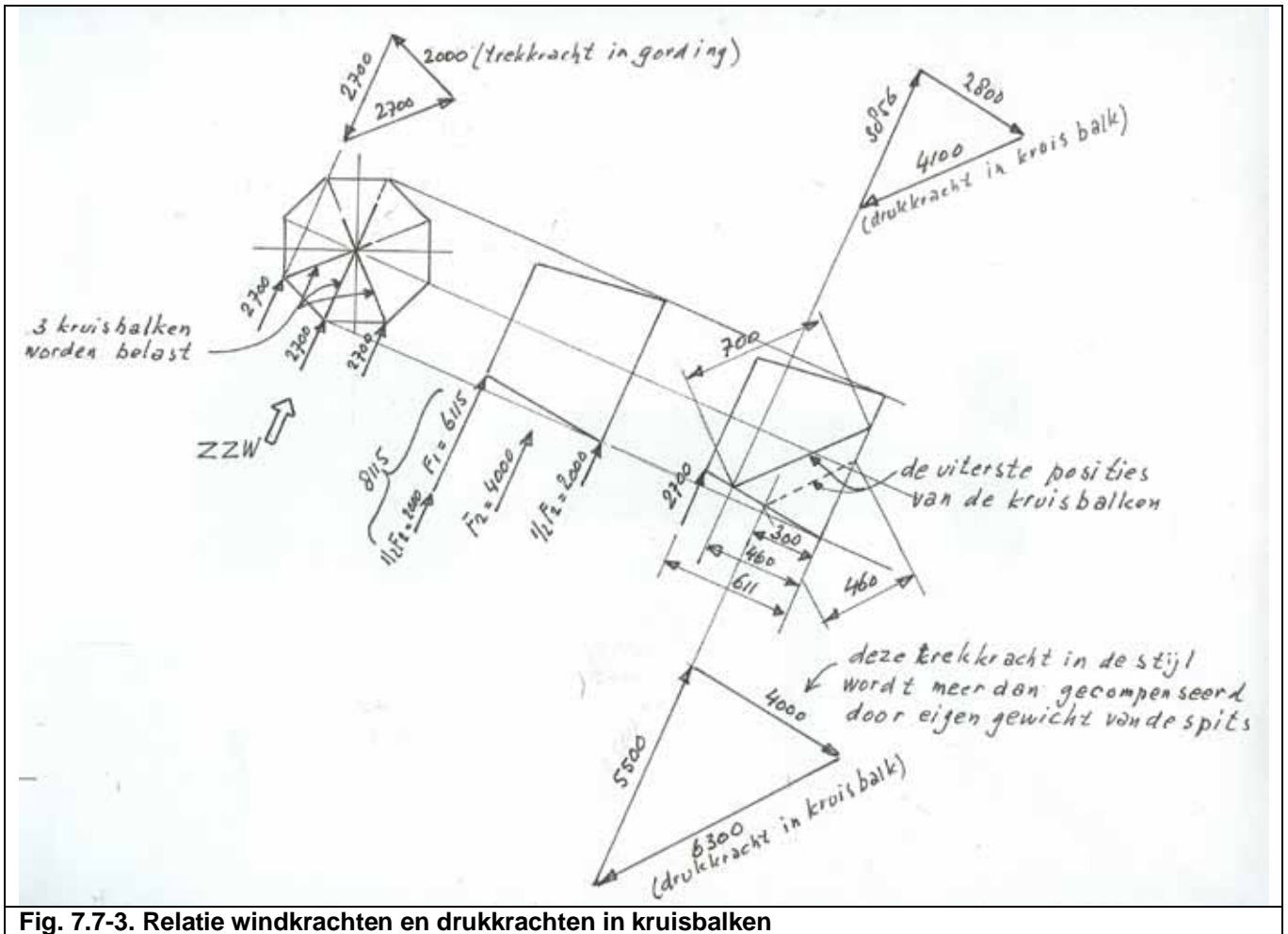


Fig. 7.7-3. Relatie windkrachten en drukkrachten in kruisbalken