

WIND BOUW WERK 1

Werktekeningen voor
beproefde windmolens
voor
electriciteits-opwekking.
Rotordiameter van 3 en 5 meter.

FONS DE BEER

Een ODE uitgave
Organisatie voor Duurzame Energie

VOORWOORD

Het bouwen van een windmolen is geen eenvoudige zaak. In dit boekje kunnen zelfbouwers mogelijk een aantal oplossingen vinden voor de lastige problemen welke het 'windgebeuren' met zich meebrengt. Hiertoe worden vele onderwerpen vanuit praktisch oogpunt bekeken. Zelf weet ik, na acht jaar experimenteren, dat meerdere facetten onbesproken zijn gebleven.

Een aantal zaken zijn echter bewust vermeden omdat ze het totaalbeeld niet verhelderen.

Tijdens de langdurige experimenten kwamen talrijke vragen aan de orde, waarvoor telkens een redelijke oplossing werd gevonden. In dit verband wil ik mijn dank laten blijken voor de hulp die ik hierbij heb ondervonden. Dit geldt in het bijzonder voor Tineke Griffioen, Wim 't Hart en Albert Pel die, in 'twijfelgevallen', de juiste adviezen konden bedenken.

Waar het in deze handleiding speciáál over gaat is de konstruktie van een tweetal rotor-ontwerpen, waarvan de één vijf jaar, de ander twee jaar kontinu in bedrijf zijn, nadat honderden malen de molenmast werd beklommen om ontwerpfouten te elimineren.

Die fouten hoeft u niet meer te maken.

Veel sukses.

Bussum
januari 1982
Fons de Beer

INHOUD

blz.

5 Inleiding

ONTWERP OVERWEGINGEN

6 Beveiliging toerental windmolens

7 Werkings-principe bladverstelling systeem A en systeem B

9 Waarom twee bladen?

10 Oriëntatie op de wind

11 Windservo

11 Werking windservo

DRIE-METER-MOLEN

13 Gegevens 3 meter molen

15 Bouwtekeningen 3 meter molen

16 Rotor-opbouw (zijaanzicht) Tek. 1

18 Rotor-opbouw (vooraanzicht) " 2

20 Grondplaat " 3

22 Diverse onderdelen " 4

24 Regelmechanisme " 5

26 Centrifugaal gewichten " 6

28 Konstruktie rotorbladen " 7 en 7a

32 Inklemming rotorbladen " 8

34 Aanhechting rotorbladen (totaal) " 9

36 Afregelen 'systeem A' " 10

38 Afregelen 'systeem B' " 11

40 Konstruktie windservo " 12

44 Molenmast " 13

46 Kruilager " 13

46 Plaatsen van de molen

48 Beproeving-standaard

48 Rotoras, overbrenging, generator

49 Elastische koppeling

49 Overbrenging

49 Generator

50 Balanceren

51 Flutter van het rotorblad

51 Waarom geen bladtorsie?

51 Houtveredeling

53 Windlast op de molen

53 Inspectie, smering, onderhoud

ALGEMENE WENKEN EN GEGEVENS

54 TV storing

54 Buisconstructies kunnen stukvriezen

54 Optische hinder

54 Vogels en windmolens

54 Scharnieren

54 Tandwielkasten

54 Meting toerental rotoras

55 Auto-wisselstroom generator

56 Overloop accu naar ekstra belasting

58 Meten van accuspanning

58 12 of 24 volt

58 Molenrem

58 Afschermkap regelmechanisme

58 Molens op huis of boot

59 Verkeerde draairichting molen

59 Windsnelheidsmeter

60 Veer 5g van het regelmechanisme

60 Windsnelheid en opgewekte energie

61 Blikseminslag

(vervolg inhoud)

blz.

VIJF-METER-MOLEN

62	Inleiding	
62	Gegevens prototype vijf-meter-molen	
63	Tekeningen vijf-meter-molen	
63	Grondplaat	Tek. 1
64	Regelmechanisme	" 2
65	Diverse onderdelen	" 3
66	Centrifugaal gewichten	" 4
67	Rotorbladen	" 5
68	"	" 6
69	"	" 6a
70	"	" 6b
71	Bladinklemming	" 7
72	Foto's, algemene aanwijzingen	
76	Afregeling	
76	Rotorbladen	
76	Elastische koppeling	
76	Aanpassing vijf-meter-molen aan gemiddeld heersende windsterkte	
79	Belasting aan vijf-meter-molen	
79	28 volts generator	
80	Rem	
80	Molenopbrengst	
81	Trouble shooting	

AANHANGSELS

82	Aanhangsel 1 Werkings-principe windrotor
84	Aanhangsel 2 Overzicht mastkonstruktie vijf-meter-molen

FOTO'S

DRIE-METER-MOLEN

13	Foto 1 Zijaanzicht molen
15	" 2 Overzicht regelmechanisme bladverstelling (werkstand)
18	" 3 Vooraanzicht molen
34	" 4 Regelmechanisme bladverstelling (aanloopstand)
40	" 5 Overzicht windservo
48	" 6 Lagering rotoras-achteraanzicht bladverstelling

VIJF-METER-MOLEN

72	Foto 7 Vooraanzicht totaal (mast en molen)
72	" 8 Zijaanzicht totaal
73	" 9 Bovengedeelte mast met kruilager
73	" 10 Kopkonstruktie molen (rotorlager-transmissie-generator)
74	" 11 Overzicht rotorkop-bladverstelling
75	" 12 Windservo
75	" 13 Onderaanzicht windservo (ketting-kettingwielen)

Briefcitaten uit 'molenbrief' A.J. Geuze

INLEIDING

Deze handleiding is bedoeld voor zelfbouwers die willen beschikken over een duurzame krachtbron voor het opwekken van elektriciteit.

De tekst is geschreven rond twee molenontwerpen, 3 meter en 5 meter diameter, welke zijn getest onder extreme omstandigheden.

Beide ontwerpen zijn voorzien van verstelbare rotorbladen. Het grootste deel van de handleiding is ingeruimd voor de bespreking van de 3 meter molen waarbij de werking van het bladverstel-mechanisme alsmede de aanpassing van molen aan belasting, en de mastkonstruktie uitgebreid aan de orde komen. De beschrijving van de 5 meter molen is minder diepgaand omdat tal van gegevens uit het 3 meter ontwerp ook van toepassing zijn op het 5 meter ontwerp. Verder is een groot aantal tips verwerkt die tijdens, maar ook na de bouw van de molen, van veel betekenis kunnen zijn.

Voordat met de werkelijke bouwbeschrijving wordt begonnen, zullen eerst enkele, met de praktijk verwante problemen worden aangepakt.

Sla dit niet over. We zullen namelijk zien hoe de oplossingen van deze problemen zijn toegepast op beide ontwerpen. Dit geeft de bouwer de gelegenheid te achterhalen hoe en waarom tot het besproken recept is gekomen.

Het gebruik van formules is vermeden wat niet wegneemt dat enig begrip wordt verlangd inzake het ingewikkelde en vooral, indrukwekkende krachterspel tussen wind en molen.

Veel lezers zullen met de grondbeginselen van de windmolen bekend zijn zodat direkt kan worden begonnen met een aantal beveiligings-aspekten en ontwerpoverwegingen. Voor wie twijfelt aan de basiskennis is achter in het boek het hoofdstuk 'Werkingsprincipe windrotor' opgenomen.

ONTWERPOVERWEGINGEN

Beveiliging toerental windmolens

Moleninstallaties moeten een zeer gevarieerd windaanbod verwerken. Veel (zelfbouw)molens bezwijken bij sterke wind doordat het toerental te hoog kan oplopen waarbij de optredende krachten (centrifugaal, giroscopisch) zeer ver boven de nominale waarden kunnen stijgen. Het is daarom van belang de konstruktie zo te kiezen dat boven een vastgestelde waarde het toerental niet verder toeneemt. We spreken dan van beveiligen. Dit beveiligen kan op verschillende manieren plaatsvinden. De meest effectieve methode is om de drijvende kracht in het wiestelsel onder controle te houden. Een voorbeeld hiervan is de Hollandse molen waarvan, bij te sterke wind, zeil wordt weggenomen waardoor de molen minder effectief op de wind reageert. Bij de nieuwe en betere vormgeving van de wieken (bladen) gaat de Hollandse molentruc niet meer op. Het blijkt echter dat door het veranderen van de stand van de bladen, het toerental van de molen nauwgezet kan worden gecontroleerd. Alvorens de achtergronden van deze regelmethode te omschrijven zal in het kort worden nagegaan welke ingrepen zoal worden toegepast om de gewenste toerentalbegrenzing te realiseren.

- 1 Bij te hoog toerental molen op de rem.
- 2 Belasting op de molen steeds groter laten worden.
- 3 Molen uit de wind draaien.
- 4 Gebruik van remkleppen bij dreigend te hoog toerental.
- 5 Verstellen van de rotorbladen.

Omdat niet iedereen bekend is met de voor- en nadelen van de verschillende beveiligings-systemen zal hierop wat nader worden ingegaan.

ad 1 Omdat de windsterkte in korte tijd sterk kan variëren is deze methode niet aantrekkelijk; of de molen moet elk ogenblik worden stilgezet, of, wanneer minder alert wordt gereageerd, de molen draait regelmatig op een gevaarlijk hoog toerental. Erg onpraktisch dus.

ad 2 Het toerental van veel, vaak netgekoppelde, molens wordt vastgelegd door een onevenredige zware belasting van de generator bij toenemende wind.

Deze werkwijze mag echter niet worden beschouwd als een toeren-beveiliging omdat bij het uitvallen van de belasting het toerental toch weer ongecontroleerd hoog kan oplopen. Molens welke op deze manier opereren moeten altijd worden voorzien van nog een andere soort beveiliging.

ad 3 Het (gedeeltelijk) uit de wind draaien van een molen ter voorkoming van te hoog toerental lijkt voor de hand te liggen doch zal doorgaans niet zonder problemen kunnen plaatsvinden. Dit mag blijken uit het volgende: Veronderstel dat een be-

paalde molen draait op het maximum toelaatbare toerental van 500 omw/min bij een windsnelheid van 8 m/s. Vervolgens laten we de windsnelheid toenemen tot 16 m/s en zien dat de rotor minstens 50 graden uit de wind moet worden gedraaid om bij deze wind het toerental te beperken tot 500 omw/min. Bij een verdere toename van de windsnelheid tot 24 m/s moet de rotor 65 graden uit de wind worden gedraaid voor weer het maximum toelaatbare toerental van 500 omw/min wordt verkregen.

Bij sterk fluktuerende wind zal voortdurend een snelle kruibeweging moeten plaatsvinden om het gestelde doel te bereiken.

In de meeste gevallen zal blijken dat de molenmassa verhindert dat de juiste positie op tijd is ingenomen zodat de rotor regelmatig in een te hoog toerentalgebied komt. Deze situatie wordt nog erger wanneer van de toenemende wind(vlaag) ook de windrichting verandert in dezelfde richting waarin de molen uit de wind wordt gezet. Hierbij moeten zowel de kruihoeek als de kruisnelheid toenemen.

Dit kan niet zonder gevolgen blijven voor de molen al moet worden gezegd dat sommige overgedimensioneerde konstrukties, waarbij het nominaal toerental veel lager ligt dan het maximum toerental, behoorlijk wat kunnen verdragen. Voor tweebledige rotoren echter is dit systeem beslist af te raden. De in het voorbeeld aangehaalde toerentalen en kruihoeeken zijn resultaten van metingen in een windtunnel met **onbelaste** rotor.

ad 4 Een veel toegepaste methode voor het regelen van het toerental is het gebruik van remkleppen. Hierbij wordt, boven een bepaald toerental, een ekstra luchtweerstand opgeroepen waarmee het toerental wordt beheerst. Remkleppen kunnen zodoende een effectieve beveiliging vormen. Er kunnen zich echter situaties voordoen waarbij de remwerking ongewild wordt verminderd of zelfs geheel is uitgeschakeld. Zo'n situatie is bij voorbeeld wanneer de remkleppen zijn vastgezet door een laag ijzel of stevig zijn vastgevroren. Inherent aan remkleppen is ook een verhoogde geluidshinder welke tijdens de remwerking optreedt. Slimme konstrukties kunnen mogelijk voor beide nadelen een oplossing bieden. Eigen experimenten vonden meestal een einde in weersomstandigheden zoals omschreven.

ad 5 Het verstellen van de rotorbladen wordt veelvuldig toegepast om toerenregeling te realiseren. De bewegingsenergie van de molen wordt opgewekt in de bladen van de rotor. Het ligt voor de hand dat diezelfde bladen bij uitstek geschikt zijn om de opgewekte energie (toerental) in toom te houden door bladhoekverstelling van de rotorbladen.

Konstruktief gezien is dit echter niet de eenvoudigste oplossing en dat zal wel de reden zijn dat niet veel méér (zelfbouw)molens met bladverstelling zijn uitgerust. Omdat met bladverstelling naast toerenregeling ook gunstige aanloopfaciliteiten kunnen

worden verkregen was het voor mij de moeite waard om ook hiermee een aantal experimenten uit te voeren. Het experiment dat het beste resultaat gaf en bovendien niet al te moeilijk is te bouwen, is verwerkt in de, in dit boekje beschreven, zelfbouw-ontwerpen.

In het algemeen kan worden gesteld dat een toerenbeveiliging van een molen moet zijn gebaseerd op een, uit de wind of toerental afgeleide grootte welke, zo direkt mogelijk, op het aerodynamisch rendement kan ingrijpen wanneer de vastgestelde normen worden overschreden.

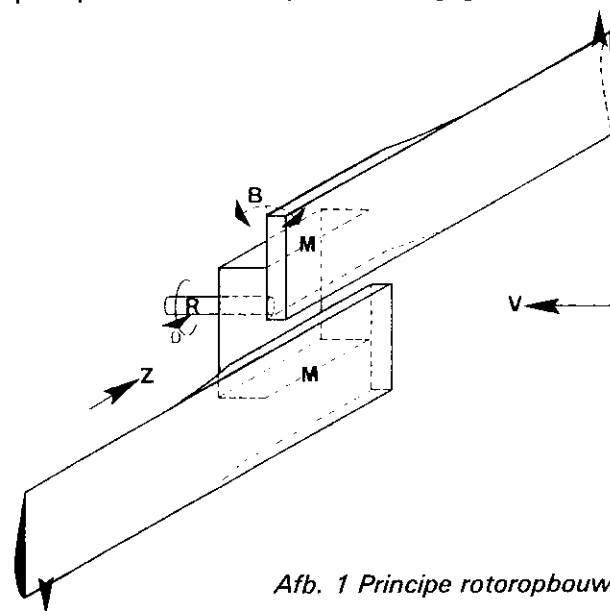
In de praktijk blijkt dat molens vaak zijn uitgerust met combinaties van de genoemde beveiligingsmethoden.

Windmolens moeten altijd zijn voorzien van een goedwerkende rem.

WERKINGSPRINCIPE BLADVERSTELLING

Systeem A en systeem B

Omdat straks door de lezer zélf een beslissing kan worden genomen voor wat betreft de keuze van het regelsysteem zal de werking van het bladverstelmechanisme nader worden bekeken. In afb. 1 is het principe van de rotor-opbouw weergegeven.



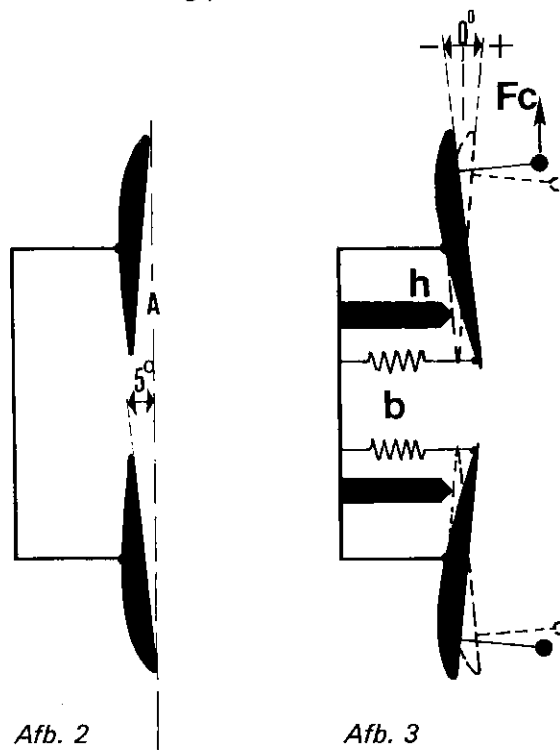
Afb. 1 Principe rotoropbouw

We zien hier beide rotorbladen gemonteerd tegen een U profiel. De bladen zijn **verstelbaar** om streeplijn **M** volgens cirkelboog **B**. Het U profiel is gekoppeld aan rotoras **R** welke draait in pijlrichting **D**.

We zien ook de positie van het bladprofiel t.o.v. de windrichting **V**. De lengte van het blad is omwille van de tekening ingekort.

Omdat in dit ontwerp geen blad-torsie wordt toegepast is de hoek tussen bladprofiel en draaivlak over de gehele lengte van het blad vrijwel even groot. Om tekenwerk te besparen gaan we in het nu volgende verhaal de bladen bekijken vanuit pijlrichting **Z**, zodat we het **U** profiel zien samen met de beide bladprofielen. Zie afb. 2.

Uit deze afbeelding blijkt dat de bladen onder een kleine hoek (5 graden) ten opzichte van het draaivlak **A** staan opgesteld. Voor dit ontwerp blijkt dit een gunstige werkstand te zijn hoewel kleinere hoeken ook nog prima werken.



Afb. 2

Afb. 3

Voor het regelen van het toerental kunnen nu twee methoden worden gevolgd welke elk voor zich, aerodynamisch gesproken, totaal verschillende uitgangspunten hebben.

Beide systemen vragen echter om een kracht welke, afhankelijk van het toerental, in staat moet zijn de bladen te verstellen.

Hiertoe worden, in ons geval, de centrifugaalgewichten **c** geïntroduceerd welke tijdens het draaien van de rotor een kracht **Fc** in pijlrichting leveren.

Systeem A

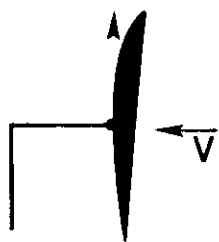
Bekijken we nu eerst systeem A in afb. 3. De bladen worden door veren **b** tegen stuitpunt **h** getrokken waardoor de werkstand is vastgelegd (streeplijn blad). Boven een bepaald toerental wordt de kracht **Fc** sterker dan de veerspanning en trekt het blad met zich mee. De bladhoek t.o.v. het draaivlak wordt dus eerst kleiner, tot aan nul graden, daarna weer groter maar is dan **negatief**.

Deze actie heeft tot gevolg dat de invalshoek van de relatieve wind op het blad zover kan worden vergroot dat de luchtstroom het koorde(blad)-profiel niet meer kan volgen en 'loslaat'. Tijdens dit proces verlaagt de bladlift in sterke mate en daarmee de drijvende kracht in de draairichting. Dit verschijnsel wordt 'overtrek' genoemd.

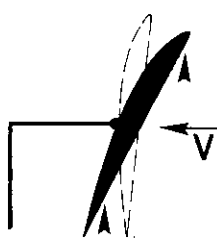
Het toerental zal in deze situatie niet verder kunnen toenemen en wordt derhalve bepaald door **Fc** en de veerdruk welke **Fc** als tegendruk ondervindt. Alvoers andere regelmogelijkheid (systeem B) te omschrijven eerst nog iets anders.

Aanloopstand

Een sneldraaiende molen, zoals ook gebruikt in dit ontwerp, zal door zijn vormgeving niet of moeilijk aanlopen. Dit is een eigenschap van de 'snelloper'. De oorzaak hiervan is dat de bladen tijdens stilstand vrijwel loodrecht op de toestromende wind V staan zodat nagenoeg geen aanloopkoppel in de draairichting aanwezig is (zie afb. 4). Door nu de bladen een aanloopstand te geven kan een groot aanloopkoppel worden verkregen (zie afb. 5). De bladen moeten echter direkt na het aanlopen in de werkstand van afb. 4 worden gebracht.



Afb. 4
Zonder aanloopstand.
Laag aanloopkoppel.



Afb. 5
Met aanloopstand.
Hoog aanloopkoppel.

Het blijkt nu dat systeem A zich goed leent om ook de aanloopprocedure voor zijn rekening te nemen. Dit komt omdat verdraaiing van de bladstand, zowel bij aanlopen als bij het regelen naar de overtrek positie, in éénzelfde richting kan plaatsvinden. Het principe van systeem A komt er tenslotte uit te zien zoals in afb. 6 is getekend.

Ook hier worden de bladen door veren b tegen stuitpunt h getrokken. Nu echter wordt hiermee de **aanloopstand** vastgelegd (25 graden). In deze stand hebben de bladen een hoog aanloopkoppel. Na het aanlopen zorgt F_c dat de veerspanning van b wordt overwonnen waardoor de bladen loskomen van hun stuitpunten h en tegen het tweede stuitpunt a komen te rusten. Dit is de werkstand van de bladen. Wordt de kracht F_c nog groter, dus bij toenemend toerental, dan zal, via stuitpunt a , ook de sterke veer g worden ingedrukt waarbij de bladen zich naar de besproken overtrekpositie kunnen bewegen. Aldus wordt door veer g het maximum toerental van de rotor vastgelegd. Deze manier van regelen noemen we in de verdere beschrijving en tekeningen 'systeem A'.

In bouwtekening 1 kunnen we zien hoe deze regeling in praktijk is gebracht. (Blz. 17)

Systeem B

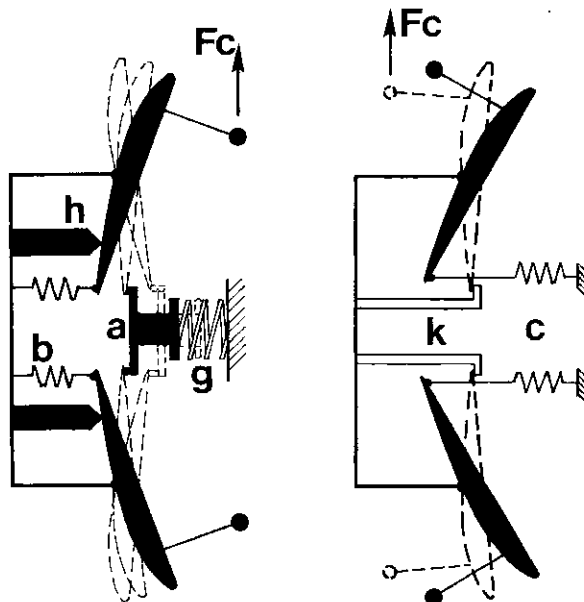
De tweede methode (systeem B) voor regeling van het toerental zien we, nog steeds 'schematisch, voorgesteld in afb.7. Hierbij worden de bladen in de werkstand gehouden door ze met de veren c tegen de hoekstukjes k te trekken. (streeplijn blad)

Bij toenemend toerental van de rotor zal F_c , welke nu aan de andere zijde van het blad is aangebracht, de veerkracht overwinnen waardoor de bladhoek t.o.v. het draaiingsvlak wordt vergroot. Dit heeft tot gevolg dat het blad in een, min of meer schuine stand, moet ronddraaien waardoor de driftweerstand (een remmende faktor) sterk wordt verhoogd.

Het resultaat is een lagere waarde van de 'snellopendheid' en dus toerentalbegrenzing. Wat we in systeem B missen is de mogelijkheid om op een eenvoudige manier een aanloopstand toe te voegen. Immers, we zullen de bladen eerst heen, dus naar de werkstand, daarna terug moeten regelen. Konstruktief is dit niet aantrekkelijk, althans niet in dit relatief eenvoudige ontwerp.

Je kunt je nu afvragen waarom niet direkt systeem A wordt gekozen; we hebben hier toch alles wat we willen: Gunstige aanloophoek en maximum toeren regeling.

Welnu, beide systemen blijken voor- en nadelen te bezitten en om hier niet al te diep op in te gaan zal worden volstaan met een korte beschouwing van enkele belangrijke kenmerken in beide systemen.



Afb. 6
Systeem A.

Afb. 7
Systeem B.

Voor- en nadelen systeem A en B

Systeem A is veiliger en heeft een hoog startkoppel. Systeem B regelt mooier en heeft een laag startkoppel. Veiliger regelen voor systeem A wil zeggen: Bij (zeer) sterke wind kan het 'overtrek' effect door de wind zélf worden ingeleid waardoor een toerentaldaling plaatsvindt en daardoor ook een vermogensdaling.

Door deze toerentaldaling blijkt, in kritieke situaties (storm), de windbelasting op de gehele moleninstallatie sterk af te nemen door de, laten we zeggen transparante werking in het draaivlak van de bladen (wind kan er makkelijk doorheen). Dit maakt systeem A zeer veilig.

In systeem B vindt het tegengestelde plaats; om de bladen te verstellen wordt specifiek naar het toerental gekeken. Bij toenemende wind moet het toerental steeds iets hoger worden om de gewenste bladverstelling te verkrijgen. Het verval van toerental bij sterke wind, zoals zich dat in systeem A voordoet, blijft in systeem B achterwege waardoor een meer konstante vermogensafgifte is verzekerd. De windlast echter kan in kritieke situaties hoog oplopen waardoor de kans op schade wordt vergroot.

We staan hier dus voor de keuze waarvan in het begin van dit hoofdstuk sprake was.

Welk systeem?

Na lang experimenteren met beide systemen hebben de volgende argumenten mij de doorslag gegeven om voor systeem A te kiezen.

1 De toegepaste bladen lenen zich beter voor systeem A dan voor systeem B (heeft te maken met bladdoorbuiging).

2 De jaaropbrengst van de molen met een aanloopstand (systeem A) is **duidelijk hoger** dan zonder deze voorziening; systeem A levert al lang, systeem B wacht op meer wind om op te starten.

3 Door een herziene veerconstructie in systeem A is de regeling zodanig verbeterd dat vermogensreductie door ongewenste 'overtrek' sterk is verminderd, doch met opzet niet geheel is weggenomen i.v.m. besproken veiligheid.

Omdat het bloed kruipt waar het niet gaan kan is de opzet van het regelmechanisme uiteindelijk zo gekozen dat beide systemen kunnen worden toegepast zodat voor nieuwsgierigen nog een gaatje open blijft om te experimenteren. De regeling is hierdoor universeel te noemen.

Startkoppel

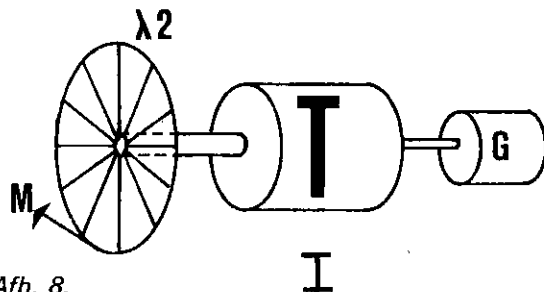
Voor belangstellenden werd opgemeten in welke mate het startkoppel in systeem A wordt verbeterd door het toepassen van een gunstige aanloophoek. Uitgaande van een werkstand van vijf graden zal een aanloophoek van 25 graden een ongeveer zes maal zo hoog startkoppel opleveren t.o.v. het startkoppel bij vijf graden. Dit houdt in dat de molen, afhankelijk van transmissie, generator e.d. tussen 1,5 en 3 meter per seconde windsnelheid kan aanlopen.

Suggestie: Systeem A gebruiken in situaties waarbij een hoog startkoppel wordt vereist. (Is meestal het geval.)

Systeem B gebruiken voor installaties welke zeer licht draaien dus makkelijk kunnen aanlopen op een werkhoek van vijf graden. Ook kan systeem B worden toegepast wanneer de generator tevens als motor kan werken. Bij voldoende wind, gemeten met windmeter, wordt de generator enkele seconden als motor gebruikt om molen op te starten.

Systeem A echter verdient voorkeur i.v.m. veiligheid.

WAAROM TWEE BLADEN ?



Afb. 8.

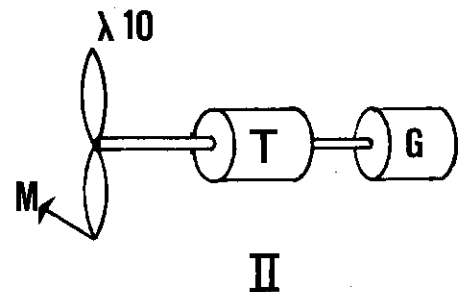
Voor het opwekken van elektriciteit is een generator nodig welke doorgaans op een hoog toerental draait. Om i.v.m. kostprijs en verliezen de versnellende overbrenging zo klein mogelijk te houden is het raadzaam een molen te kiezen welke uit zichzelf al snel draait (snelloper). Zowel molen als overbrenging kunnen hierdoor uit lichtere onderdelen worden samengesteld.

Bovendien heeft de snelloper het voordeel dat deze uit weinig materiaal kan worden opgebouwd en op relatief eenvoudige wijze is te voorzien van een toerentalbeveiliging.

De snellopendheid wordt aangeduid door λ . (Lambda) en geeft aan hoeveel maal de tip van het rotorblad zich sneller beweegt dan de toestromende wind. Hoe minder bladen worden gebruikt, hoe groter de snellopendheid.

Op welke manier de snellopendheid van de molen in de kostprijs van de versnellende overbrenging is betrokken kunnen we het beste met het voorbeeld in afb. 8 demonstreren.

Twee molens: molen I met een snellopendheid van 2 ($\lambda = 2$, veelbladige langzaamloper) en molen II met een snellopendheid van 10 ($\lambda = 10$, tweebladige snelloper). Diameter beide molens even groot. De generator G van molen I heeft **hetzelfde vermogen en toerental** als de generator van molen II.



Het vermogen van molen I wordt opgewekt bij een vijf maal lager toerental dan bij molen II. Het koppel M (kracht op de as) zal daarom bij molen I vijf maal hoger zijn dan bij molen II. Ook de overzet verhouding van de versnellende overbrenging moet bij molen I vijf maal meer zijn dan bij molen II.

Al met al komt het hier op neer dat de versnellingskast (transmissie) in molen I, 3,5 maal zo zwaar zal uitvallen en 2,5 maal meer zal kosten dan die van molen II, (gegevens catalogus) nog afgezien van het vele rotorblad materiaal van molen I en het gewicht hiervan.

Vandaar snellopers voor elektriciteitsopwekking.

Wie nu bedenkt waarom de snellopendheid niet zo hoog wordt gekozen dat de transmissie helemaal achterwege kan blijven, moet beseffen dat de aerodynamische wetten aan grenzen zijn gebonden. Voor tweebladige rotors is een snellopendheid van 10 à 11 wel zo ongeveer het maximum. Hierboven zal, of het rendement snel afnemen, ofwel de profielconstructie wordt zo 'slank' dat niet voldoende mechanische sterkte aanwezig is.

Het gebruik van één blad i.p.v. twee kan hier nog wat verbetering brengen ten gunste van een kleinere overzet verhouding van de transmissie, doch de nadelen van een éénbladige rotor zijn slechts met zeer veel kunst en vliegwerk te omzeilen. Denk alleen maar eens aan de onbalans tijdens ijzel of rijp.

Afmetingen generator

De vraag waarom de generator niet zo wordt gemaakt dat deze al bij lage toerentallen kan werken heeft in feite dezelfde achtergrond. Enkele wetmatigheden verlangen van de generator minimale afmetingen voor een bepaald vermogen en toerental. Deze zaken zijn onverbreekelijk met elkaar verbonden.

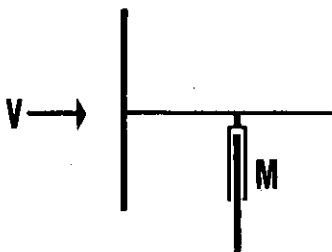
Wie een bestaande generator van laten we zeggen 1 kilowatt (kW), 1000 omw/min wil laten werken op 500 omw/min moet genoeg nemen met nog maar een 0,5 kW (andere beperkingen nog niet meegeteld).

Een generator van 1 kW bij 5000 omw/min past in een schoendoos; een generator van 1 kW bij 100 omw/min kan misschien net in de kofferbak. Laat dit even goed inwerken.

ORIËNTATIE OP DE WIND

Kruien van de molen

Horizontale-as molens zullen steeds op de wind V moeten worden gezet. Daartoe moet de molen kunnen kruien om een verticale as M (zie afb. 9). Dit kruien kan op verschillende manieren plaatsvinden;



Afb. 9.

- 1 handkruien
- 2 door windvaan
- 3 windservo (windroos)
- 4 elektro mechanische servo
- 5 kruien door zelfrichtend effect van de windmolen.

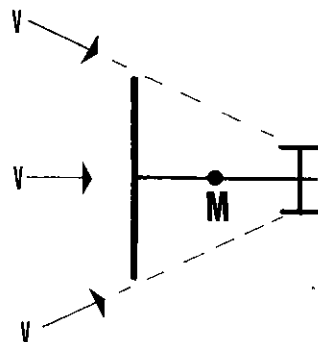
Het kan geen kwaad elk van deze kruise-systemen wat nader toe te lichten.

1 Handkruien kan worden toegepast op plaatsen waar een nagenoeg konstante windrichting heerst. De verticale as is dan gefixeerd doch kan, indien de windrichting te veel afwijkt, (met de hand) naar de juiste windrichting worden gedraaid.

2 De windvaan houdt de molen op de wind doordat de vaan zichzelf zo opstelt dat minimale luchtweerstand wordt ondervonden. Anders gezegd, de vaan staat altijd in de stromingsrichting van de wind. Bij dit systeem treden grote gyroscopische krachten op wanneer de kruibeweging niet is gedempt.

3 Bij de windservo zorgt een, onder 90 graden geplaatste, kleine kruimolen voor het kruien van de windmolen. Afb. 10 geeft het bovenaanzicht. De kruimolen beweegt samen met de grote molen om mast M . De kruimolen staat zo opgesteld dat deze niet draait indien de grote molen goed op de wind

staat. Wanneer de wind verdraait gaat de kruimolen draaien: linksom of rechtsom, afhankelijk van de richting waarheen de wind verdraait. De draaibeweging van de kruimolen wordt overgebracht naar de stilstaande mast M en zet zich daar tegen af.



Afb. 10.

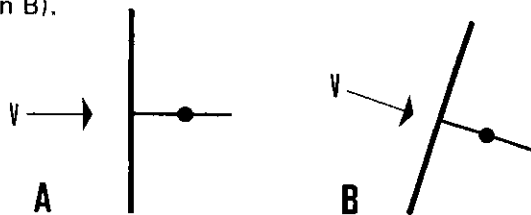
Het draaien van de kruimolen houdt op wanneer deze zichzelf uit de wind heeft gezet. De grote molen staat dan weer goed op de wind.

In het hier besproken molenontwerp wordt van een windservo gebruik gemaakt (zie 'windservo' blz.11).

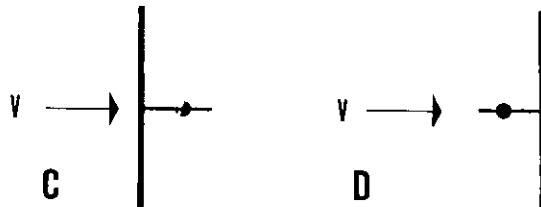
4 Een nadere manier van kruien kan plaatsvinden door een elektro-mechanische servo.

Een (kleine) elektromotor met tand- of wormwiel vertraging kan de verticale molenas draaien. Een vrij opgestelde windvaan welke is voorzien van een richtingsopnemer geeft voortdurend informatie aan de elektromotor: niet kruien, linksom kruien, rechtsom kruien. Om het systeem sluitend te maken moet de stand van de kruise-as continue worden vergeleken met de stand van de windvaan (terugkoppeling).

5 Sommige molensystemen plaatsen zich op de wind door het zelfrichtend effect van de windmolen. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschijnsel dat het draaiings-vlak van de (draaiende) rotor zich loodrecht instelt op de windrichting (zie A en B).



Dit effect manifesteert zich zowel bij molens welke 'voor de mast' draaien (C) als bij molens welke 'achter de mast' draaien (D).



Uit oogpunt van stabiliteit zal de 'achter de mast' opstelling moeten worden gekozen. Deze opstelling heeft tot gevolg dat de wieken door de 'windschaduw' van de mast zullen draaien hetgeen een ongunstige uitwerking heeft op de levensduur van de molen. Bij dit systeem treden grote gyroscopische krachten op wanneer de kruibeweging niet is gedempt.

Keuze van het krui-systeem

De uiteindelijke keuze van de kruimethode hangt af van verschillende factoren.

Tijdens het kruien van een draaiende molen treedt een gyroscopisch koppel (kracht) naar buiten welke op de wieken grote buigkrachten doen ontstaan terwijl de som van alle gyroscopische krachten in de lagers van de molenas moet worden opgevangen. Dit gyroscopisch koppel ontstaat omdat de rotor, net als bij de gyro-tol zich zeer krachtig verzet tegen verandering van het draaivlak.

De grootte van de kracht is afhankelijk van: massa-tragheids moment van de rotor, het toerental van de rotor, het aantal bladen van de rotor en van krui-snelheid.

Omdat de massa van b.v. een twebladige rotor niet gelijk aan de omtrek is verdeeld, treedt dit gyroscopisch koppel pulserend naar buiten. Het gevolg hiervan zijn heftige bewegingen welke aangrijpen in de top van de mast; tijdens (snel) kruien lijkt het alsof de rotor sterk in onbalans is.

Vergroting van het aantal rotorbladen zal dit effect reduceren doch in dat geval moeten we de voordelen van de twebladige rotor weer prijsgeven. Maar zelfs al zouden we het gewicht van de rotor keurig aan de omtrek verdelen dan nog ontkomen we niet aan dit koppel. (Denk aan draaiend fietswiel). Omdat het gyroscopisch koppel **alleen tijdens** het kruien naar buiten treedt en wel **des te sterker naarmate de krui-snelheid hoger is**, ligt het voor de hand de krui-snelheid aan banden te leggen.

Dat is bij molens met een ongedempte windvaan bepaald niet het geval; bij sterke wind, waarbij de rotor op maximum toerental draait, kunnen windrichtings-veranderingen optreden van 90 graden per seconde. De windvaan zal deze windrichtings-veranderingen volgen, hierbij nog geholpen door het zelfrichtend effect van de rotor zelf. Onder deze omstandigheden zijn vele, met zorg gebouwde, molens bezweken.

Konklusie

Het blijkt dus dat het beveiligen van de molen verder gaat dan het in de hand houden van het toerental; ook de krui-snelheid moet onder controle worden gehouden. Overtuigend is volgens mij het feit dat een aantal gerenommeerde windmolen-fabrikanten alsnog een vertraagde krui-inrichting aan de bestaande ontwerpen heeft toegevoegd.

Met deze achtergrondinformatie is getracht duidelijk te maken om welke redenen een windservo wordt toegepast. Het spreekt vanzelf dat in feite elk langzaamkruierend systeem kan worden aangewend. In dit verband is het handig te weten dat het gebruikte windservo systeem, met een aantal wijzigingen, ook is uit te voeren als een elektro-mechanisch krui-systeem. Hierover is in dit hoofdstuk al wat verteld. Suggesties hieromtrent zijn te vinden in 'Konstruktie windservo' op blz.40.

WINDSERVO

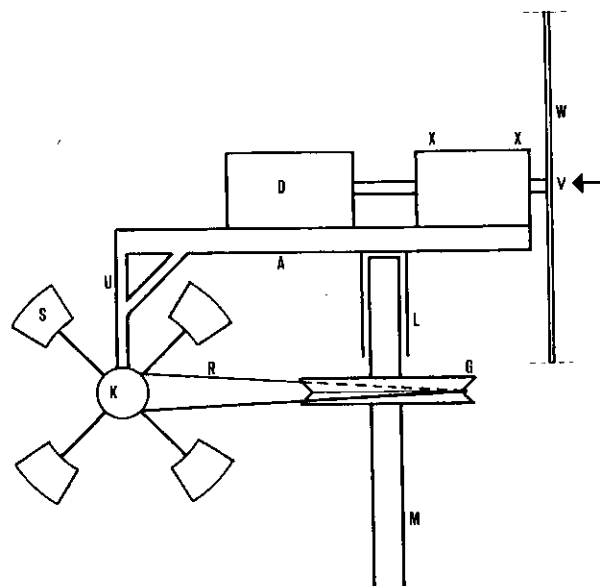
In hoofdstuk 'Oriëntatie op de wind' hebben we gezien om welke reden dit molenontwerp is voorzien van een windservo. In het hierna volgende gedeelte zal verder worden ingegaan op de werking van de windservo. Tevens zal met bouwtekeningen worden aangegeven hoe dit kan worden gerealiseerd. Voor sommigen zal de uitleg wat langdradig zijn. Toch is het nodig precies te omschrijven hoe dit in zijn werk gaat, temeer daar dit onderwerp veelal slechts vaag wordt aangehaald. Zodoende wordt ook voorkomen dat allerlei wonderlijke konstrukties verrijzen welke alles doen behalve kruien zoals vaak is gebleken tijdens de rondgang in het molenwereldje.

Definitie

Allereerst een globale definitie van het begrip 'servosysteem'. Dat is dan: *'Een gesloten systeem waarbij een grootheid (b.v. een kracht) wordt aangewend welke zichzelf buiten werking stelt wanneer het beoogde doel is bereikt'.*

WERKING WINDSERVO

In afb. 11 zien we de basisdelen van de molen met windservo schetsmatig weergegeven.



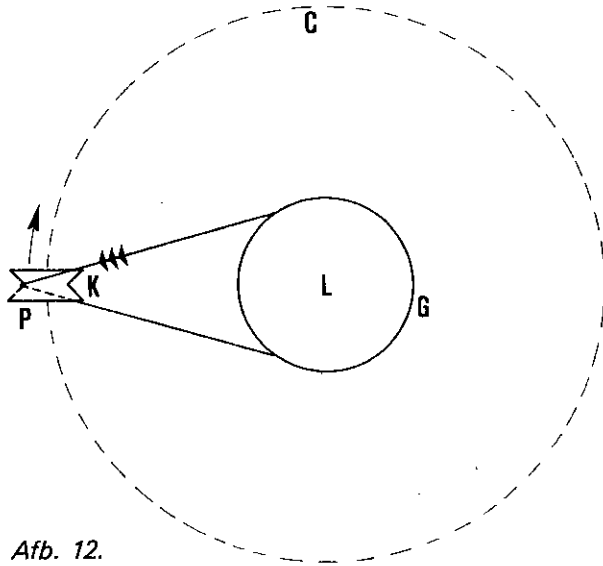
Afb. 11. Basisopstelling molen met windservo.

M is de mast met daaraan vast gemonteerd een groot snaarwiel **G**. De doorlopende mast is ingericht als krui-lager **L** waarop montagebalk **A** kan draaien. Op deze montagebalk is de rotor **W** gemonteerd welke draait in de lagers **X**. Daarachter de generator **D** met eventuele overbrenging.

S zijn de bladen of schoepen van de kruimolen welke samen met het kleine snaarwiel **K** één geheel vormt. De draaiings-as **K** van de kruimolen is 90 graden gedraaid t.o.v. de as van **G**.

Uithouder **U** draagt het lager waarin de as van **K** kan draaien. **R** is een aandrijfsnaar welke om beide snaarwielen **G** en **K** is aangebracht.

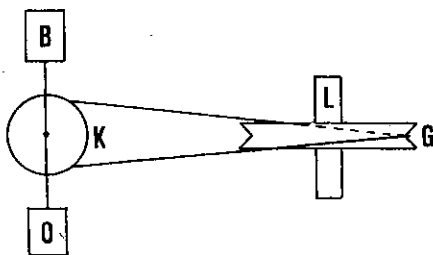
Wanneer we de bladen **S**, dus ook het daaraan gekoppelde snaarwiel **K**, met de hand gaan draaien dan zou, via snaar **R**, snaarwiel **G** worden aangedreven en willen meedraaien. Snaarwiel **G** kan echter niet meedraaien omdat deze aan de mast **M** is gefixeerd. Wanneer **G** niet kan draaien en **K** toch wordt aangedreven dan zal **K** zich om **G** gaan bewegen. Hoe dit gaat zien we in afb. 12. **K** en **G** zijn weer de snaarwielen nu in bovenaanzicht. Wanneer **K**, bekeken vanuit **p** linksom wordt aangedreven dan zal, wanneer **G** vast is opgesteld snaarwiel **K** de snaar naar zich toetrekken (drie pijltjes).



Afb. 12.

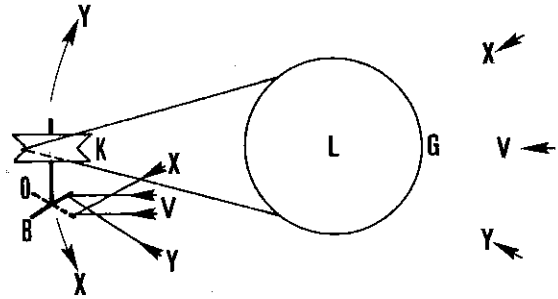
Omdat door uithouder **U** de snaarafstand tussen beide wielen niet kan veranderen zal het trekken van **K** aan de snaar tot gevolg hebben dat snaarwiel **G** wordt afgewikkeld. **Hiertoe moet K zich al draaiend, in de pijlrichting bewegen via draaicirkel C met krui-lager L als middelpunt.**

In afb. 13 gaan we dezelfde situatie nog eens bekijken doch nu wordt **K** door de wind aangedreven.



Afb. 13.

Voor de verklaring van de werking zijn slechts twee schoepen van de kruimolen getekend; de bovenste schoep **B**, de onderste schoep **O**.



Afb. 14.

Afb. 14 laat hiervan nogmaals het bovenaanzicht zien waaruit blijkt dat beide schoepen onder een bepaalde hoek (30 graden) t.o.v. draaiings-vlak zijn opgesteld. Getrokken lijn **B** is de bovenste schoep, streeplijn **O** de onderste schoep. Wanneer de wind uit de richting **V** komt zullen op beide schoepen gelijke doch tegengesteld gerichte krachten optreden welke elkaar opheffen in de draaias van **K**. Gevolg: **K** zal niet gaan draaien en de aan de opstelling gekoppelde windmolen blijft op de wind staan. Wanneer de windrichting gaat draaien en b.v. uit de richting **X** komt dan zal de winddruk op de onderste schoep **O** toenemen terwijl de winddruk op de bovenste schoep **B** afneemt. Gevolg: **K** gaat draaien in de richting **X** en blijft draaien tot de winddruk op beide schoepen weer even groot is.

Veelal worden vier tot acht schoepen toegepast zodat de plaats van een wegdraaiende schoep wordt ingenomen door de volgende schoep waarvoor dan steeds de besproken uitleg geldt.

De situatie voor de windrichting **Y** kan middels dezelfde verklaring als voor **X** worden bekeken.

Vergeet niet dat wiel **K**, via uithouder **U** en draagbalk **A**, met de windmolen **W** is gekoppeld; wanneer **K** de windrichting volgt dan doet de gehele windmolen dit ook.

Vaak worden in plaats van één kruimolen twee kruimolens op één as toegepast. Dat doet echter niets af aan het beschreven principe.

In tegenstelling tot de rotoropbouw is de windservo minder gebonden aan een exakte maatgeving. Dit houdt in dat, met de gegeven uitleg, vrij kan worden gewerkt om dit te realiseren. Om hierin wat ruggesteun te geven worden de onderdelen welke in het prototype werden toegepast, nader omschreven. Zie 'Konstruktie windservo' tek. 12 blz. 40.

DRIE-METER-MOLEN

Gegevens drie meter molen (prototype)

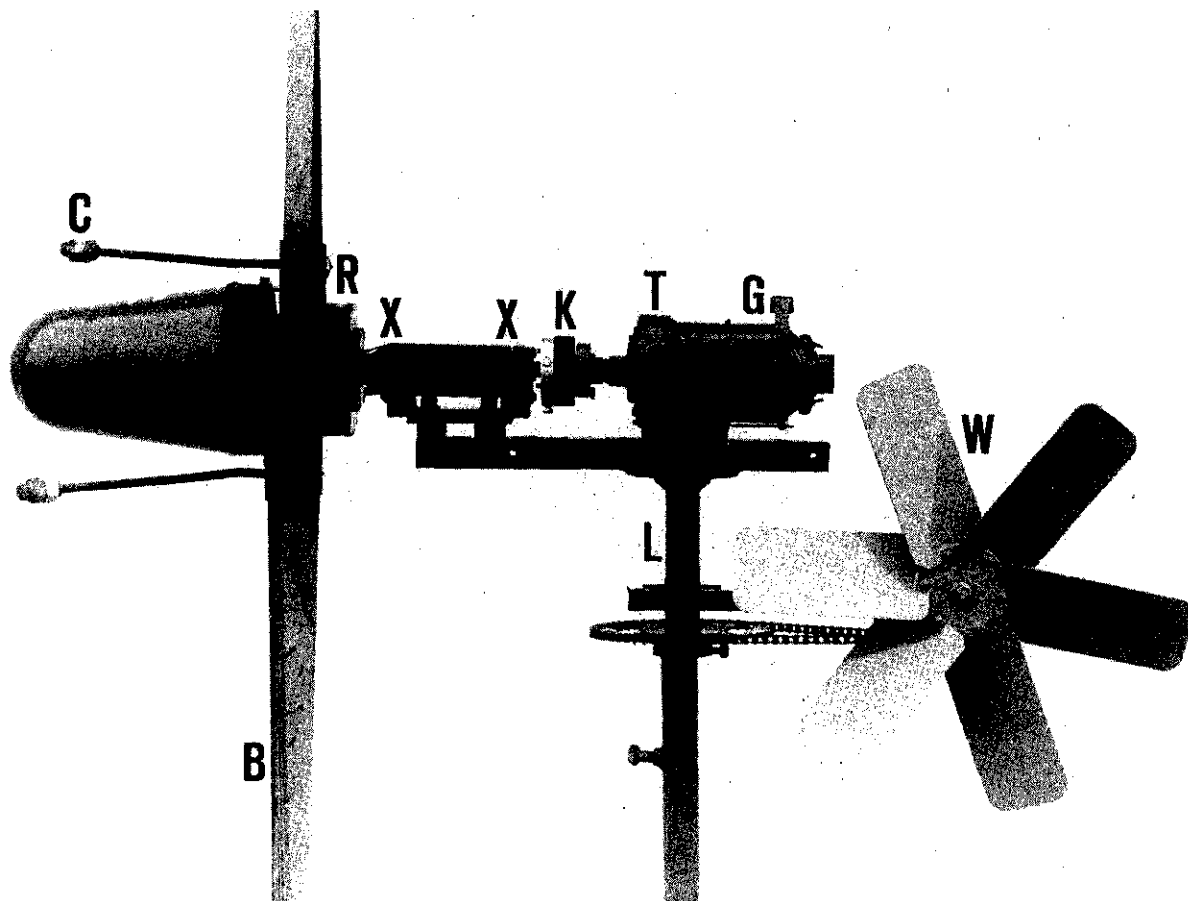


Foto 1. Zijaanzicht drie meter molen.

- B rotorbladen
- R rotorkop
- X lagering rotoras
- K elastische koppeling
- T transmissie 1:10
- G generator
- W windservo
- C centrifugaal gewichten
- L krui-lager

Diameter: 2,91 meter
 Aantal bladen: 2-konstant koorde-konstant spoed
 Snellopendheid λ : 9
 Toerental rotor: max. 430 omw/min
 Bladmateriaal: berkenmultiplex
 Beveiliging: negatieve bladverstelling, elektrische rem

Bladaanloophoek: 25°
 Bladverstelling d.m.v. centrifugaal gewichten
 Transmissie: 1:10 planetair
 Generator: permanent magneet 24 volt D.C. 300 watt

Oriëntatie op wind: windservo (300:1)
 Opslag: 24 volt accu
 Begin lading: 2,5 m/s windsnelheid
 Max. windsnelheid: 25 m/s (boven $V=25$ m/s: molen op rem)

Vrijslag bladtip-maat 45 cm
 Krui-lager: pijp in pijp
 Jaaropbrengst de Bilt: 700 à 800 kWh
 (Jaaropbrengst is sterk afhankelijk van gebruikte generator)

De mechanische konstruktie van de molen is zodanig uitgevoerd dat 700 watt aan elektrische energie kan worden opgewekt bij een rotortoerental van 400 à 430 omw/min. Dit is sterk afhankelijk van de gebruikte generator. De generator uit het prototype (zie hoofdstuk: Generator) geeft in een 28 volts installatie het volgende beeld te zien:

Begin lading bij $V = 2,5$ m/s windsnelheid		
vermogen	bij $V = 3$ m/s	30 watt
"	" $V = 4$ m/s	60 "
"	" $V = 5$ m/s	120 "
"	" $V = 6$ m/s	180 "
"	" $V = 7$ m/s	260 "
vermogen boven $V = 8$ m/s		280 à 300 watt



Met deze opstelling werden allerlei 'molenmetingen' verricht. M.b.v. de rijdende auto kon tot een windsnelheid van 30 m/s worden getest.

(foto: Tineke Griffioen.)

.....Dinsdagavond spookte het al een aardig poosje. Maar..... zo dacht ik, de radio heeft het over windkracht 7 dus laat maar komen. Het werd donker, en ging steeds harder waaien. Ik was bang, maar kon de molen toch niet in. Laatste radionieuws aangezet.....? W.k. 8. De molenkachels deden het zoals voorspeld. Buiten temperatuur was vrij laag, en binnen was het....21° Celcius. En zo gingen we de nacht in. Ik had het lef niet om naar bed te gaan, hoewel ik wist dat ik er toch geen moer aan kon doen. ...Wind nu zuid-west. Het gierde erover. En dan die beruchte uitschieters hè?.... Om drie uur ben ik afgeknapt, en onder de dekens gekropen om niets meer te horen. In gedachte was ik al bezig aan een nieuwe molen.....

BOUWTEKENINGEN

3-METER-MOLEN

Inleiding

Het eindresultaat van langdurig experimenteren is verwerkt in een aantal bouwtekeningen. Alle tekeningen zijn voorzien van een beschrijving welke aanwijzingen geeft inzake het gebruikte materiaal alsmede gegevens welke van belang zijn voor een goede werking van de molen. In de tekeningen zelf zijn om verschillende redenen geen teksten opgenomen. De beschrijving van een tekening is steeds naast de tekening geplaatst. Voor sommige tekeningen is voor de beschrijving ervan meer dan één bladzijde nodig. In zulke gevallen wordt, indien nodig, dezelfde tekening herhaald. Dit voorkomt meer (lastig) geblader in het boek dan nodig is.

Alle maten zijn opgegeven in mm tenzij anders aangegeven.

In de tekeningen zijn omcirkelde cijfers en letters te vinden. De cijfers verwijzen altijd naar een tekening met hetzelfde cijfer waarin dan een gedetailleerde tekening van het betreffende onderdeel wordt aangetroffen. Dus 7 betekent: in tekening 7 valt meer te vinden omtrent bedoeld onderdeel. Een cijfer met daarachter een letter verwijst naar een tekening met hetzelfde cijfer. De letter geeft in de betreffende tekening het gezochte onderdeel aan. Dus 4b wil zeggen: kijk in tekening 4 naar onderdeel b voor

meer gegevens. Omcirkelde letters (dus alleen letters) zijn gebruikt om de tekst te verhelderen en slaan op de tekening welke op dat moment wordt besproken. Overige letters zonder cirkel spreken voor zich tijdens het lezen van de tekst.

Boutmaten zijn opgegeven met M...

Het nabouwen van een ontwerp vereist inzicht in de bedoelingen van het ontwerp. Voor alles is het van belang zich het werkings-principe van de molen goed voor te stellen. Lukt dat eenmaal dan zal de bouw van de molen niet veel problemen geven. Dan ook kunnen de opgegeven tekenmaten vrijer worden gehanteerd en zal vanzelf duidelijk worden welke maten van belang zijn en die waarvan mag worden afgeweken. Dit voorkomt het nodeloos kopiëren van een onderdeelje terwijl het er best wat anders uit mag zien zonder zijn werking te verliezen. Bedenk dat maattekeningen de neiging hebben er erg ingewikkeld uit te zien, zelfs al bij heel eenvoudige onderdelen. Dat is niet gedaan om te pesten maar om zeker te zijn van goed resultaat. Vooral in de windmolen-techniek blijken 'ruwe schetsen' weinig kans van slagen te hebben!

De stand van de rotorbladen in de diverse tekeningen en foto's alsmede het getekende regelmechanisme slaat steeds op systeem A. Dit geldt ook voor de bijbehorende tekst en uitleg. Systeem B komt alleen ter sprake in tekening 11.

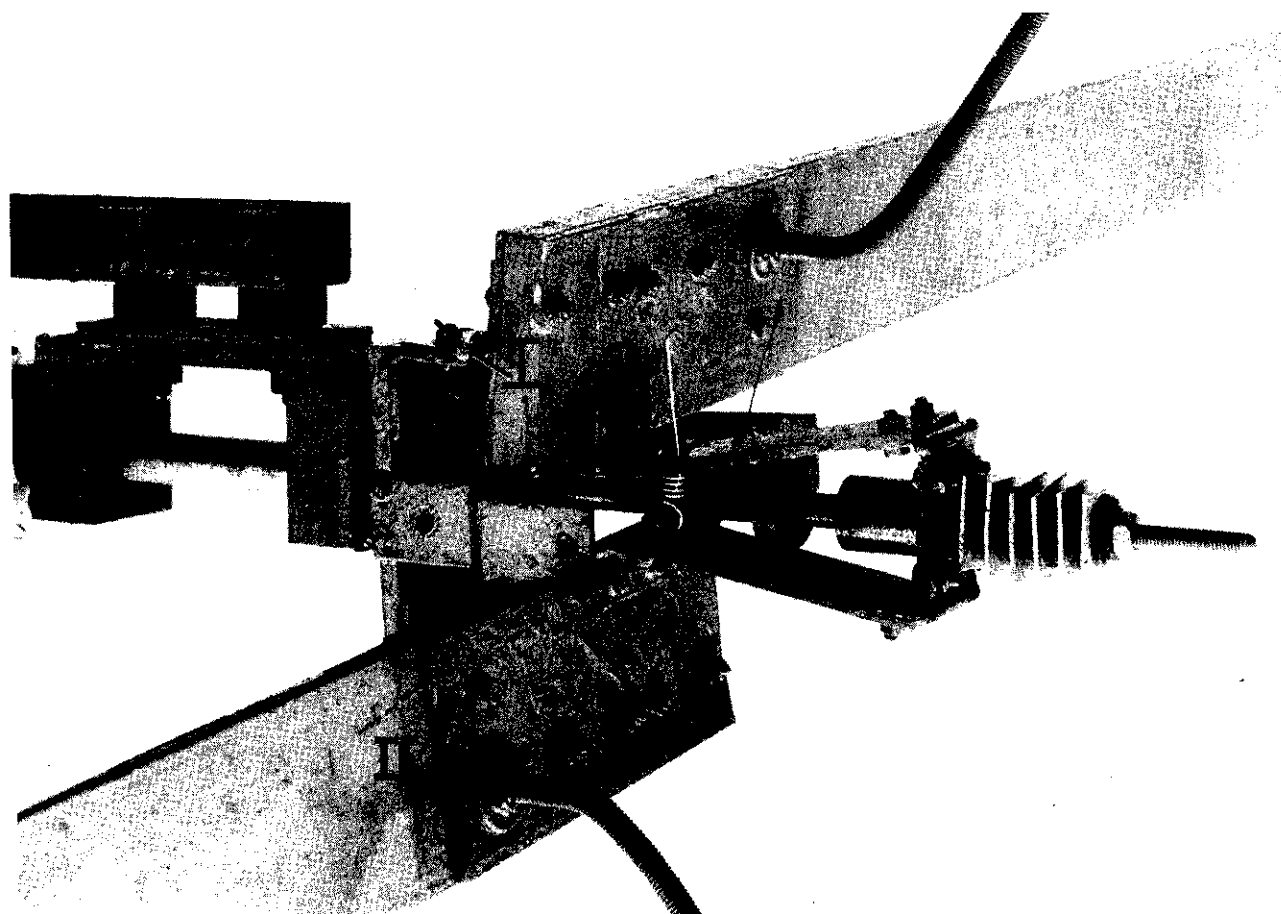


Foto 2. Overzicht bladen met regelmechanisme. Bladen staan in werkstand (aanloopveren losgenomen). I.v.m. 'gelijkenis' tegen tek. 1 is foto op zijn kop afgebeeld.

TEKENING 1

Rotoropbouw (zijaanzicht)

Tekening 1 laat het regelmechanisme van de molen zien met de bladen in de werkstand. *De werkstand van de bladen is dié stand welke na het aanlopen van de rotor is bereikt en waarbij de bladen min of meer loodrecht op de toestromende wind V staan. Hoewel eerder is verteld dat de werkstand 5° (positief) zal zijn moet er op worden gewezen niet al te zeer te denken aan één exacte werkstand. Tijdens het regelen van het toerental zal de bladstand zich voortdurend wijzigen zodat 0° in feite ook een werkstand kan zijn. (Lees in dit verband ook 'Afgelaten systeem A' tek. 10 blz. 36).*

Bovenstaande verklaring is nodig om misverstanden te vermijden tussen tekst, tekeningen en foto's. In vrijwel alle tekeningen is de werkstand weergegeven bij 0° . Bij foto's, waarbij wordt vermeld dat de bladen in de werkstand staan, kan het zijn dat ze inderdaad iets schuin staan. We zullen verderop in de tekst zien dat beide situaties mogelijk zijn.

Goed, we gaan verder met tek. 1.

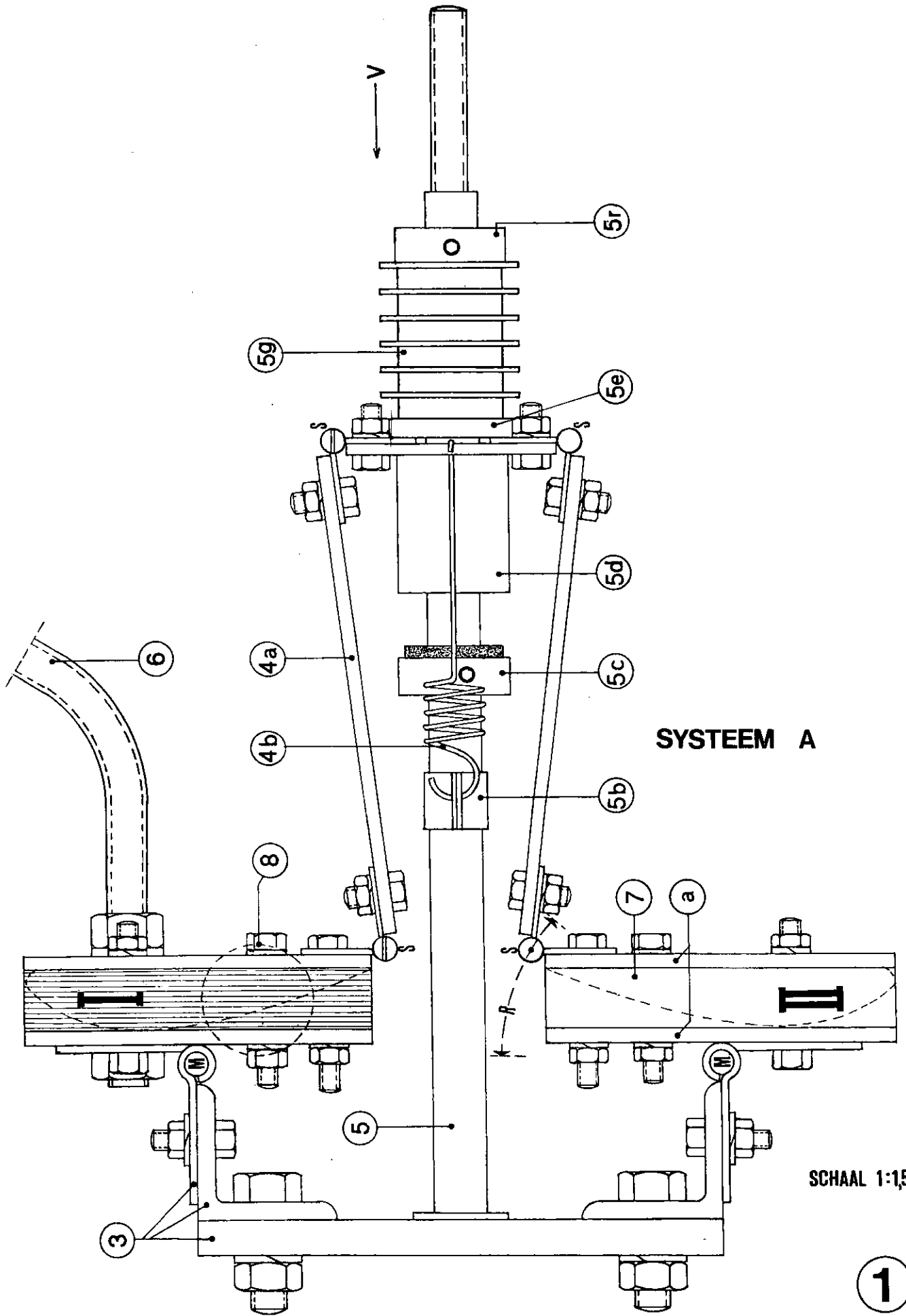
Blad I is van ons afgericht; we kijken hier dus op het gelaagde multiplex waarvan de bladen zijn vervaardigd. Onderdeel 6 is een draadstang welke deel uitmaakt van de centrifugaalgewichten. Zie ook foto 2 blz. 15. Blad II is naar ons toegericht; van dit blad is de draadstang niet getekend.

Ter oriëntatie is de profielvorm gestippeld aangegeven. De rotorbladen I en II zijn tussen versterkingsplaten a ingeklemd en d.m.v. scharnieren draaibaar om scharnierpen M. De bladen kunnen dus draaien in de lengtes om M.

Cirkelboog R laat zien welke beweging het scharnierpunt S, met het daaraan gekoppelde blad 7, bij benadering zal gaan maken gedurende het verstellen van de bladstand.

De beide bladen zijn via twee verbindings-stroken 4a gekoppeld aan bus 5d welke over spindel 5 kan bewegen. Op deze manier worden beide bladen tijdens het regelen **gedwongen eenzelfde beweging te maken** hetgeen uit symmetrie-overwegingen belangrijk is.

De punten S zijn draaipunten van scharnieren welke tijdens het regelen van de bladen hoekveranderingen tussen delen van het regelsysteem toestaan. Plaat 3 is de grondplaat welke via hoeksteunen met met daaraan gemonteerde scharnieren de draaipunten M op hun plaats houden. Onderdeel 5g is een veer, samengesteld uit rubberringen. Bij toenemend toerental zorgt dit pakketje voor de juiste tegendruk van de centrifugaal kracht. De spindelmoer op foto 2 (blz. 15) is vervangen door ring 5r. Het gebruik van een spindelmoer (met een tweede voor de borging) maakt de afregeling wat eenvoudiger doch de konstruktie iets moeilijker omdat de rubbers van het veerpakket niet over de schroefdraad mogen bewegen omdat de rubbers dan slijten. Dit zelf uitzoeken.



SYSTEM A

SCHAAL 1:15

1

TEKENING 2

Rotoropbouw (vooraanzicht)

Tekening 2 laat het vooraanzicht van het regelsysteem zien. We kijken vanuit de richting vanwaar de wind waait. De draairichting van de rotor is aangegeven door pijlen **D**. In deze tekening zijn de draaipunten **M**, gevormd door scharnierpennen **4d** aangegeven door een streeplijn. Om deze draaipunten vindt bladverstelling plaats. Pijl **1** geeft nog eens aan hoe het aanzicht van tek. 1 t.o.v. tek. 2 is weergegeven. Zie ook foto 3. De beste plaats voor de centrifugaalgewichten **Fc** is op de foto gestippeld ingetekend. Door ruimtegebrek op deze plaats zijn de gewichten wat naar buiten gemonteerd. Probeer de gewichten zo dicht mogelijk tegen de centerlijn te monteren.

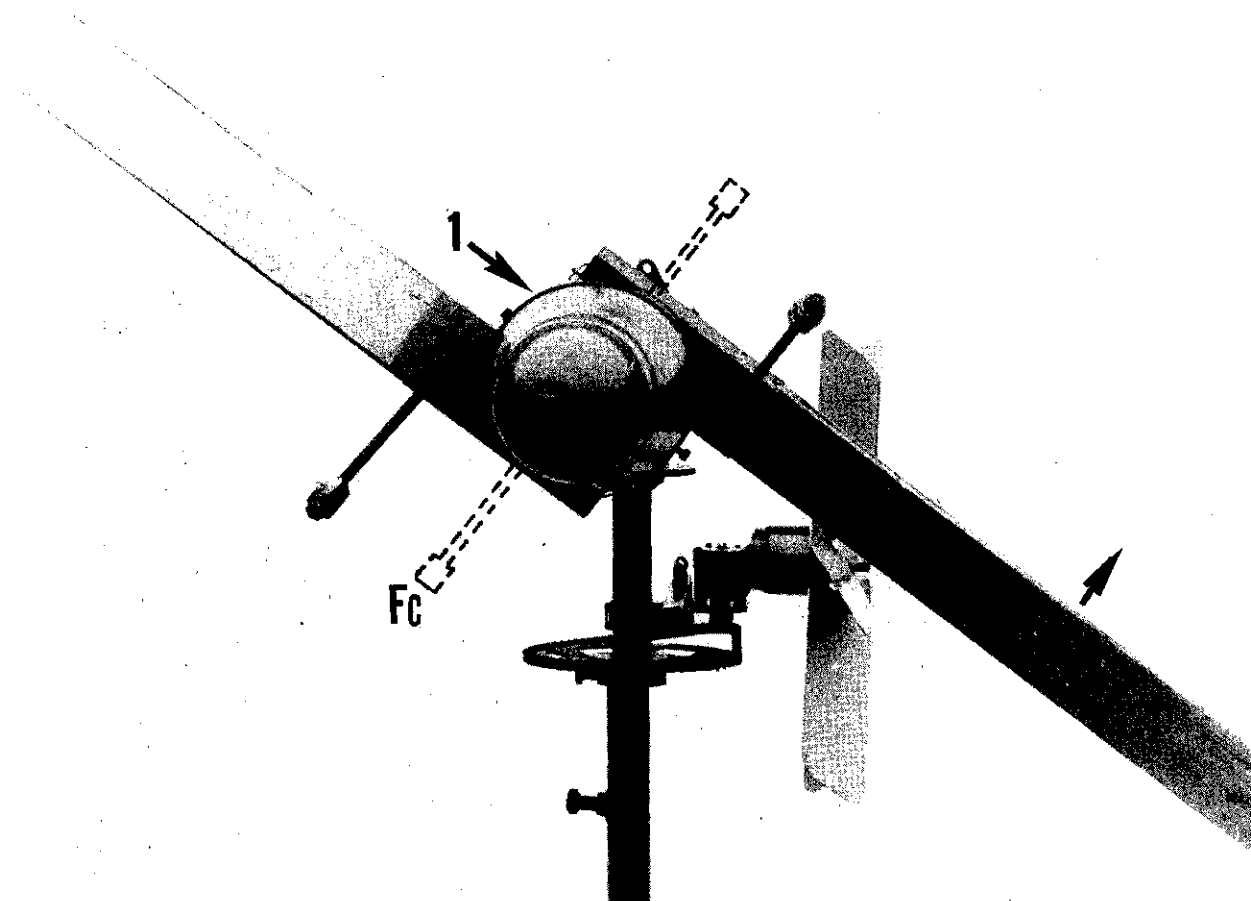
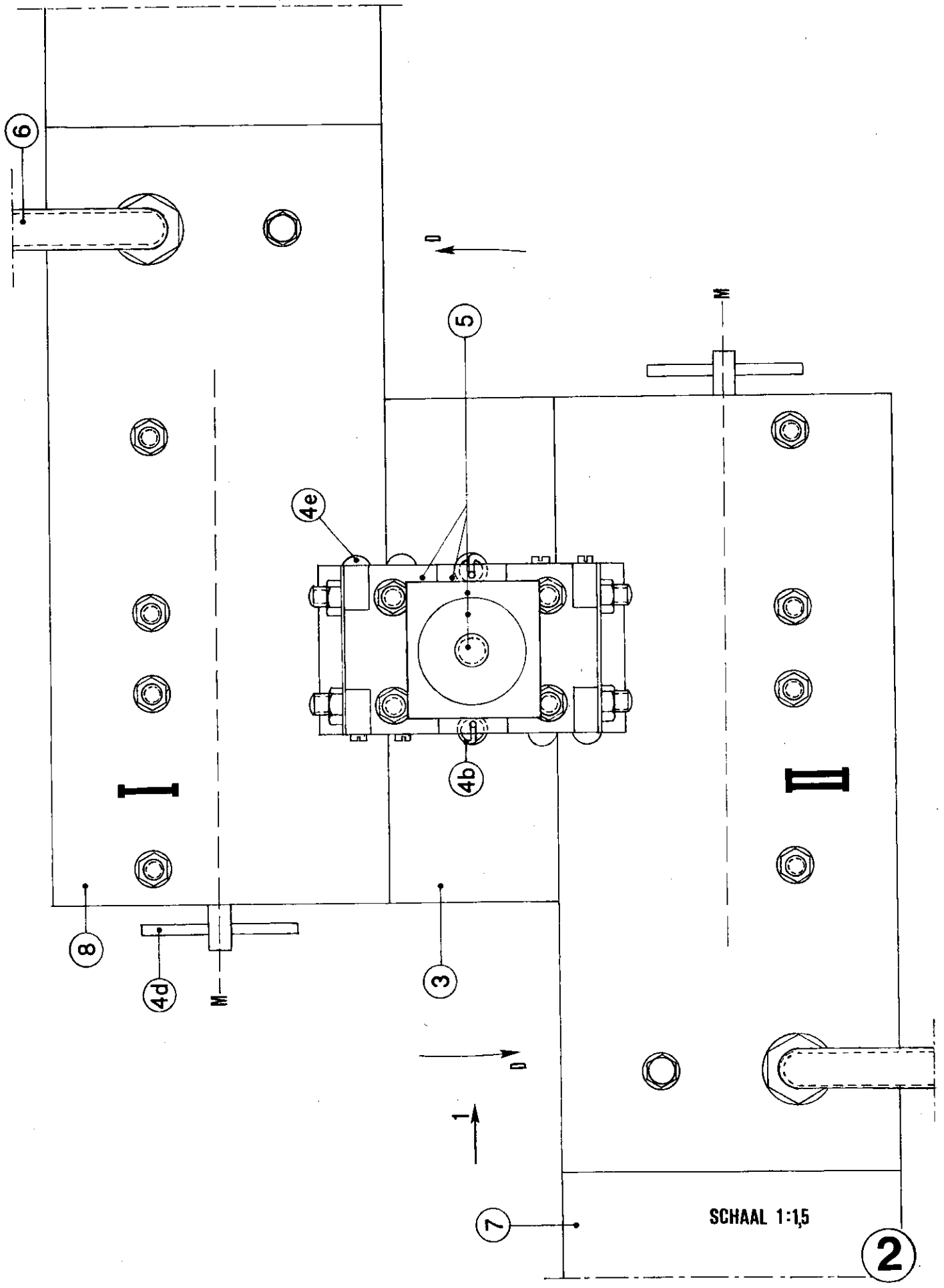


Foto 3. Vooraanzicht molen. Bladen in aanloopstand. Neem nota van de draairichting (linksom). Regelmechanisme is afgedekt met een beschermkap tegen stof.

.....Werd 's morgens wakker en het waaide nog even hard. Radio zei: windkracht 9..... Ik keek naar buiten, en? ...Het spaanse graan heeft..... Jawel. Ik wilde de mast in maar durfde niet. De wind werd nog wilder. Lekker warm in huis en ik de gierzenuwen: Naar binnen,...naar buiten, vingers in m'n oren. Buiten kijken hoe krom de bladen stonden...! Gevloekt en gebeden en me veel voorgenomen in verband met modifikaties.....



TEKENING 3

Grondplaat

Hier drie aanzichten van de stalen grondplaat **a**. Op deze plaat zijn twee stalen hoekprofielen **b** volgens tekening aangebracht. Aan de buitenkanten van de hoekprofielen zijn de vier scharnieren **c1** gemonteerd welke twee aan twee de draaipunten van de bladverstelling vormen. Vooral deze scharnieren moeten **voldoende kwaliteit** bezitten; dus een goede staalsoort en gegalvaniseerd. Beter en mooier zijn scharnieren van R.V.S. (roestvrij staal). Zie 'scharnieren' blz. 54.

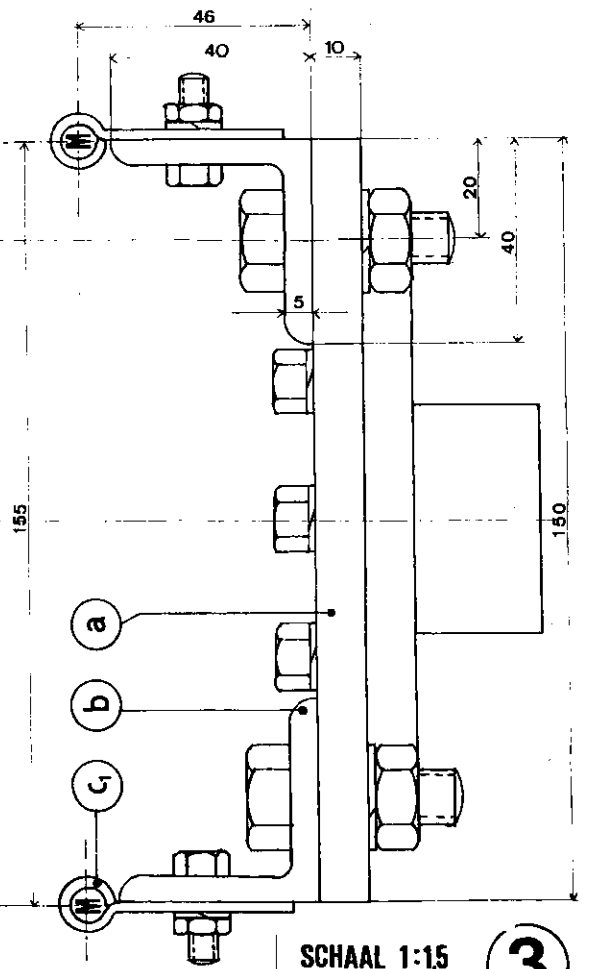
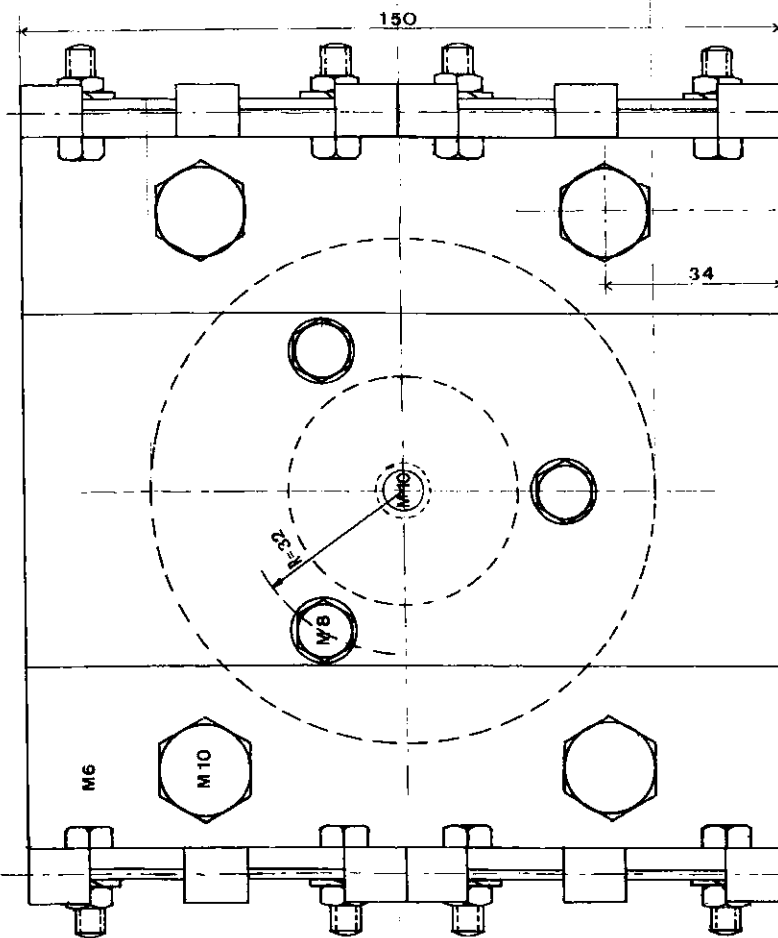
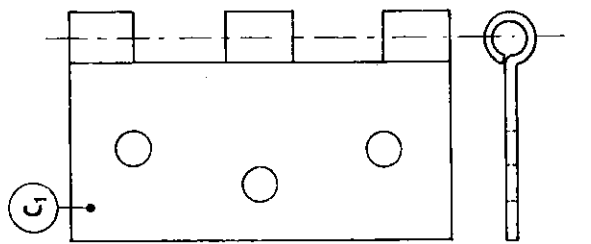
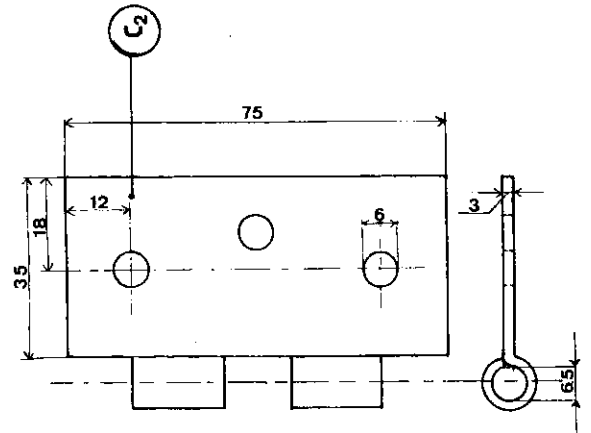
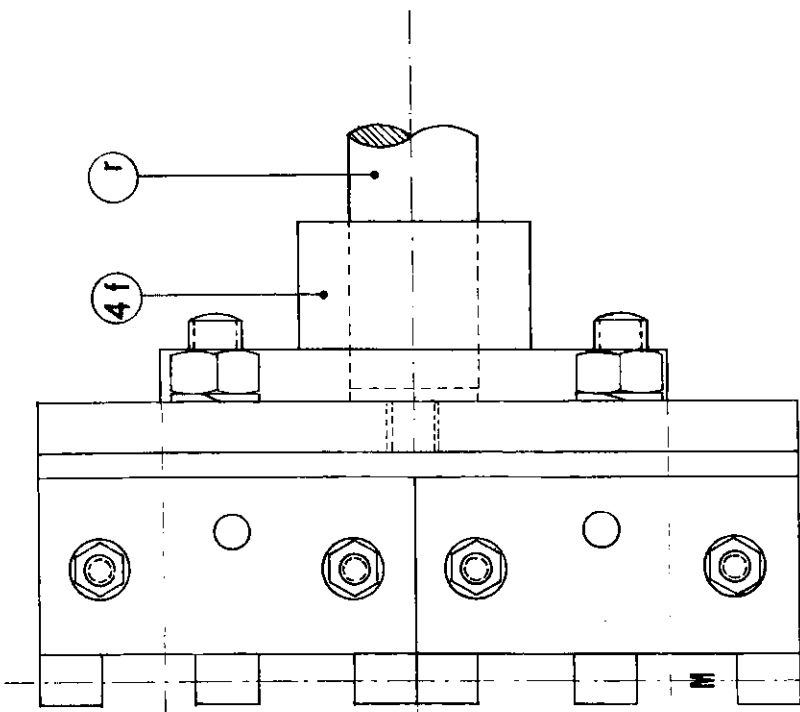
De komplementaire scharnierdelen **c2** worden aan de bladen gemonteerd (tek. 8). De opgegeven maten van de gaten van de grondplaat **a** worden uiteraard aangepast aan de verkregen scharnieren. Niettemin geeft tek. **c1 c2** de **minimale** lengte- breedte- dikte- en pengatmaten van de scharnieren aan. Met behulp van meetgereedschap wordt er voor gezorgd dat beide draai-assen **M** zuiver evenwijdig worden opgesteld terwijl de hartafstand van 155 mm tussen beide assen moet worden aangehouden. Zorg voor bout- en moerverbindingen volgens tekening.

Alle bout- en moerverbindingen met veerring!

De asflens **4f** welke de grondplaat **a** met de rotor-assen verbindt zal in tek. 4 worden besproken.

Onderdelen grondplaat eerst op maat, daarna geheel behandelen met ijzer-menie en laten drogen, dan in elkaar zetten. Bout- en moerverbindingen: Aanbevolen wordt; thermisch verzinkte bouten en moeren met kwaliteit 8.8, of R.V.S.-bouten en -moeren met kwaliteit 80 (zijn wel een stuk duurder). Dit geldt niet alleen voor de rotorkonstruktie, maar ook voor de molenkop (krui-lager, windservo enz.) en mastopbouw.

.....Hele korte momenten van praktische windstilte, zodat de bladen bijna stilstonden, om dan na twee à drie seconden weer te accelereren naar uitschieters van 204 toeren van de prop. Kortom... ik zag hem al aan flarden gaan... Het was inmiddels twaalf uur geworden, en toen.....FLUTTEREN van de bladen..... De verhalen en aanschouwelijke voorbeelden hiervan deden het laatste restje hoop verdwijnen.Ik naar binnen, rond gehold, weer naar buiten. ...Ademloos die flutter horen en.....zien. Het is namelijk ook te zien.....



SCHAAL 1:15

3

TEKENING 4

Diverse onderdelen

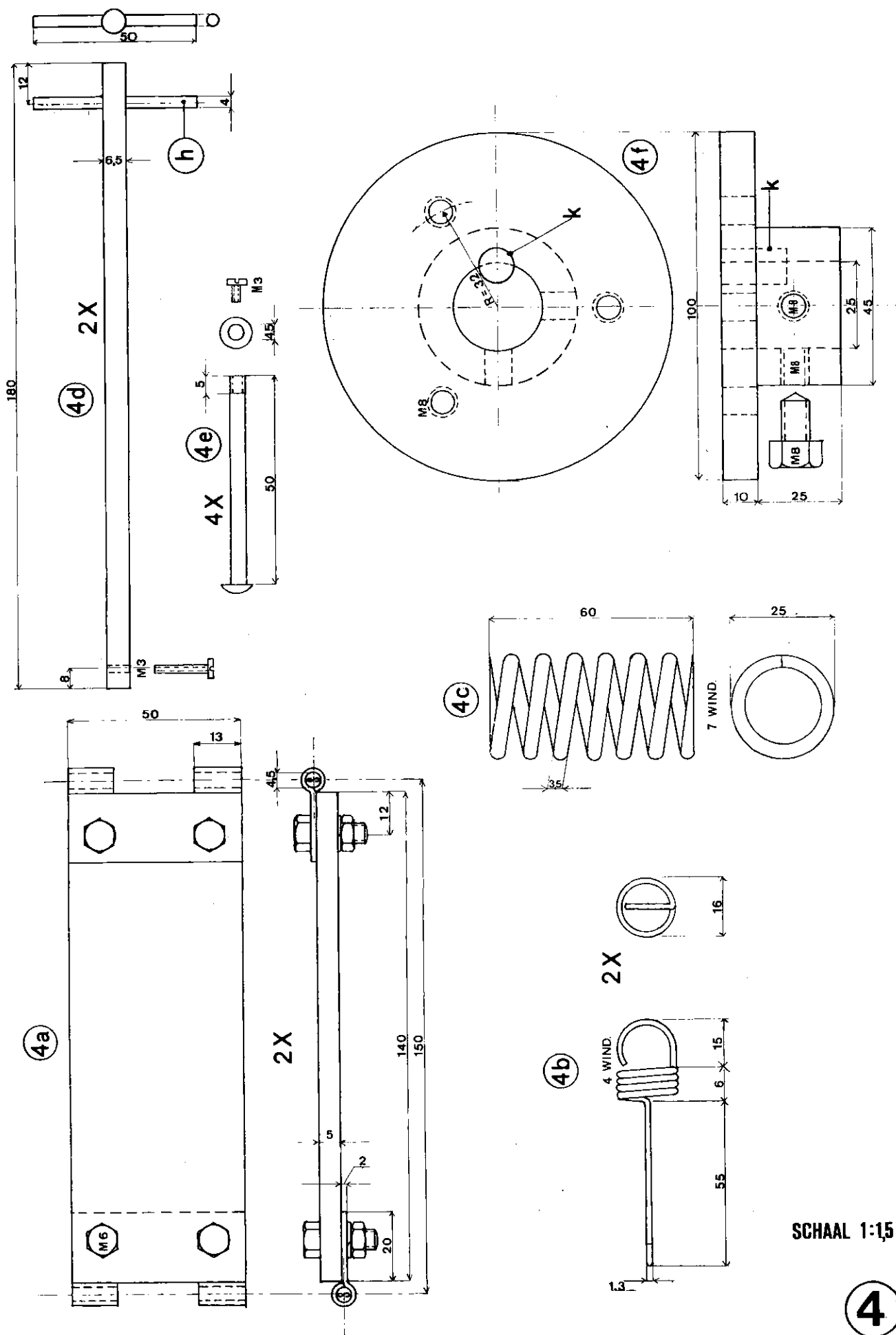
In deze tekening onderdelen van de regeling en de asflens. Tekening **4a** geeft de opbouw en maten van de in tek. 1 genoemde verbindings-stroken. De hartafstand tussen de scharnierpunten **S** zal afhangen van het gebruikte materiaal doch moet wel in de buurt van 150 mm uitkomen. De opgegeven dikte van de stroken geldt voor Alu (aluminium). Voor plaatstaal kan 4 mm worden genomen. De vier messing pennen **4e** vormen de draaipunten **S** van de verbindings-stroken. Borging van de pennen wordt verkregen door boren en M3 draad tappen in de pennen samen met M3 boutjes.

Borging door M3, nu radiaal, wordt eveneens toegepast in de scharnierpennen **4d**. Deze pennen vormen de draaipunten **M** waar om de bladverstelling plaats vindt en vervangen feitelijk de twee achter elkaar staande losse pennen en worden zelf vervaardigd van stafmessing van geschikte diameter. Om tijdens montage of demontage houvast te hebben wordt dwarsstuk **h** aangebracht. De veren **4b** zijn twee molen-aanloopveren. De stalen asflens **4f** is in twee aanzichten weergegeven. Deze flens wordt volgens tekening 3 met drie maal M8 aan de grondplaat bevestigd. In het prototype werd hiertoe drie maal **M8** in de asflens getapt. Bout- en moerverbinding kan natuurlijk ook. Borging van de asflens op de rotor-as wordt verkregen door twee maal **M8** (haaks op elkaar) op de asflens samen met geboorde centers in de rotor-as. Het prototype gaf met deze oplossing geen problemen. Een as met spieverbinding verdient natuurlijk de voorkeur doch is voor velen moeilijk te realiseren.

In de aanzichten **4f** wordt een mogelijkheid aangegeven voor een alternatieve spieverbinding met flens en as. Hiertoe wordt op het scheidingsvlak tussen as en flens een kops gat **K** geboord van 10 mm diam. 20 mm diep. In dit gat komt een spie van 10 mm rond met de juiste lengte. Als spie-materiaal kan b.v. een stukje betonijzer worden gebruikt.

Beide bouten M8 blijven echter gehandhaaft. De veer **4c** kan worden gebruikt wanneer regelsysteem 'B' wordt toegepast. Deze veer komt ter sprake in tek. 11.

.....Als vanuit een impuls rende ik toch de gevarenszone in. (Molenhok). Hoorde, en zag toen dat er niet werd geladen..... Voltmeter op nul.... Windspeed meter op w.k. 8. De beide thermoschakelaars waren uitgevallen! Juist op dat moment was er twee seconden lang een stilte, de bladen waren bezig om snelheid te minderen. Ze deden nog ongeveer 30 à 40 klappen per minuut, toen ik de schakelaars weer inschakelde. De wind kwam er weer volop aan,...de prop reageert, en.... het zaakje liep weer.....



SCHAAL 1:15

4

TEKENING 5

Regelmechanisme

Een belangrijk onderdeel in het toerenregelsysteem is de messing spindel **a** met zijn onderdelen. De tekening geeft o.a. een gedeelde doorsnee en aanzicht van de gehele spindelopbouw. De stafmessing spindel **a** wordt middels M10 aan de grondplaat **3** bevestigd. Van onder naar boven zien we de volgende onderdelen:

- b** Alu beugeltje geklemd op spindel **5**. Dit beugeltje houdt de molen-aanloopveren vast (zie tek. 1, onderdeel **4 b**, blz. 17).
- c** Messing ring welke de aanloophoek van de rotorbladen bepaalt (25 graden).
- h** Ge-olied smeerviltje, minstens 4 mm dik.
- d** Messing bus met aangehechte messingplaat **k** en scharnieren **L** welke over de spindel heen en weer kan glijden.
- e** Messing aanslagring van veerpakket.
- g** Rubber veerpakket welke maximum toerental rotor regelt.
- r** Messing ring voor instelling maximum toerental.
- m** Draadeind M10 overgebleven uit vorige experimenten.

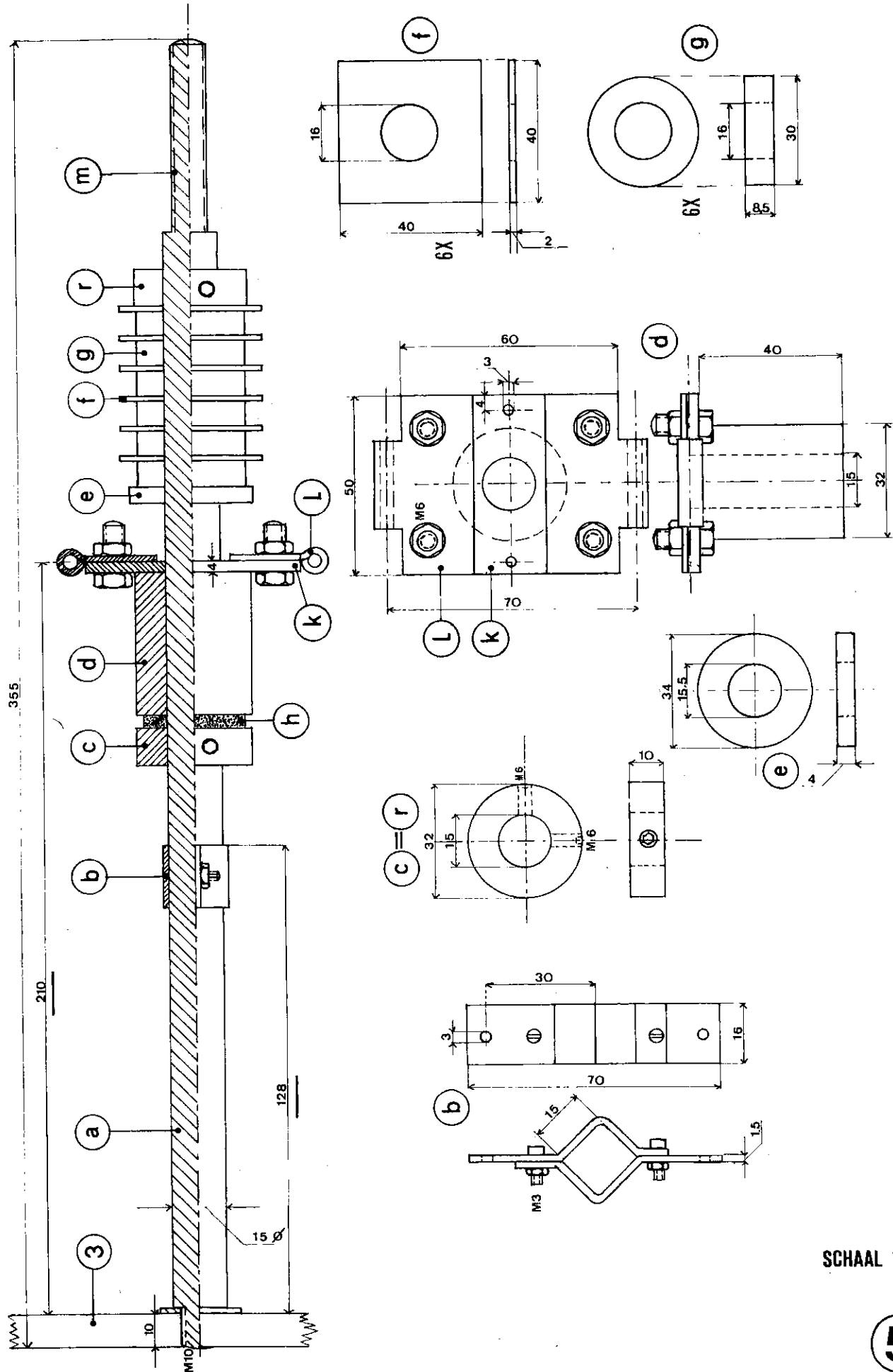
De onderstreepte lengtematen aan de spindel zijn maten zoals deze bij het prototype werden opgemeten en zullen min of meer afhangen van de gebruikte onderdelen. Beschouw deze maten dus als richtlijnen. De spindellengte biedt voldoende mogelijkheid om tijdens het afregelen van het mechanisme de componenten te verschuiven. Draadeind **m** kan achterwege blijven doch houd spindellengte op 355 mm. De messing bus **d** moet passend doch niet moeilijk over de spindel kunnen glijden. (Glijdende passing H8/h6). Let op; de messing bus, messing plaat **k** en de scharnieren **L** vormen samen het onderdeel **d**.

Plaat **k** is 4mm dik, hard gesoldeerd op de kopse kant van de messing bus. Aan deze plaat zijn volgens tekening **d** de scharnieren **L** geschroefd. Dit is tijdens de ontwikkeling van de rotor zo 'gegroeid'. Met wat fantasie kan een eenvoudiger konstruktie worden gevonden. Flenzen, koppelstukken e.d. uit de sanitairbranche bieden hiertoe goede mogelijkheden.

De positie van bus **d** (we spreken nog steeds over tek. 5) is getekend in de aanloopstand van de rotor en wordt door de niet getekende aanloopveren via smeerviltje **h** tegen de ring **c** getrokken. Tijdens het aanlopen van de rotor zal bus **d**, door de werking van centrifugaalgewichten, zich in de richting van veer **g** bewegen. Bus **d** zal hierdoor met de scharnierflanken tegen ring **e** komen te rusten (zie tek. 1). Dit is het aanslagpunt. Deze plaats bepaalt min of

meer de werkstand van de bladen.

Bij toenemend toerental zal **d** verder naar voren komen en zodoende veer **g** indrukken. De veer **g** is samengesteld uit rubberringen **g** en alu plaatjes **f**. Van elk zijn er zes toegepast. Als materiaal voor de ringen **g** kan een auto-binnenband dienen. Met een doorslag worden zoveel ringen geslagen als nodig zijn. In het prototype was dit materiaal 4,25 mm dik zodat voor elk segment twee ringen werden gebruikt. Voor instelling veer zie 'Afregelen systeem A'. Ook hier de gebruikte scharnieren **L**, waarvan de ene helft op bus **d**, de andere helft op de verbindingsstroken (tek. 4a) zijn aangebracht, van goede kwaliteit en gealvaniseerd of R.V.S.



SCHAAL 1:15

5

TEKENING 6

Centrifugaalgewichten

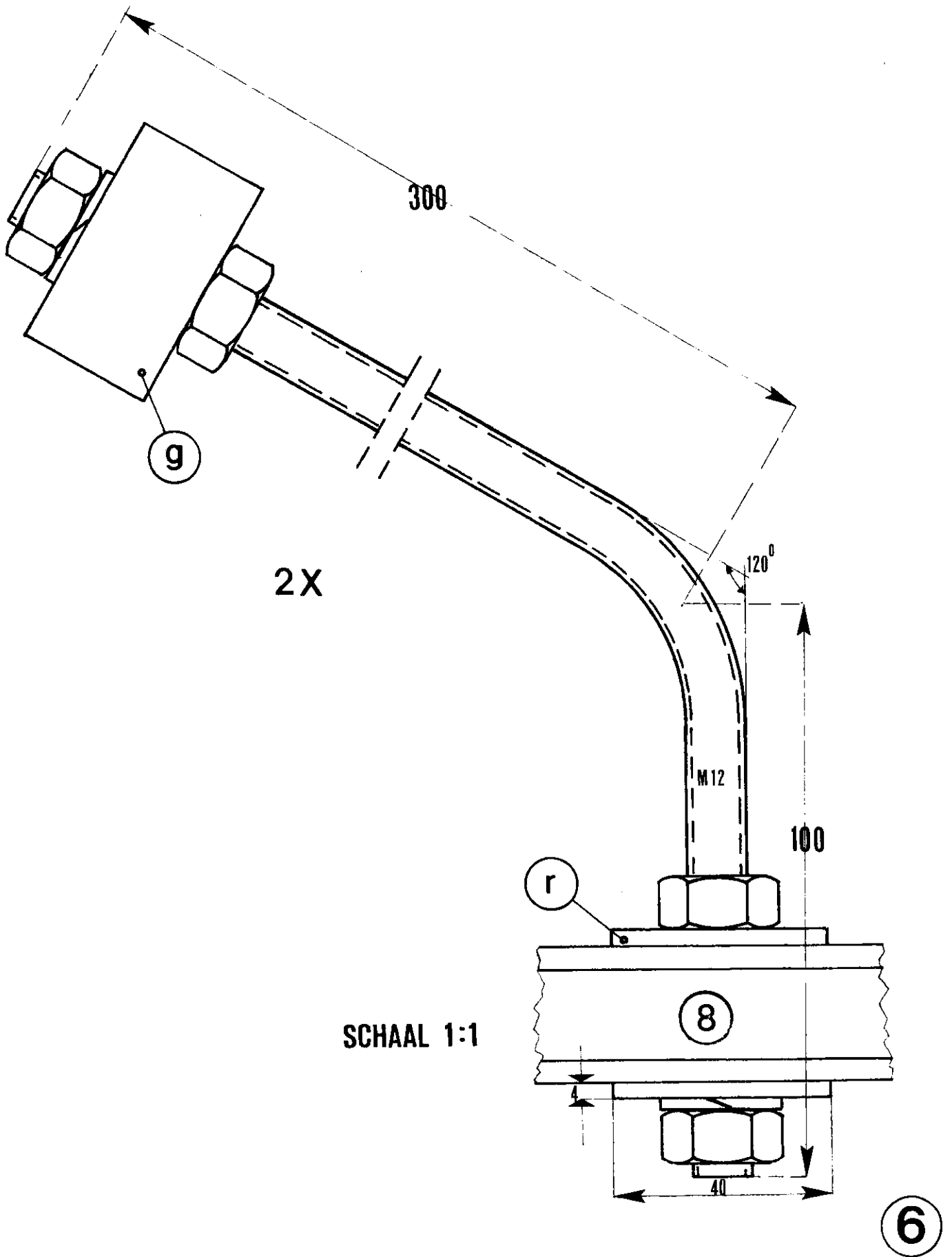
Om bladverstelling mogelijk te maken moet een kracht worden aangewend waarvan de grootte afhangt van het toerental van de molen. Hiertoe is aan elk rotorblad een centrifugaalgewicht gemonteerd. Deze bestaat uit een gegalvaniseerde draadstang M12 met een totale lengte van 400 mm. De draadstang wordt volgens tekening in de bankschroef omgezet. Het gewicht van de draadstang alléén komt op 300 gram.

Gewicht **g** bestaat uit het gewicht van **g**, sámen met zijn bevestigingsmoeren en bedraagt 160 gram. De draadstangen worden in de hiertoe geboorde gaten in de rotorbladen gestoken en vastgezet.

Dit moet echt goed vastzitten!

Beide stalen ringen **r** zorgen ervoor dat het rotormateriaal niet te veel op een kleine plaats wordt samengeperst. Deze ringen zijn in de andere tekening niet opgenomen. Vergeet niet de veerringen aan te brengen! Het gewicht van de bevestigingsmoeren en ringen aan de zijde van het rotorblad kan worden verwaarloosd. De stand van de gewichten kan aan de hand van tek. 1 en 2 worden vastgesteld. Materiaal gewicht **g** in prototype; twee stalen moeren M 20.

.....Dat flutteren heeft ongeveer vier minuten achtereen aangehouden, m.a.w. 800 jaar.... Goed, dit was voorbij, maar de wind nog niet. Ik dacht: Dat pik ik toch niet langer, en ben vijf maal halverwege de mast gekomen maar deinsde terug voor dat geweld. Hierna viel het me op dat er toch een enorme variatie zat in het windaanbod:Donkere wolk? Wind. Wolk voorbij; wind wordt minder.....

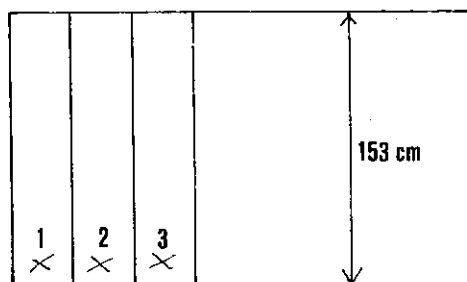


TEKENING 7 EN 7a

Konstruktie rotorbladen

De rotorbladen worden vervaardigd uit berkenmultiplex (watervast verlijmd) van goede kwaliteit, opgebouwd uit acht à twaalf lagen. De dikte 16 à 18 mm. Dit materiaal heeft een hoge buigsterkte, is vormvast en laag in gewicht.

Uit een plaat worden, naast elkaar, drie stroken (1 reserve) gezaagd van 10 cm breed, 153 cm lang (standaardbreedte plaat). De buitenste houtdraad in de lengterichting van de stroken. Zie er op toe dat de plaat, waaruit de stroken worden gezaagd, mooi vlak is, zonder al te grove knoesten. Omdat de lagen waaruit het multiplex is opgebouwd niet altijd even dik zijn, worden de stroken, nog voor ze worden afgezaagd, voorzien van een merkteken. Zie afb. 15.



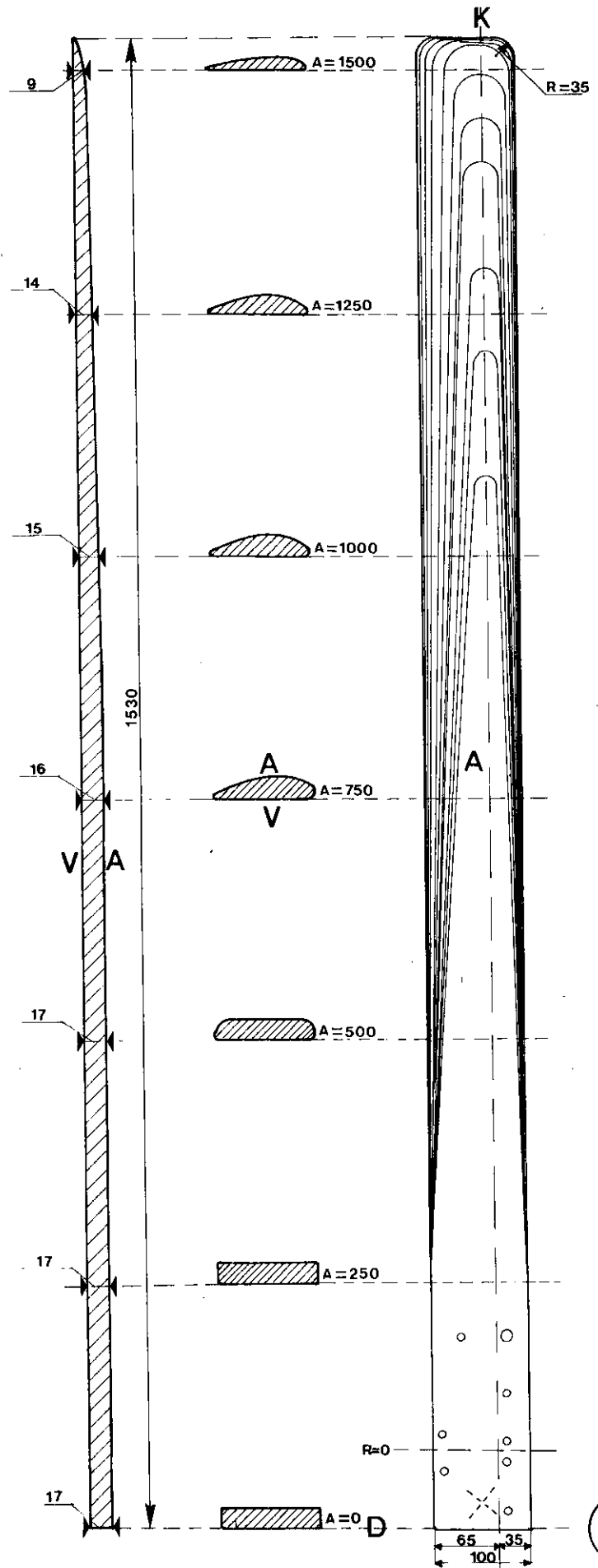
Afb. 15

Dit is nodig omdat de lagen ons gaan helpen bij het aanbrengen van het profiel en op deze manier zijn de verschillen tussen de stroken zo klein mogelijk. Als we nu afspreken dat het merkteken, de wind- of voorzijde van het rotorblad wordt, en tevens de plaats aanduidt waaraan het blad wordt vastgezet tussen de bladinklemming, dan kan er weinig meer fout gaan.

De lengte van de bladen is niet direct maatgevend voor de diameter van de molen vanwege de overlap aan de grondplaatconstructie. Deze overlap zal afhangen van de afmetingen van de gebruikte onderdelen (scharnieren e.d.). De maten bij de koorde-doorsneden zijn gerekend vanaf het begin van het blad ($A=0$) en niet vanaf de plaats waar de straal (R) nul is. Zie tek. 7.

Afwijkingen in de uiteindelijke molendiameter die kleiner zijn dan plus of min 6% t.o.v. 3 meter hebben, gerekend vanaf de tip, geen gevolgen voor de maatvoering van de rotorbladen. D.w.z.; binnen deze grenzen kunnen bladbreedte (kooorde) en bladdikte (kooorde-dikte) volgens tekening worden gemaakt.

.....Ben uiteindelijk toch boven in mast gekomen. Heb de servo eraf gekregen, naar beneden gedonderd, en zelf was ik er ook gauw uit. Op weg naar beneden dacht ik in een flits:...het zou wel leuk wezen als ik je kon doorgeven hoe nú de temperatuur was van de motorreductor.... Maar je kon de pot op.....



Profilering

Op tek. 7 zien we op welke plaats het blad wordt voorzien van een profiel. De achterzijde van het blad is steeds aangegeven door **A**. De voorzijde door **V**. De tekening rechts laat de achterzijde van het blad zien, die zijde dus waar het profiel wordt aangebracht. Het (gestippelde) merkteken \times ligt dus naar onderen op de werkbank. Op deze plaats wordt de strook met een klem vastgezet. We schaven van ons af in de richting van de tip van het blad. Het blad wordt eerst op dikte gebracht. Hiertoe bekijken we de middelste en linker tekening waar zeven koorde doorsneden zijn getekend. Bij elke doorsnede is de afstand vanaf het begin (**D**) van het blad aangegeven (0 mm - 250 mm - 500 mm enz.). Tevens is de grootste dikte op die plaatsen vermeld. We weten dus precies hoeveel we moeten weg nemen. Wanneer de stroken wat dikker zijn, b.v. 18 mm dan laten we het blad aan de wortel natuurlijk op deze dikte. Die één mm wordt geleidelijk over het blad weggenomen zodat bij zeg maar $A = 750$ de gewenste dikte van 16 mm is bereikt. Pas op; bij gebruik van nog dikker multiplex komen we in ruimtenood bij de spindel van het regelmechanisme.

Het is verstandig niet direkt naar de gewenste dikte te werken zodat we nog wat overhouden voor scheuren e.d. Hierna wordt het profiel geschaafd. Wie niet op gevoel kan werken kan van de getekende doorsneden op tek. 7a malltjes knippen en daarmee het werk controleren. Voor dit doel is deze tekening op ware grootte weergegeven. (Tekening overtrekken en uitknippen). Met een goede scherpe houtschaaf hebben we in drie kwartier het blad schuurklaar. Met grof resp. fijn schuurpapier wordt het blad mooi glad gemaakt waarbij zorg wordt besteed aan de volgende punten:

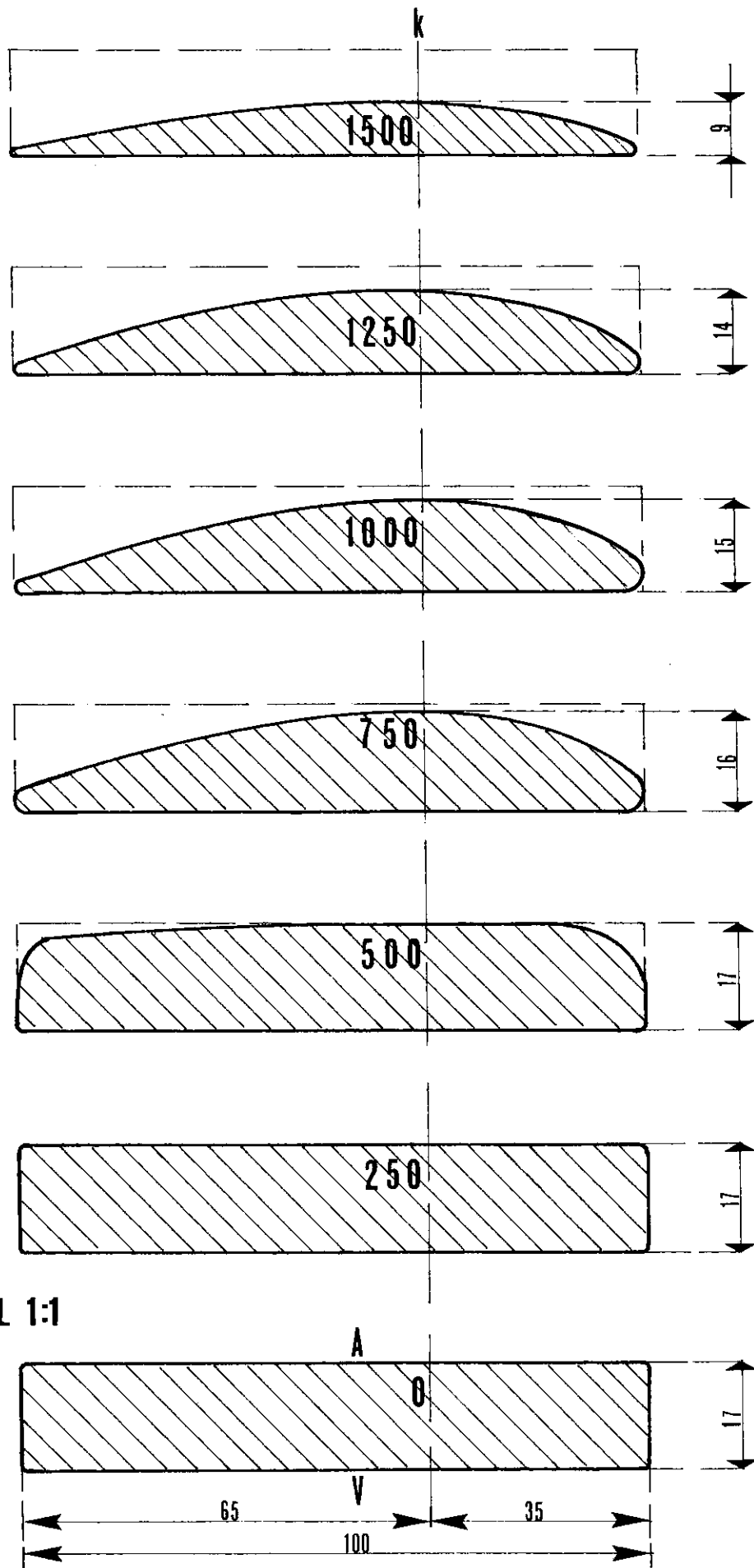
Afronding tips volgens tek. 7. We zien hier dat vanaf de laatste doorsnede ($A = 1500$) het blad aan de hoeken is afgerond met een straal van 35 mm ($R = 35$). De getekende lijnen geven ongeveer aan wáár en hóé de multiplex-lagen in elkaar overgaan. Op de linker tekening is de lengtedoorsnede van het blad weergegeven (dus doorsnede lijn **K** van rechter tekening). Het laatste stukje van de tip (vanaf $A = 1500$) wordt snel dunner.

Door deze bewerkingen wordt een mooie overgang verkregen tussen blad en vrije lucht hetgeen een gunstige bijdrage is voor een laag geluidsniveau tijdens draaien van de rotor. De burens kunnen dus vrienden blijven. De functie van de lagen waaruit het berkenmultiplex is opgebouwd is lastig te omschrijven doch wanneer het tweede blad wordt bewerkt zal duidelijk worden dat deze lagen informatie verschaffen over de 'gelijkheid' van de bladen. Probeer hier veel gebruik van te maken. Verder is het noodzakelijk af en toe het gewicht van de bladen met elkaar te vergelijken. Wanneer het ene blad wat zwaarder is dan het andere, moet van het ene blad materiaal worden weggenomen. Voordat we dat doen laten we beide bladen even balanceren op een scherp voorwerp. Na wat denkwerk wordt dan vastgesteld waar correcties moeten worden aangebracht.

Gatenpatroon

In tek. 7 zien we ook het gatenpatroon voor de inklemming e.d. Voor gegevens hierover moet tek. 8 worden geraadpleegd. Eerst gaten boren, daarna profileren danwel andersom, kunnen we het beste laten afhangen van de volgorde waarin de onderdelen worden verzameld.

Tot slot nog een tip: Wanneer de bladen, om welke reden dan ook, enige tijd niet worden gebruikt, berg ze dan samen op in eenzelfde ruimte zodat, i.v.m. het vochtigheidsgehalte hetzelfde gewicht blijft gehandhaafd.



SCHAAL 1:1

7_a