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 Beproevings-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 Inspektie, smering, onderhoud

ALGEMENE WENKEN EN GEGEVENS

54 TV storing
54 Buiskonstrukties 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 krachtenspel 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 effektieve methode is om de drijvende kracht in het wiekstelsel onder kontrole te houden. Een voorbeeld hiervan is de Hollandse molen waarvan, bij te sterke wind, zeil wordt weggenomen waardoor de molen minder effektief 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 gekontroleerd.
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 ongekontroleerd 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 bepaalde 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 dezélfde richting waarin de molen uit de wind wordt gezet. Hierbij moeten zowel de kruihoek 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 tweebladige rotoren echter is dit systeem beslist af te raden.
De in het voorbeeld aangehaalde toerentallen en krui-hoeken 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 effektieve 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 bezien 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

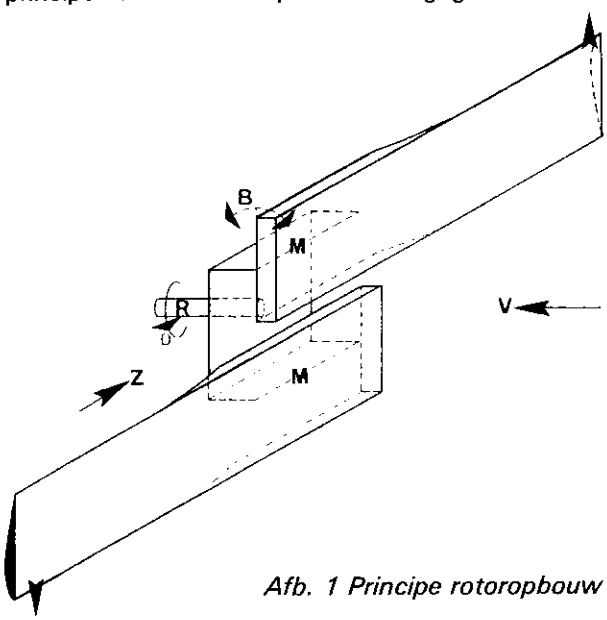
worden verkregen was het voor mij de moeite waard om ook hiermee een aantal experimenten uit te voeren. Het experiment dat het beste resultaat gaf en bovendien niet al te moeilijk is te bouwen, is verwerkt in de, in dit boekje beschreven, zelfbouw-ontwerpen.

In het algemeen kan worden gesteld dat een toeren-beveiliging van een molen moet zijn gebaseerd op een, uit de wind of toerental afgeleide grootheid 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 kombinaties van de genoemde beveiligings-methoden.
Windmolens moeten altijd zijn voorzien van een goedwerkende rem.

WERKINGSPRINCIPE BLADVERSTELLING

Systeem A en systeem B

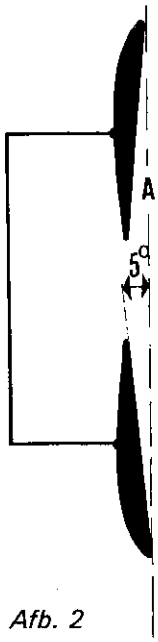
Omdat straks door de lezer zélf een beslissing kan worden genomen voor wat betreft de keuze van het regelsysteem zal de werking van het bladverstelme-chanisme nader worden bekeken. In afb. 1 is het principe van de rotor-opbouw weergegeven.



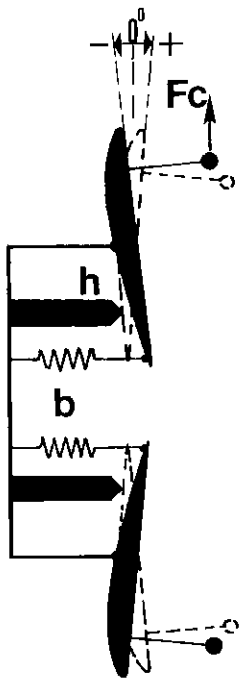
Afb. 1 Principe rotoropbouw

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 pijlrich-ting **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 toege-past 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 vol-gend 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 draai-ings-vlak **A** staan opgesteld. Voor dit ontwerp blijkt dit een gunstige werkstand te zijn hoewel kleinere hoeken ook nog prima werken.



Afb. 2



Afb. 3

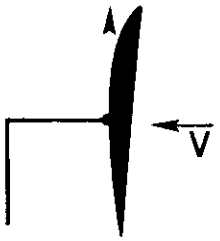
Voor het regelen van het toerental kunnen nu twee methoden worden gevolgd welke elk voor zich, aerodynamisch gesproken, totaal verschillende uit-gangspunten hebben.
Beide systemen vragen echter om een kracht wel-ke, afhankelijk van het toerental, in staat moet zijn de bladen te verstellen.
Hiertoe worden, in ons geval, de centrifugaalge-wichten **c** geïntroduceerd welke tijdens het draaien van de rotor een kracht **Fc** in pijlrichting leveren.

Systeem A

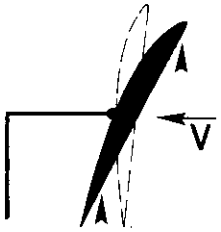
Bekijken we nu eerst systeem A in afb. 3. De bladen worden door veren **b** tegen stuitpunt **h** getrokken waardoor de werkstand is vastgelegd (streeplijn blad). Boven een bepaald toerental wordt de kracht **Fc** sterker dan de veerspanning en trekt het blad met zich mee. De bladhoek t.o.v. het draaivlak wordt dus eerst kleiner, tot aan nul graden, daarna weer groter maar is dan **negatief**.
Deze aktie heeft tot gevolg dat de invalshoek van de relatieve wind op het blad zover kan worden ver-groot 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. Alvo-rens andere regelmogelijkheid (systeem B) te om-schrijven 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.

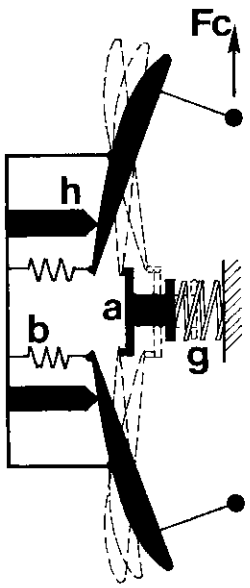


Afb. 5
Met aanloopstand.
Hoog aanloopkoppel.

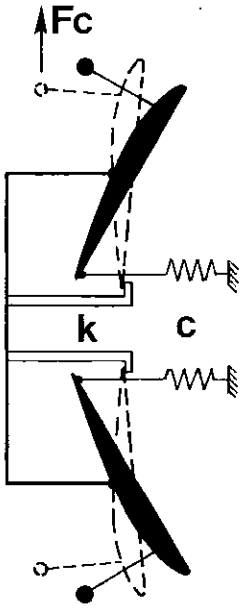
Het blijkt nu dat systeem A zich goed leent om ook de aanloopprocedure voor zijn rekening te nemen. Dit komt omdat verdraaiing van de bladstand, zowel bij aanlopen als bij het regelen naar de overtrek positie, in éénzelfde richting kan plaatsvinden. Het principe van systeem A komt er tenslotte uit te 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 **Fc** 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 **Fc** 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 **Fc**, 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' effekt 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 hoofstuk sprake was.

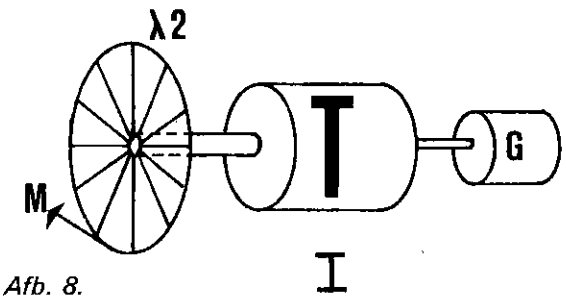
Welk systeem?

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 mét 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 veerkonstruktie in systeem A is de regeling zodanig verbeterd dat vermogensreduktie 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.

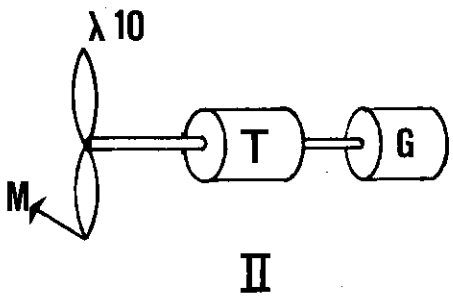
Startkoppel

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 sekonde 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 snellopend-heid 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 T (transmissie) in molen I, 3,5 maal zo zwaar zal uitvallen en 2,5 maal meer zal kosten dan die van molen II, (gegevens katalogus) 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 profielkonstruktie 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.

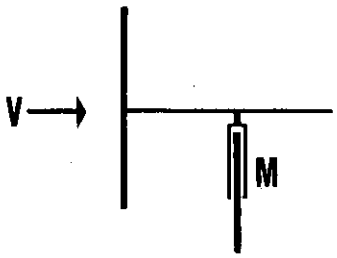
Afmetingen generator

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 onverbrekelijk 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 genoegen 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 schoenendoos; 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 vertikale as M (zie afb. 9). Dit kruien kan op verschillende manieren plaatsvinden;



Afb. 9.

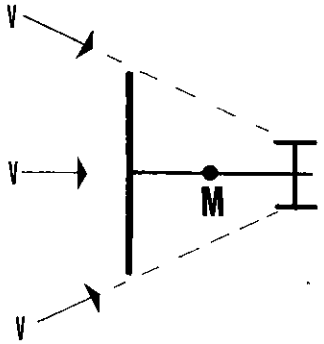
1 handkruien
2 door windvaan
3 windservo (windroos)
4 elektro mechanische servo
5 kruien door zelfrichtend effekt van de windmolen.

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

1 Handkruien kan worden toegepast op plaatsen waar een nagenoeg konstante windrichting heerst. De vertikale 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.

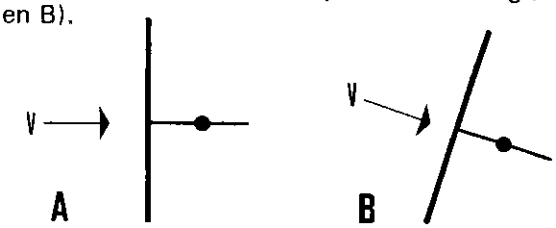


Afb. 10.

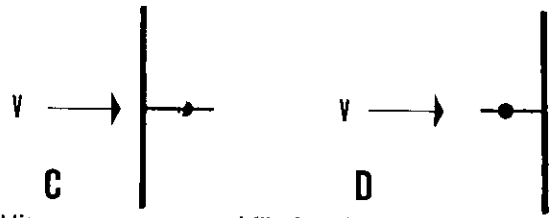
Het draaien van de kruimolen houdt op wanneer deze zichzelf uit de wind heeft gezet. De grote molen staat dan weer goed op de wind.
In het hier besproken molenontwerp wordt van een windservo gebruik gemaakt (zie 'windservo' blz.11).

4 Een nadere manier van kruien kan plaatsvinden door een elektro-mechanische servo.
Een (kleine) elektromotor met tand- of wormwiel vertraging kan de vertikale 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 krui-as kontinue worden vergeleken met de stand van de windvaan (terugkoppeling).

5 Sommige molensystemen plaatsen zich op de wind door het zelfrichtend effekt 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 effekt 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 faktoren.
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-traagheids 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 tweebladige 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 effekt reduceren doch in dat geval moeten we de voordelen van de tweebladige 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 windrichtingsveranderingen volgen, hierbij nog geholpen door het zelfrichtend effekt 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 kontrole worden gehouden. Overtuigend is volgens mij het feit dat een aantal gerenommeerde windmolenfabrikanten 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 langzaamkruiend 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

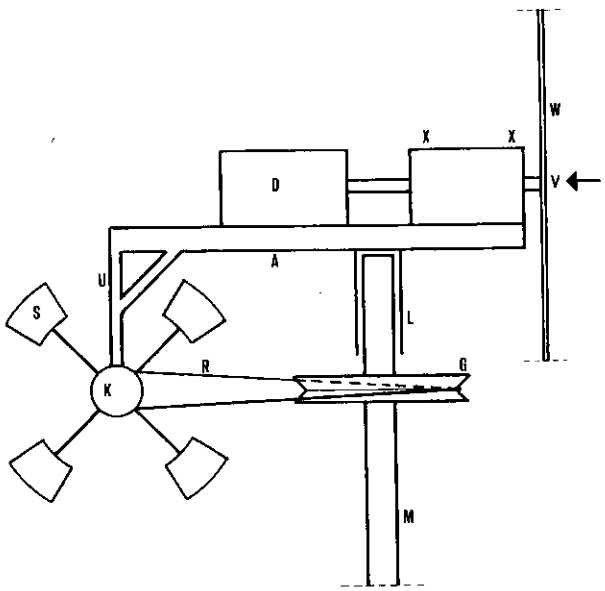
In hoofdstuk 'Oriëntatie op de wind' hebben we gezien om welke reden dit molenontwerp is voorzien van een windservo. In het hierna volgend gedeelte zal verder worden ingegaan op de werking van de windservo. Tevens zal met bouwtekeningen worden aangegeven hoe dit kan worden gerealiseerd. Voor sommigen 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

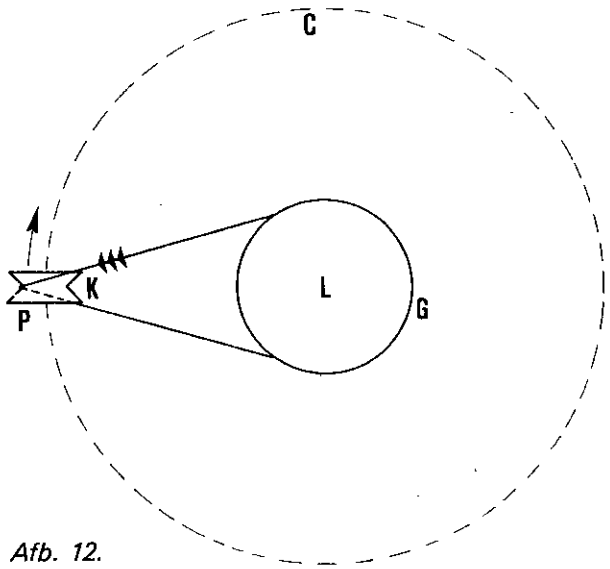
In afb. 11 zien we de basisdelen van de molen met windservo schetsmatig weergegeven.



Afb. 11. Basisopstelling molen met windservo.

M is de mast met daaraan vást 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 sámen 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.

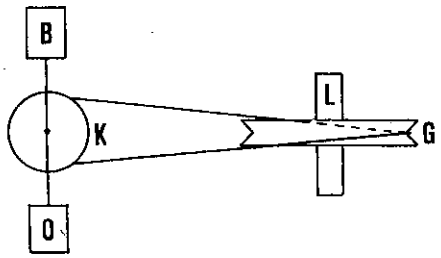
Wanneer we de bladen **S**, dus ook het daaraan gekoppelde snaarwiel **K**, met de hand gaan draaien dan zou, via snaar **R**, snaarwiel **G** worden aangedreven en willen meedraaien. Snaarwiel **G** kan echter niet meedraaien omdat deze aan de mast **M** is gefixeerd. Wanneer **G** niet kan draaien 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.

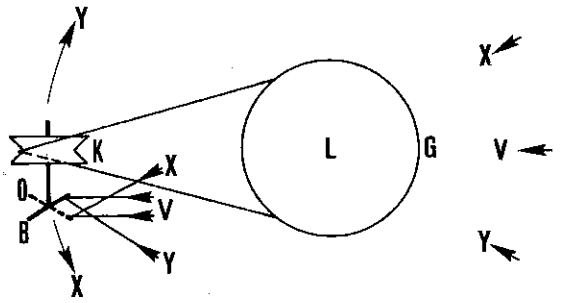
Omdat door uithouder **U** de snaarafstand tussen beide wielen niet kan veranderen zal het trekken van **K** aan de snaar tot gevolg hebben dat snaarwiel **G** wordt afgewikkeld. **Hiertoe moet K zich al draaiend, in de pijlrichting bewegen via draaicirkel C met krui-lager L als middelpunt.**

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)

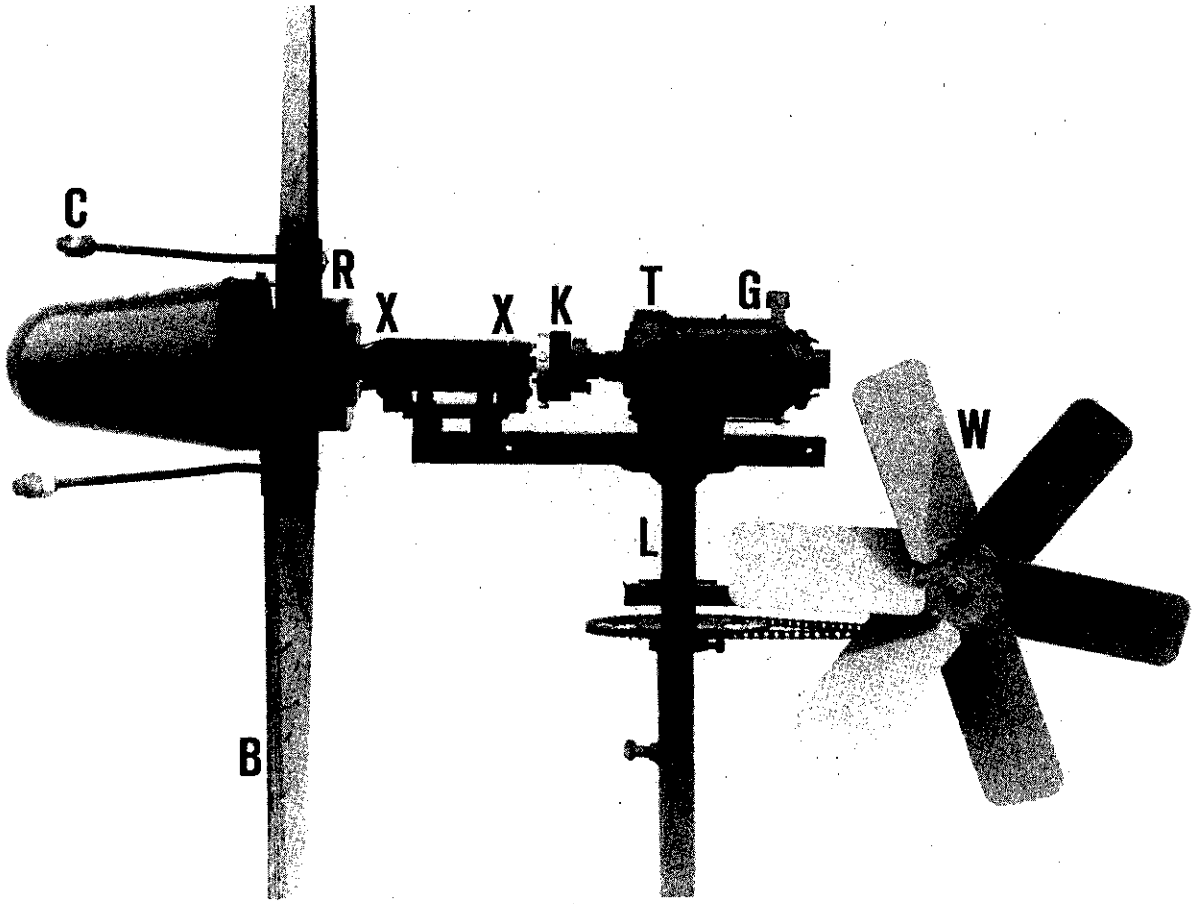


Foto 1. Zijaanzicht drie meter molen.

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 onderdeeltje 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.

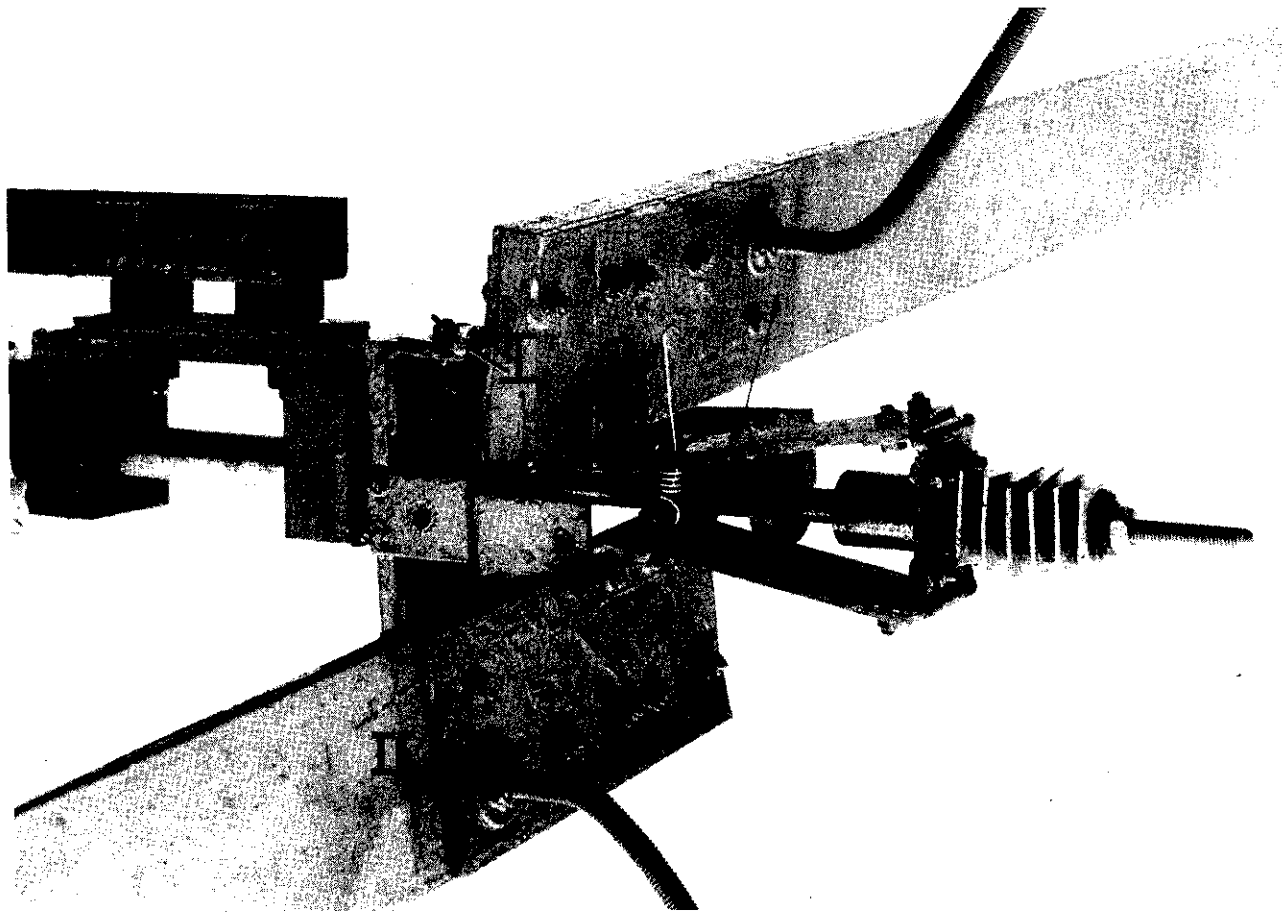


Foto 2. Overzicht bladen met regelmechanisme. Bladen staan in werkstand (aanloopveren losgenomen). I.v.m. 'gelijkenis' tegen tek. 1 is foto op zijn kop afgebeeld.

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 'Afregelen 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.

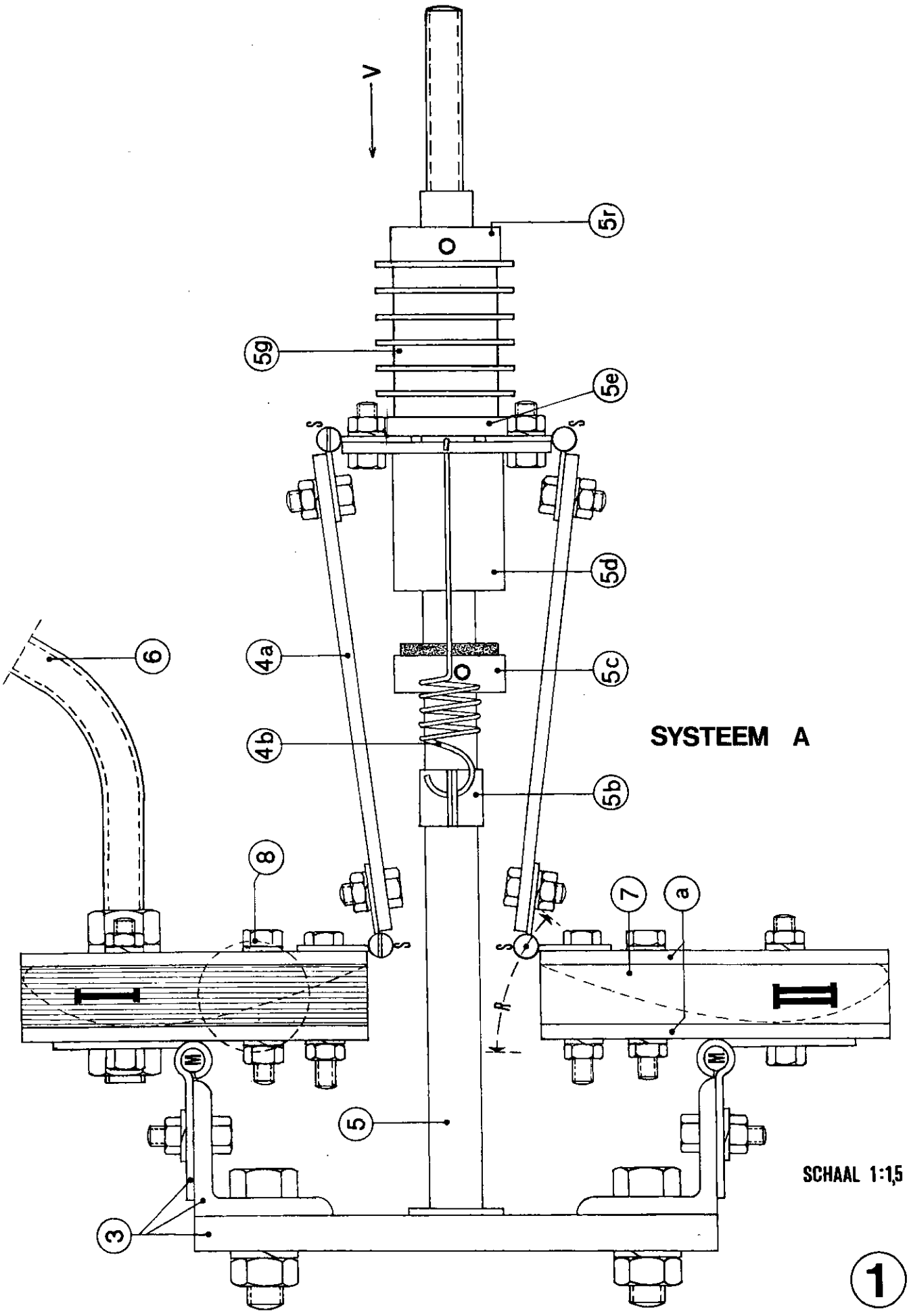
Blad **I** is van ons afgericht; we kijken hier dus op het gelaagde multiplex waarvan de bladen zijn vervaardigd. Onderdeel **6** is een draadstang welke deel uitmaakt van de centrifugaalgewichten. Zie ook foto 2 blz. 15. Blad II is naar ons toegericht; van dit blad is de draadstang niet getekend.

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



SYSTEEM A

SCHAAL 1:1,5

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.

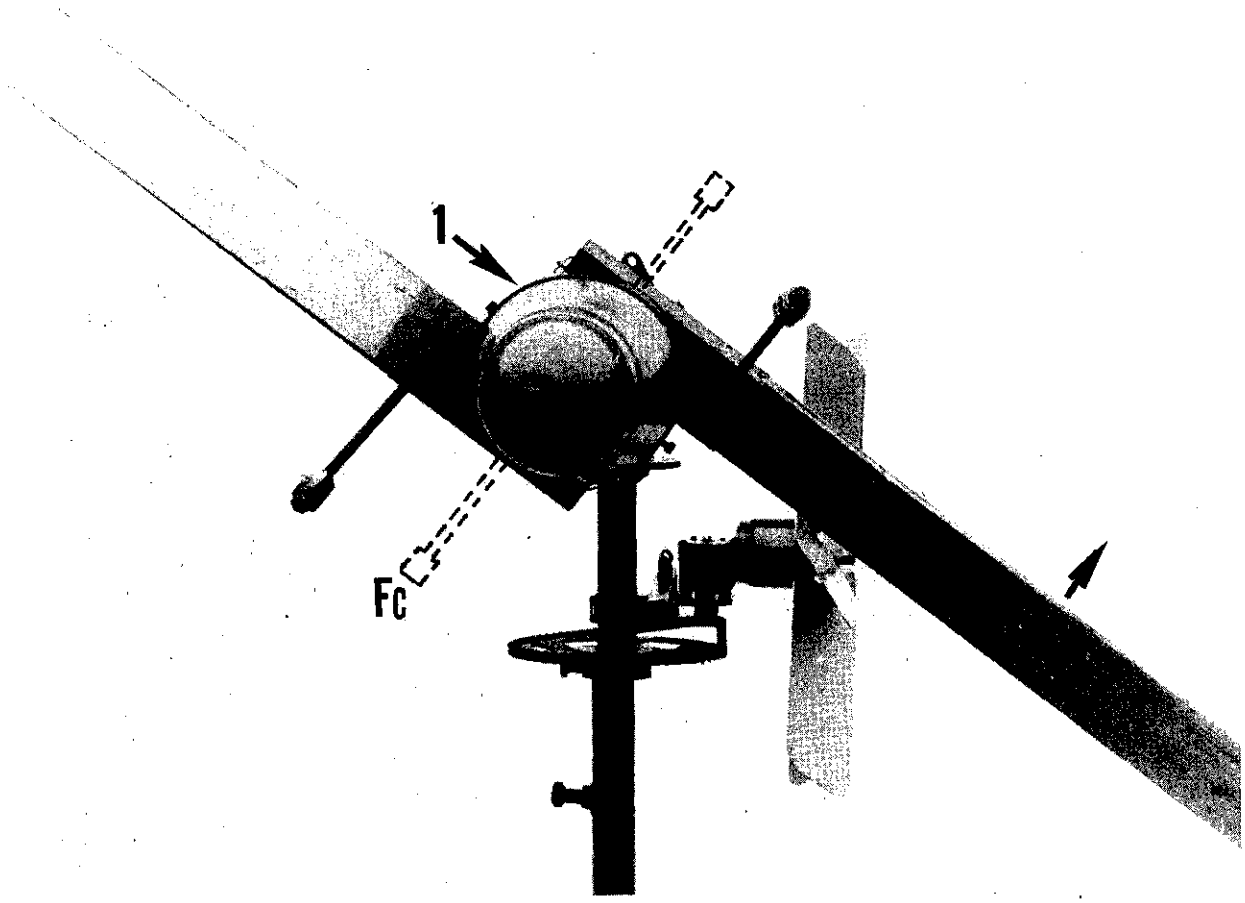
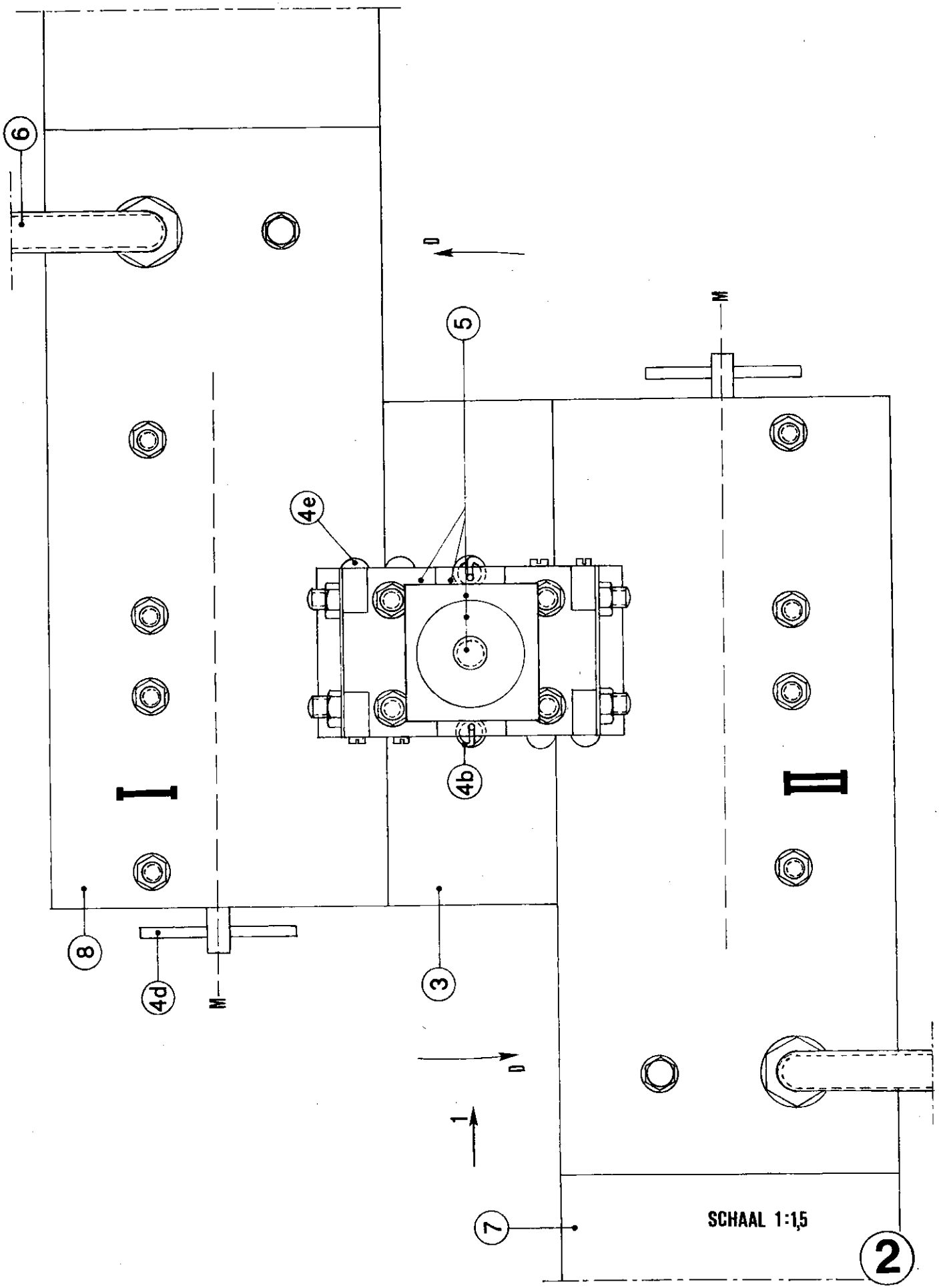


Foto 3. Vooraanzicht molen. Bladen in aanloopstand. Neem nota van de draairichting (linksom). Regelmechanisme is afgedekt met een beschermkap tegen stof.

.....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.....


6
D
5
M
4e
4b
8
4d
M
3
D
1
7
SCHAAL 1:1,5
2

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.

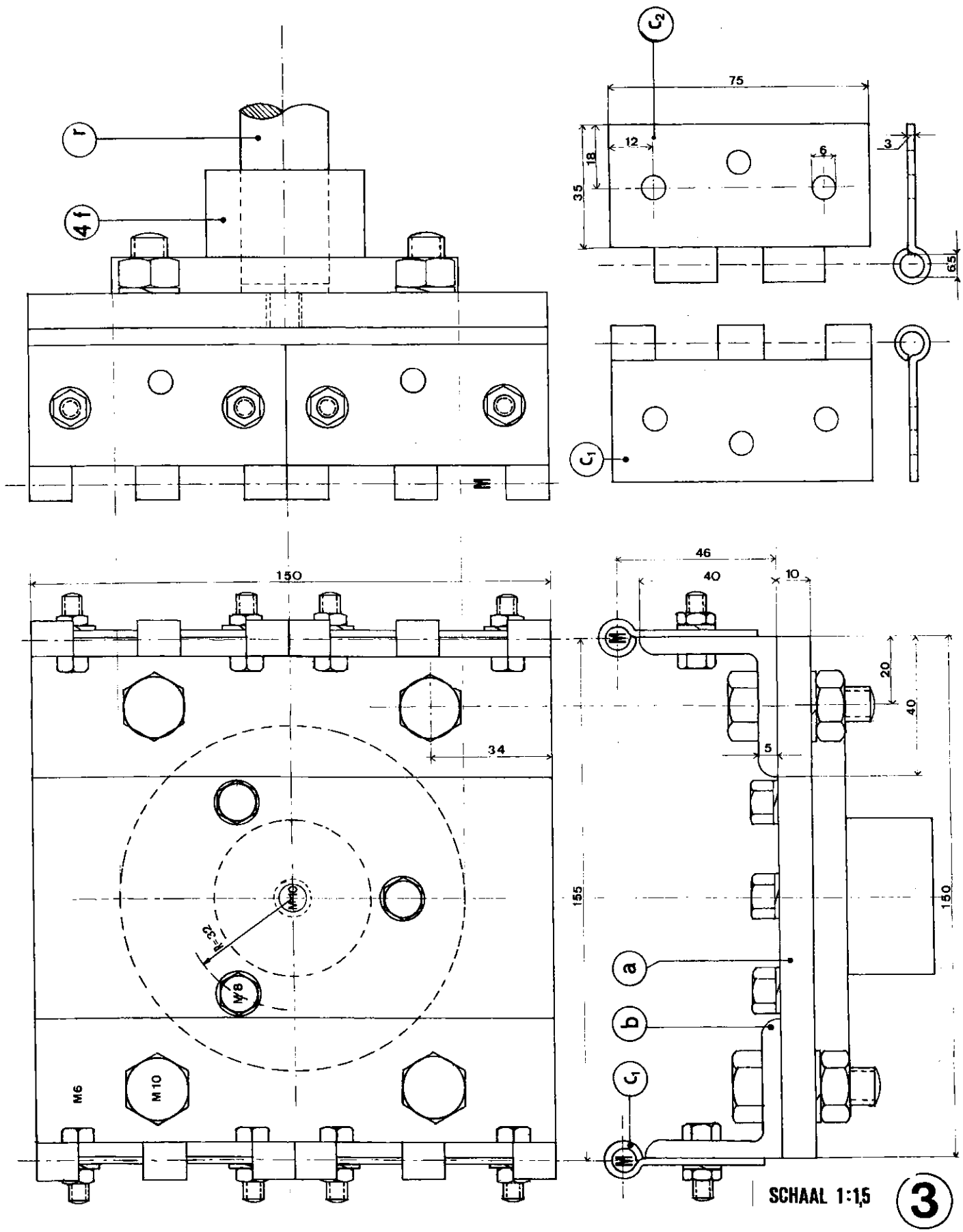
De komplementaire scharnierdelen **c2** worden aan de bladen gemonteerd (tek. 8). De opgegeven maten van de gaten van de grondplaat **a** worden uiteraard aangepast aan de verkregen scharnieren. Niettemin geeft tek. **c1 c2** de **minimale** lengte- breedte- dikte- en pengatmaten van de scharnieren aan. 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 volgenstekening.

Alle bout- en moerverbindingen met veerring!

De asflens **4f** welke de grondplaat **a** met de rotor-as **r** 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 kwalitiet 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 practische 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.....



r
4f
M
C2
75
12
18
35
6
3
6,5
C1
150
46
40
10
20
40
5
34
155
150
M10
R=32
M8
M6
M10
a
b
C1
M

SCHAAL 1:1,5

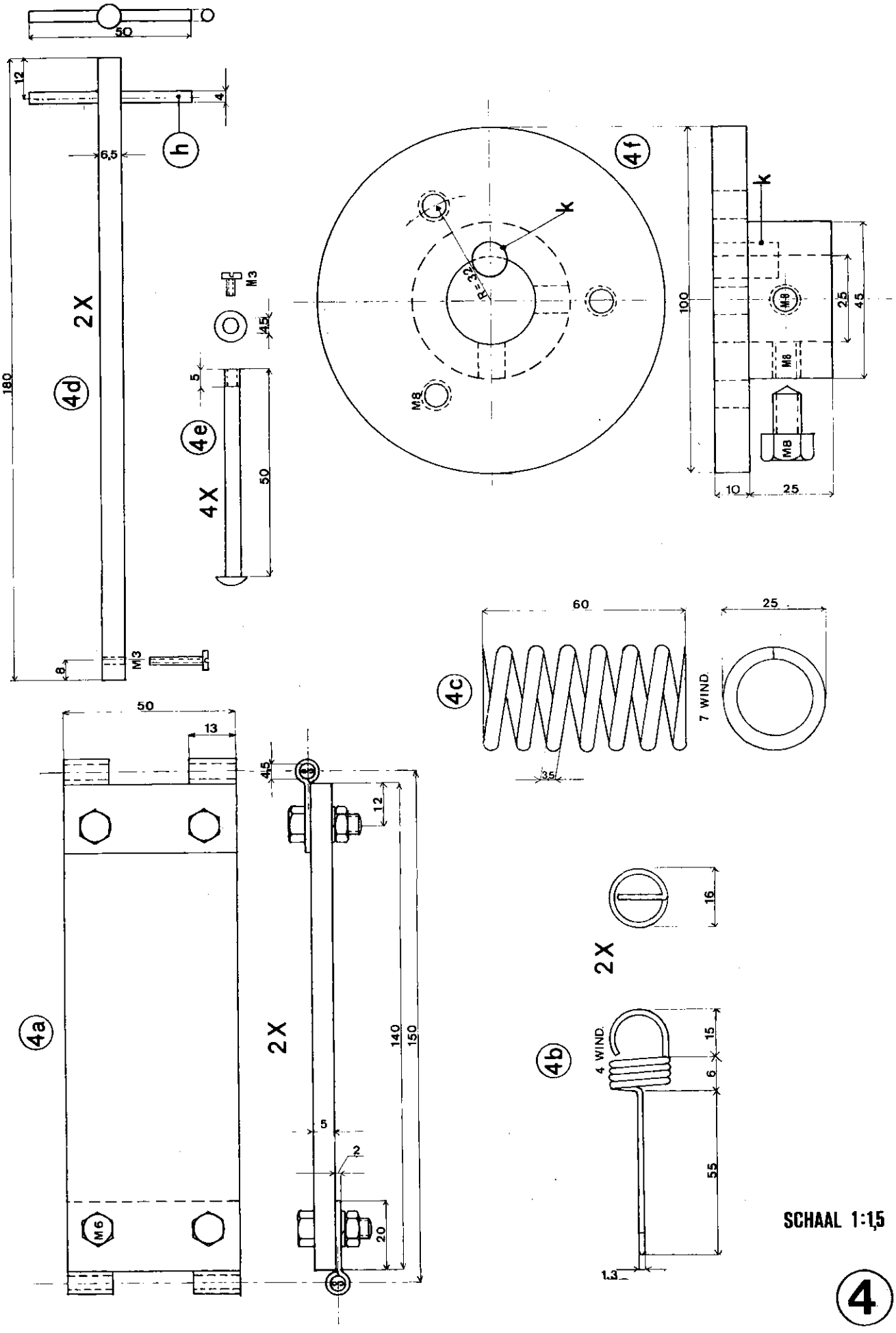
3

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 gevarenzône 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.....


4a
4b
4c
4d
4e
4f
2X
4X
h
k
M3
M6
M8
R = 32
7 WIND.
4 WIND.
SCHAAL 1:1,5
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.

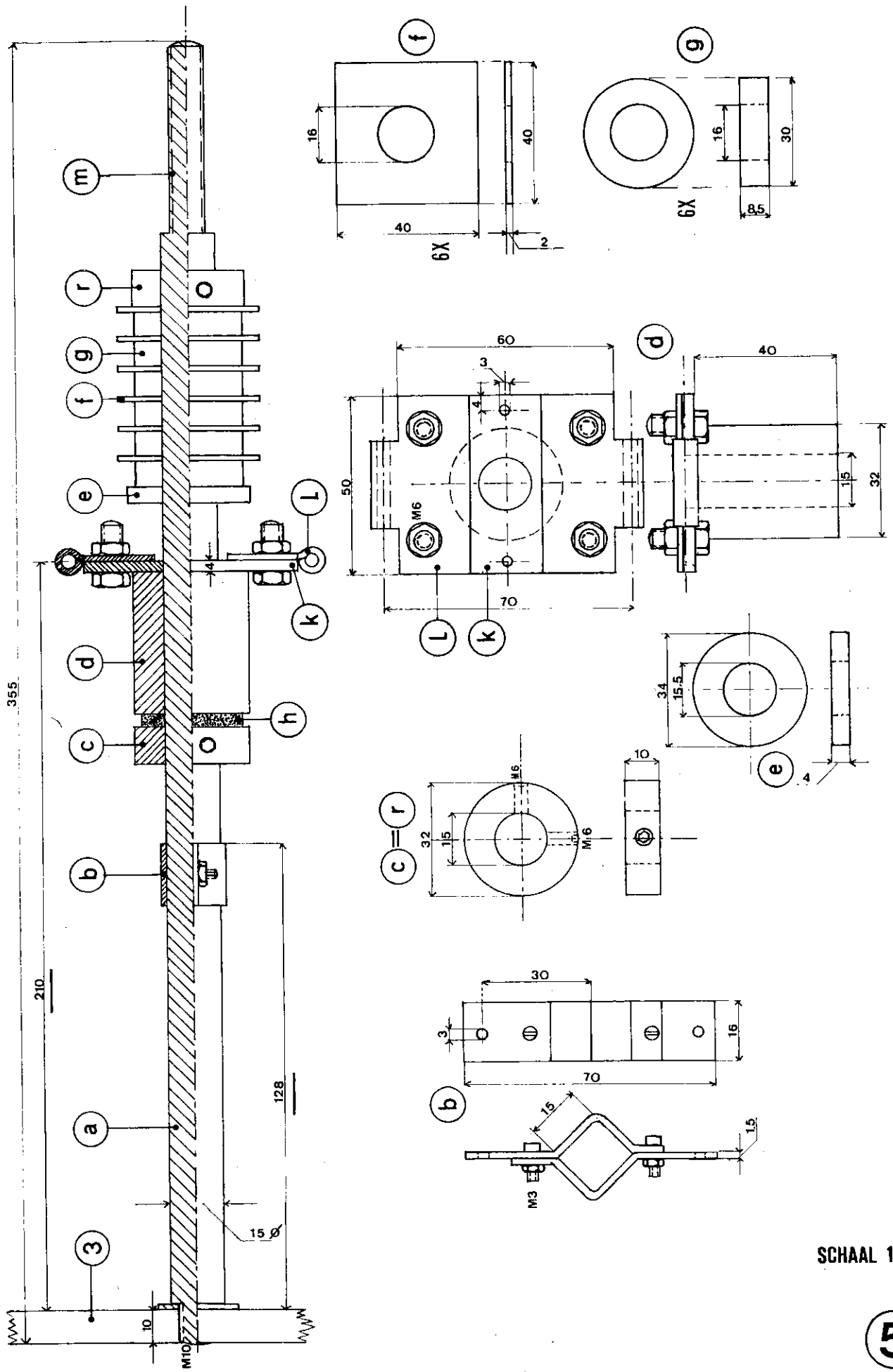
r Messing ring voor instelling maximum toerental.

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 komponenten 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 gegalvaniseerd of R.V.S.


m
r
g
f
e
d
c
b
a
3
L
k
h
355
210
128
15 ø
10
M10
4
f
16
40
40
2
6X
g
16
30
8,5
6X
d
60
3
4
40
50
M6
15
32
70
L
k
34
15,5
e
4
c = r
M6
32
15
M6
10
b
30
3
16
70
15
1,5
M3

SCHAAL 1:1,5

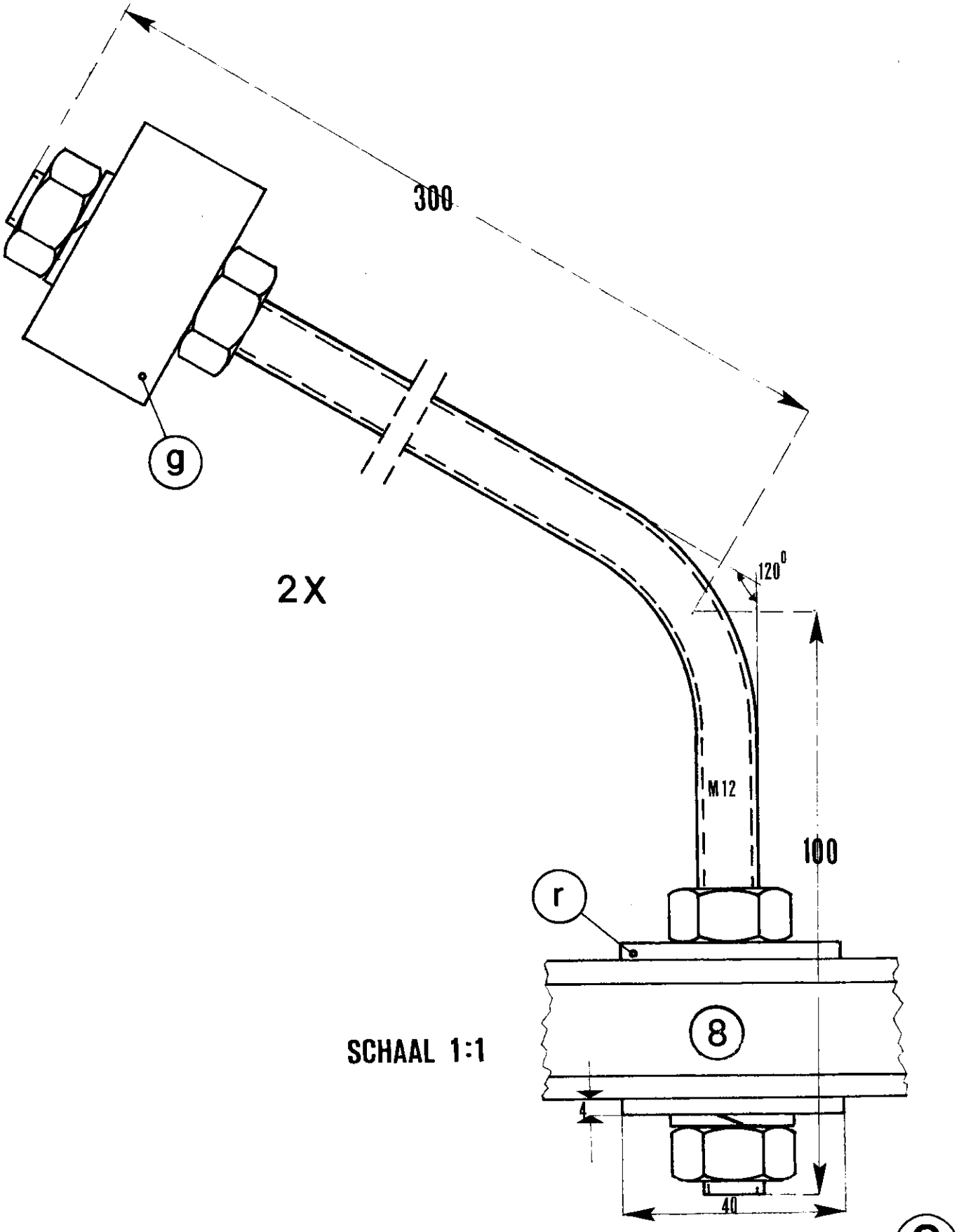
5

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.....



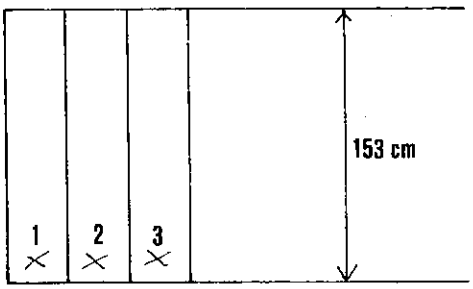
SCHAAL 1:1

6

TEKENING 7 EN 7a

Konstruktie rotorbladen

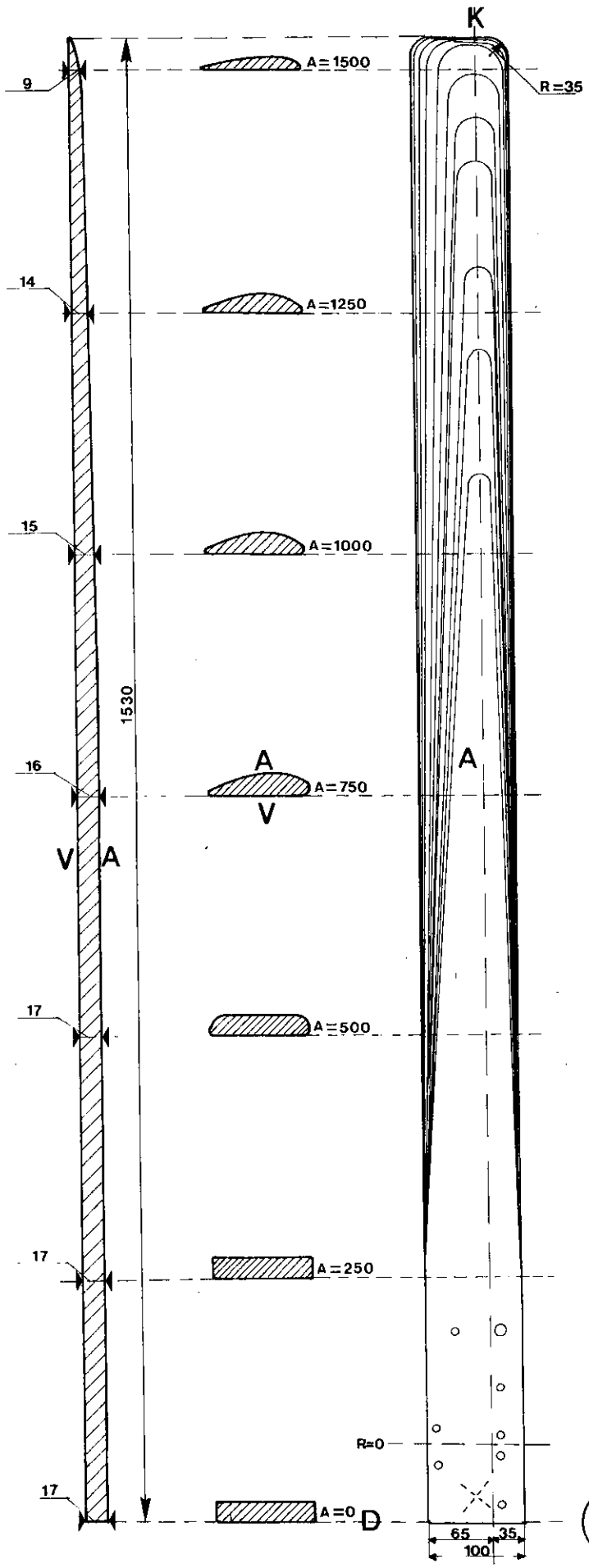
De rotorbladen worden vervaardigd uit berkenmultiplex (watervast verlijmd) van goede kwaliteit, opgebouwd uit acht à twaalf lagen. De dikte 16 à 18 mm. Dit materiaal heeft een hoge buigsterkte, is vormvast en laag in gewicht.
Uit een plaat worden, naast elkaar, drie stroken (1 reserve) gezaagd van 10 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 direkt maatgevend voor de diameter van de molen vanwege de overlap aan de grondplaatkonstruktie. 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 (koorde) en bladdikte (koorde-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.....


K
R=35
A=1500
9
14
A=1250
15
A=1000
1530
16
A
A=750
V
V
A
A
17
A=500
17
A=250
R=0
17
A=0
D
65
35
100

7

Profilering

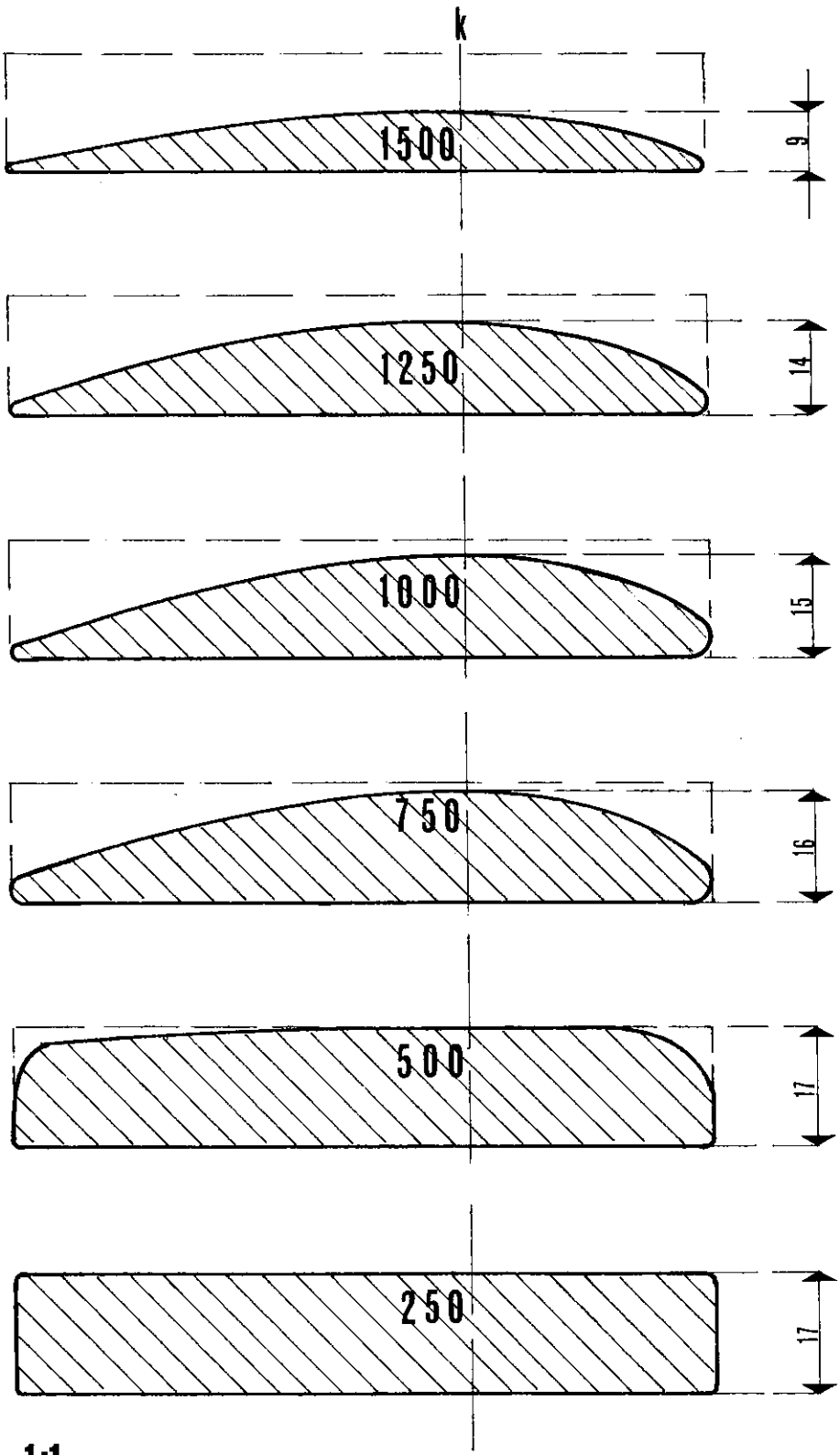
Op tek. 7 zien we op welke plaats het blad wordt voorzien van een profiel. De achterzijde van het blad is steeds aangegeven door **A**. De voorzijde door **V**. De tekening rechts laat de achterzijde van het blad zien, die zijde dus waar het profiel wordt aangebracht. Het (gestippelde) merkteken ⋋ ligt 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 wegnemen. 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 malletjes knippen en daarmee het werk kontroleren. 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 buren kunnen dus vrienden blijven. De funktie 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 korrekties moeten worden aangebracht.

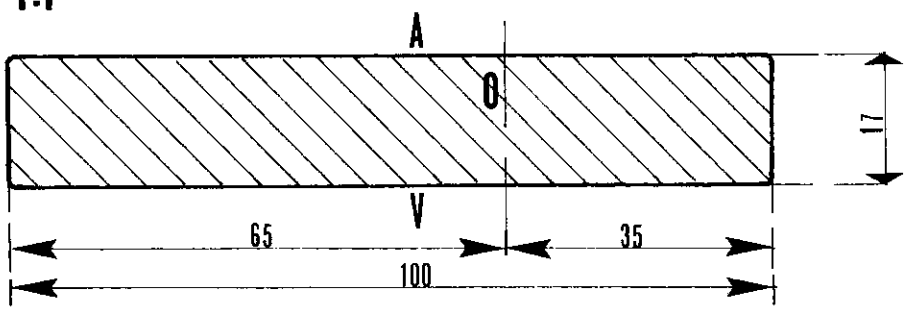
Gatenpatroon

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



7a

TEKENING 8

Inklemming rotorbladen

Hier zien we hoe de wortels van de bladen **7** worden afgewerkt tussen de alu. platen **a** (of plaatstaal 3 mm). De bevestiging van de scharnieren **c** maakt min of meer deel uit van de bladinklemming. Draaias **M** ligt op het midden van het blad. Scharnieren **L** met draaipunt **S** maken weer deel uit van de regeling via verbindingsstrook **4a** naar de glij-bus **5d** (tek. 1). De plaats van de gaten van alle scharnieren (M6) worden aangepast aan het verkregen materiaal met inachtneming van de draaias **M**.

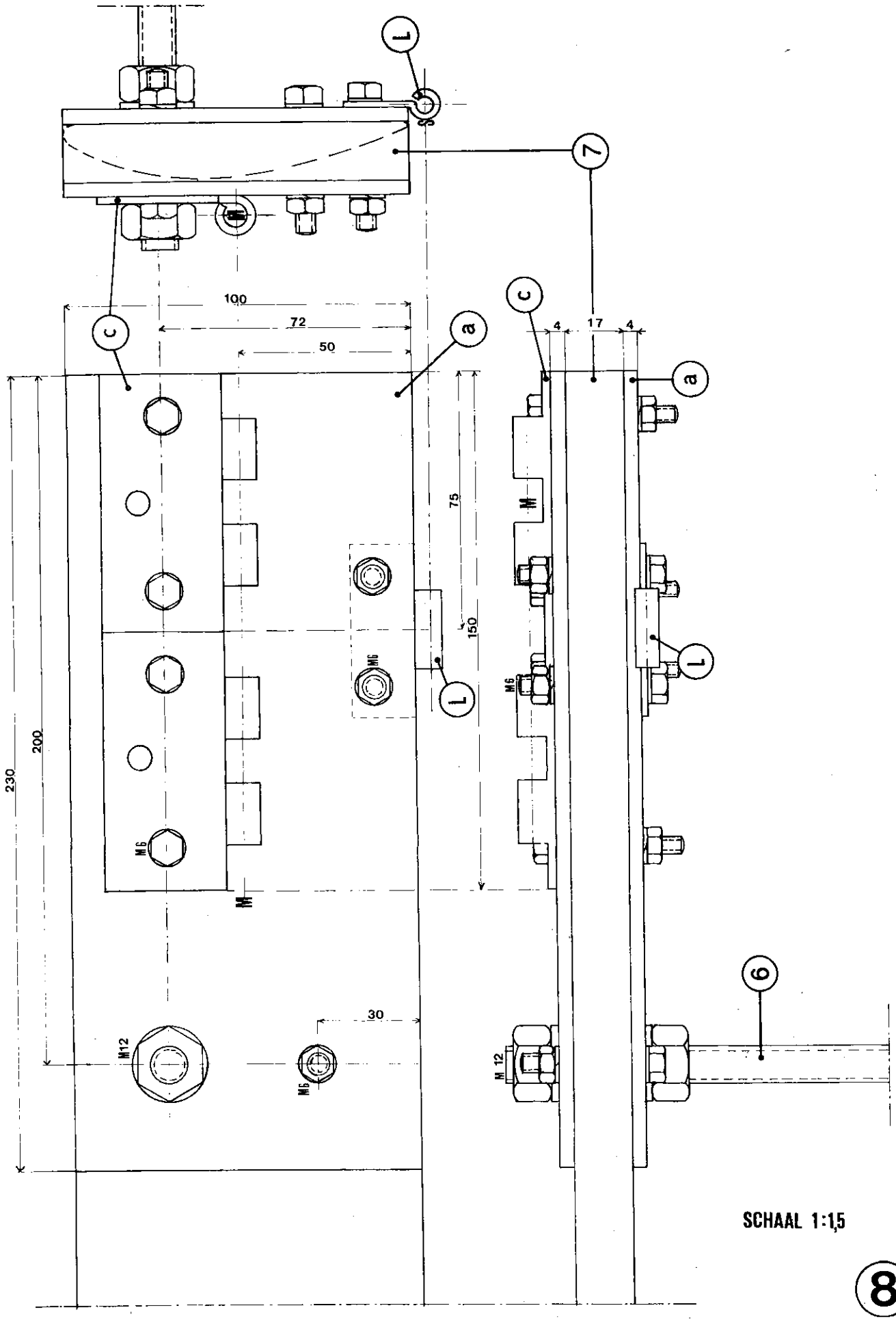
Het boren van de gaten in de rotorbladen en alu. platen moet **zeer precies** gebeuren.

Draaias **M** wordt nauwkeurig parallel aan de lengtelijn van het blad gelegd. Definitieve bevestiging vindt plaats nadat de bladen zijn gevernist. De scharnierdelen **c** staan in reletie met de komplementaire scharnierdelen **c** van de grondplaat (tek. 3). Kontroleer af en toe of het draaien van het blad soepel plaatsvindt door tijdelijk scharnierpen **4d** (tek. 4) aan te brengen.
Het is van belang de bladinklemming te maken volgens tekening: dus rotorblad loopt door tussen platen **a** en scharnieren. Alleen op deze manier kunnen de bladkrachten van het rotorblad geleidelijk door de grondplaat worden overgenomen.

.....Uiteindelijk de molen uit de wind gedraaid. Ik dacht, dat zal wel weigeren, maar nee hoor, hij ging. Rem er op, fietsband om de bladen, en nu?.... Ik ga een grondige controle doen en veranderingen aanbrengen. De molen heeft een aardige test doorstaan, en dat is, na alles, toch een goed gevoel. De gedachte, dat de molen zichzelf uit de wind of op de rem moet kunnen zetten, is nu wel gaan leven..... Vanmiddag 5 uur nam de wind af, en haalde ik opgelucht en dankbaar adem. Zo, en nu ga ik een biertje pakken, tot ziens.....

(Citaten uit brief A.J. Geuze)

De heer Geuze uit Hoornsterzwaag bouwde de vijfmeter-molen volgens het in dit boek beschreven recept. De krui-inrichting van zijn molen was voorzien van een windservo én een elektromotor.
De gedachte was om het 'zoeken op de wind' te laten plaatsvinden door de schoepen van de windservo en dat bij zwaar weer de molen met de elektromotor uit de wind kon worden gedraaid. De kracht van de windservo overheerste echter de werking van de elektromotor zodat hierdoor enige benauwde uren ontstonden.
Na het wegnemen van de schoepen van de kruimolen kon, met de elektromotor, de molen uit de wind worden geplaatst. Intussen is de molen voorzien van een rem waardoor de, in de briefcitaten omschreven situaties niet meer kunnen voorkomen.



SCHAAL 1:1,5

8

TEKENING 9

Aanhechting rotorbladen (totaal overzicht)

Deze tekening moet helderheid verschaffen inzake de aanhechting van het blad ten opzichte van de gehele bladlengte. We zien een kombinatie van tek. 2 en een gedeelte van tek. 8. Kant **V** geeft aan de voorzijde of windzijde van het rotorblad. Kant **A** is de achterzijde of lijzijde van het blad. De dikste plaats van het koorde-profiel is aangegeven met streeplijn **k**. De voorzijde **V** is geheel vlak. De achterzijde **A** geeft een indruk hoe het gelaagde berken multiplex er uit komt te zien nadat de profilering is aangebracht. Tek. 7 geeft een beschrijving van de rotorbladen.

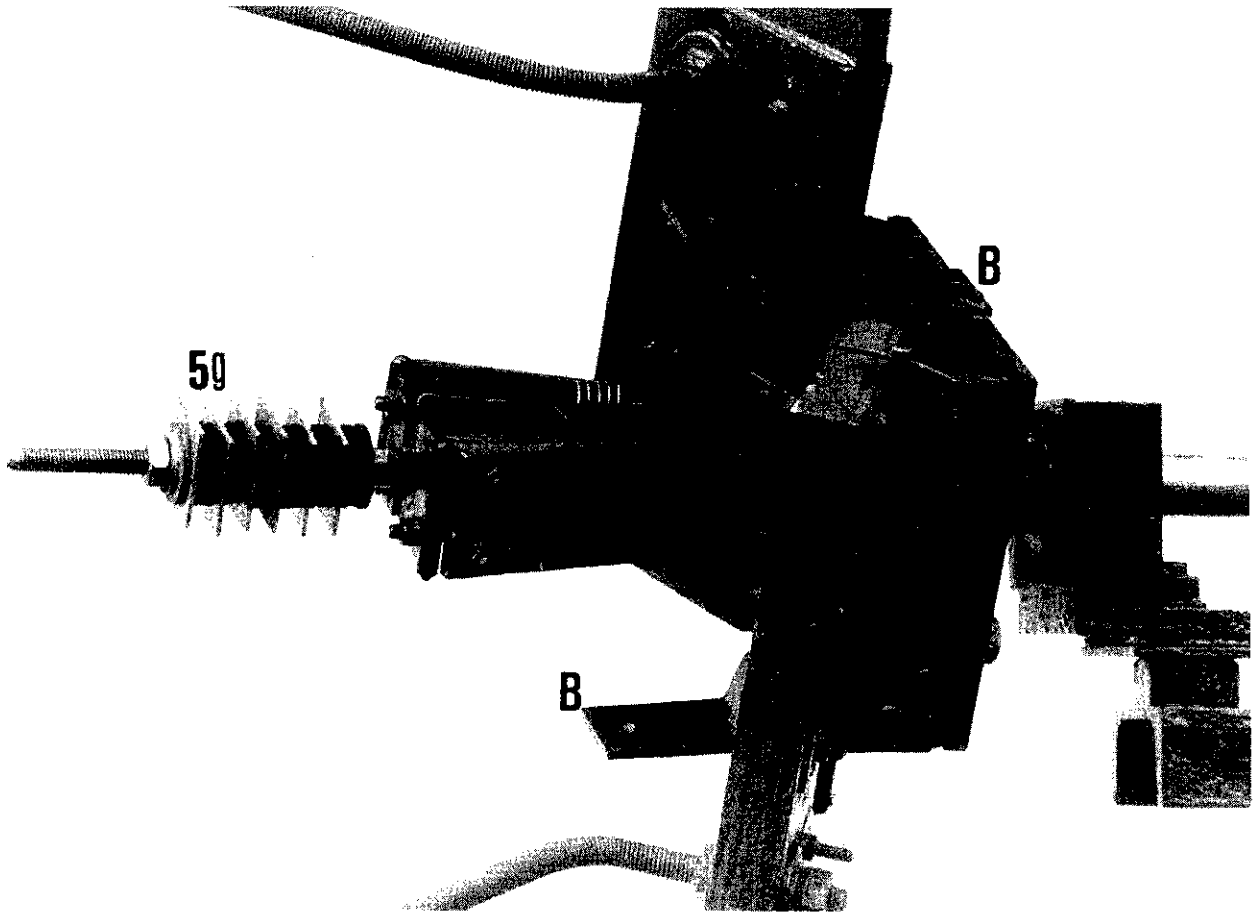
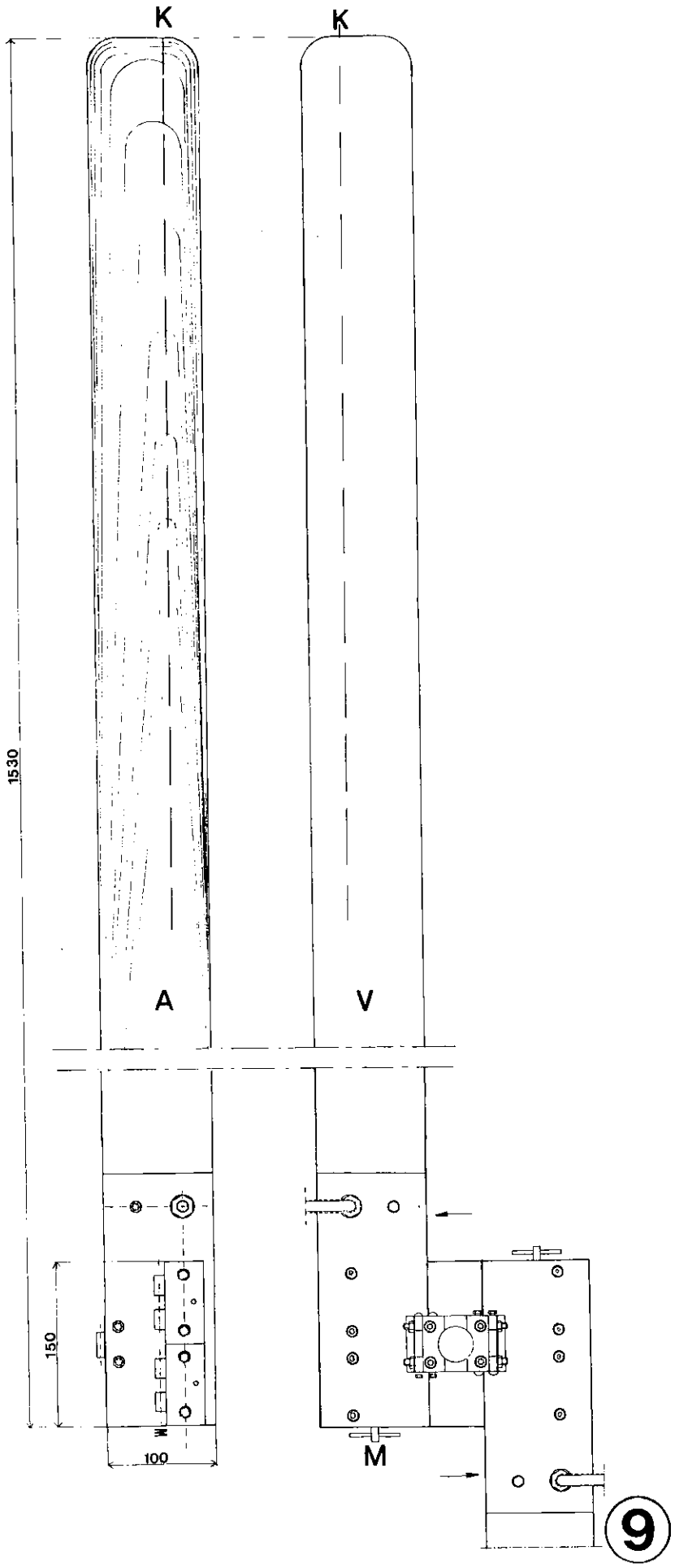


Foto 4. Nog een afbeelding van de rotorkop. Bladen staan in aanloopstand. Aan beugels **B** *wordt afschermkap bevestigd. Onderdeel* **5g** *is het rubber veerpakket.*



9

TEKENING 10

Afregelen systeem A

In hoofdstuk 'Werkingsprincipe bladverstelling' is uitvoerig aandacht besteed op welke manier het toerental van de molen wordt geregeld (systeem A en B). Essentiële onderdelen hierin zijn de diverse veren. Deze veren zijn geheel verantwoordelijk voor het regelgedrag van de molen en zullen dus nauwkeurig moeten worden nagemaakt. De veer-eigenschappen worden bepaald door drie faktoren n.l.:

1 Veerspanning van de gebruikte veren.

2 Plaats waar de veren hun verende werking beginnen.

3 De voor de veer geldende karakteristiek, dus over welke afstand worden de betreffende veren uitgetrokken c.q. ingedrukt bij een bepaalde veerspanning.

Omdat dit samenhangt met de stand van de bladen worden tijdens het afregelen de juiste veerspanningen, alsmede de bladhoek(en) vastgelegd. Aan de hand van tek. 10 volgt nu eerst de afregelprocedure voor systeem A.

Afregeling systeem A

Gehele regelmechanisme wordt gemonteerd. De diverse onderdelen op de spindel worden volgens tekening ongeveer op hun plaats gezet.

AANLOOPHOEK:
Aanloopveren **4b** losnemen. Ring **5c** losnemen. Plaats de bladen in de aanloopstand (25 graden). Hiertoe knippen we uit karton een malletje van 25 graden waarmee de bladen zover worden opgedrukt dat ze beide vlak tegen de mal rusten volgens tek. 10B. Met de bladen in deze stand, dus 25 graden, wordt ring **5c** tegen bus **5d** geschoven en vastgezet. De aanloopstand is hiermee vastgelegd.

In 'Werkings-principe bladverstelling' werd gemakshalve aangenomen dat de werkstand van de bladen 5 graden bedraagt. In feite echter kun je, althans in systeem A, niet spreken van één bepaalde werkstand van de bladen. In een eerder ontwerp was dit wel het geval doch toen bleken de regeleigenschappen van dien aard dat naar een ander veersysteem moest worden gezocht waarbij de werkstand, binnen bepaalde grenzen, kon variëren en zodoende een gunstige uitwerking had op het regelgedrag van de molen. Een bijkomend voordeel was dat de spindelopbouw kon worden vereenvoudigd omdat de veer **5g** ***zonder*** *voorspanning kon worden gemonteerd. Het 'overtrekken' van de bladen vindt nu geleidelijk plaats en valt gedeeltelijk samen met de werkstand van de bladen.*
Dit geldt niet voor systeem B.

Afregeling veer **5g**

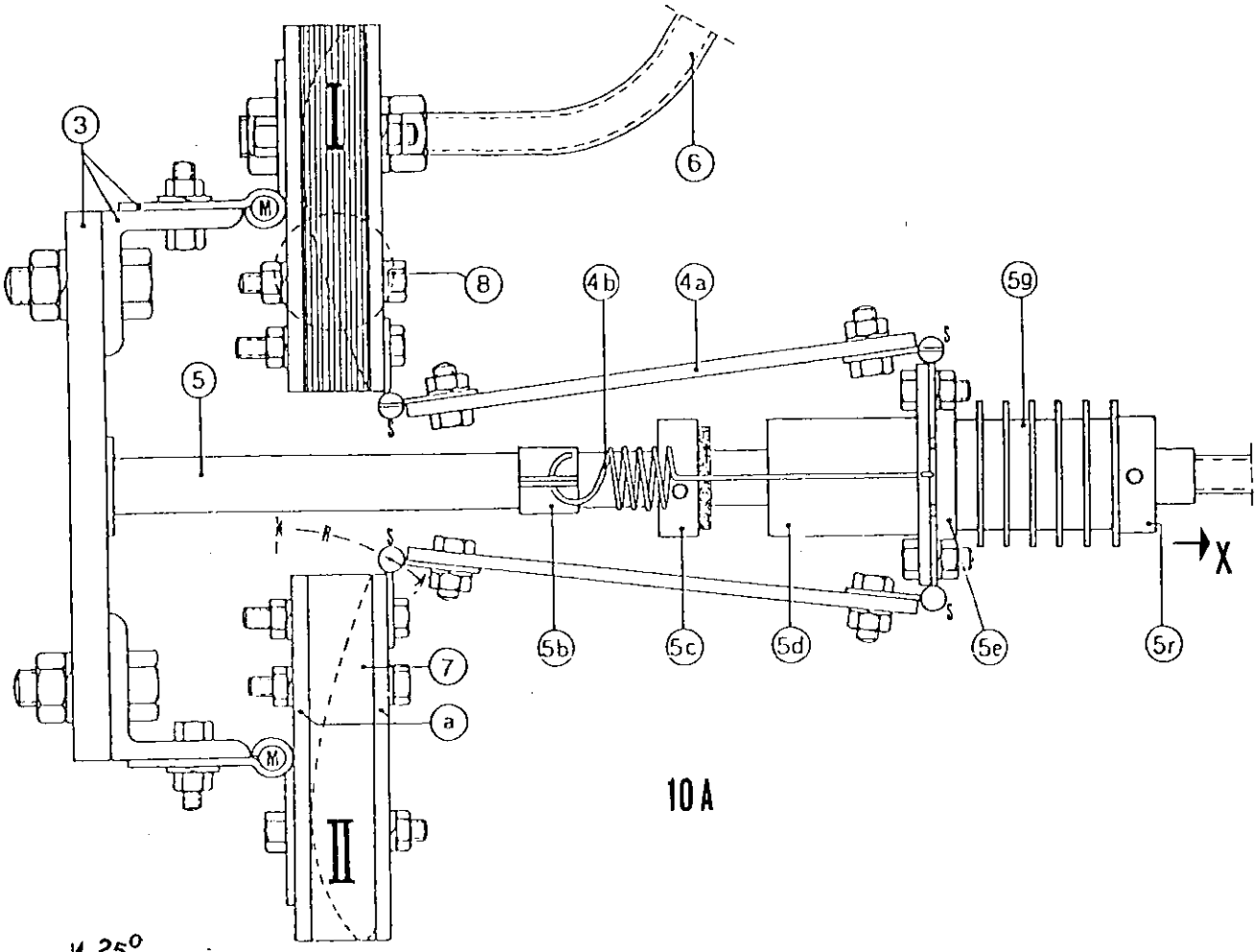
Aanloopveren losnemen. Ring **5r** losnemen. Met een 7 graden mal plaatsen we op de bekende manier de bladen op 7 graden (tek 10C). Met de bladen in deze stand wordt ring **5e** samen met veerpakket **5g** en ring **5r zonder** voorspanning tegen de scharnierflanken van bus **5d** geschoven waarna ring **5r** wordt vastgezet.

Kontrole veerpakket

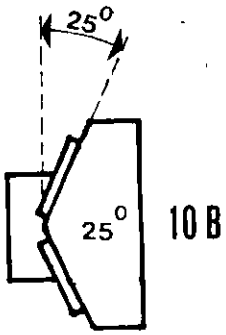
Om te kontroleren of rubber veerpakket **5g** aan de eisen voldoet doen we drie veermetingen. Hiervoor hebben we nodig: Twee unsters van 12 kg. Nog drie mallen; 0 graden, -5 graden en -10 graden.
Volgens tek. 10D worden de unsters aan de uiteinden van de centrifugaalgewichten gehaakt. Door trekken aan de unsters, parallel aan de rotoras, worden de bladen op nul graden gebracht waarbij het gewicht op de unsters wordt afgelezen. Daarna doortrekken tot resp. -5 en -10 graden. Voor nul graden moet het gewicht 3 kg $\pm$ 0,5 kg bedragen voor elk van de unsters.
Voor -5 graden is dat : 6 kg $\pm$ 1 kg elk.
Voor -10 graden is dat: 9 kg $\pm$ 1 kg elk.
Deze metingen kunnen het beste met z'n tweeën worden uitgevoerd. Zorg er voor dat het regelmechanisme niet scheef wordt belast zodat beide unsters hetzelfde aanwijzen. Bij onjuiste veerspanningen moet het veerpakket worden aangepast door één of meer segmenten af te nemen of toe te voegen. Besef echter goed dat veer **5g** bepalend is voor het maximum toerental van de rotor. Wie twijfelt aan de juiste veerspanning doet er goed aan in de testperiode het gehele veerpakket wat op te schuiven in de richting **X** (zie pijl) en wel zover dat pas bij 0 graden i.p.v. 7 graden de scharnierflanken van **5d** juist tegen ring **5e** van het veerpakket komen te rusten. De 'overtrek' aktie van de bladen begint dan al op een laag toerental. Vanuit deze veilige situatie kan het toerental geleidelijk worden verhoogd door ring **5r** steeds wat meer naar **5d** op te schuiven. **LET OP**: Maximum toerental niet boven 430 omw/min.

Afregeling aanloopveren **4b**

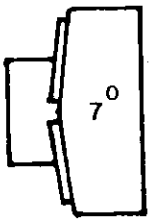
Aanloopveren aanhaken. De aanloopveren **4b** worden met beugeltje **5b** zover opgespannen dat bus **5d** met ongeveer 1 kg tegen ring **5c** drukt. We kunnen dit kontroleren door met een stukje touw een lus om **5d** te leggen en dat aan een unster (van 12 kg) te haken (zie tek. 10E). Deze meting is onnauwkeurig omdat in deze stand de scharnierwrijving naar verhouding een grote rol speelt. Daarom nog een tweede meting. Met de unster nog steeds gehaakt aan de lus wordt zo hard getrokken dat bus **5d** loskomt van ring **5c** en met de scharnierflanken juist ring **5e** raakt (dus zonder veerpakket in te drukken). De unster moet nu ongeveer 10 kg aanwijzen. Afregeling is nu gereed.



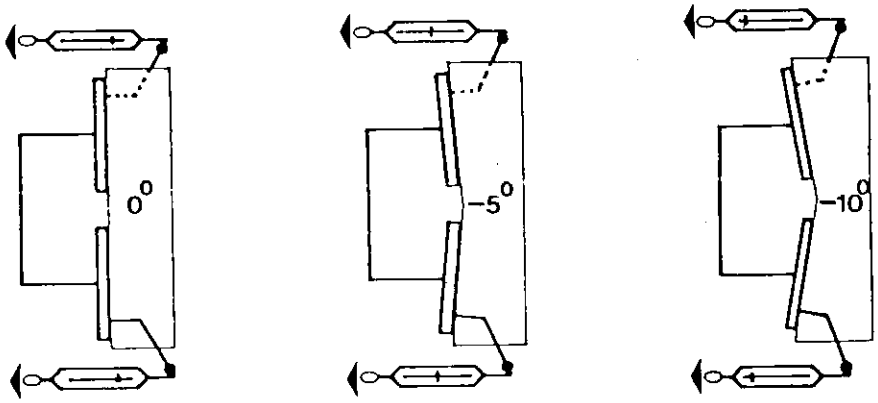
10 A



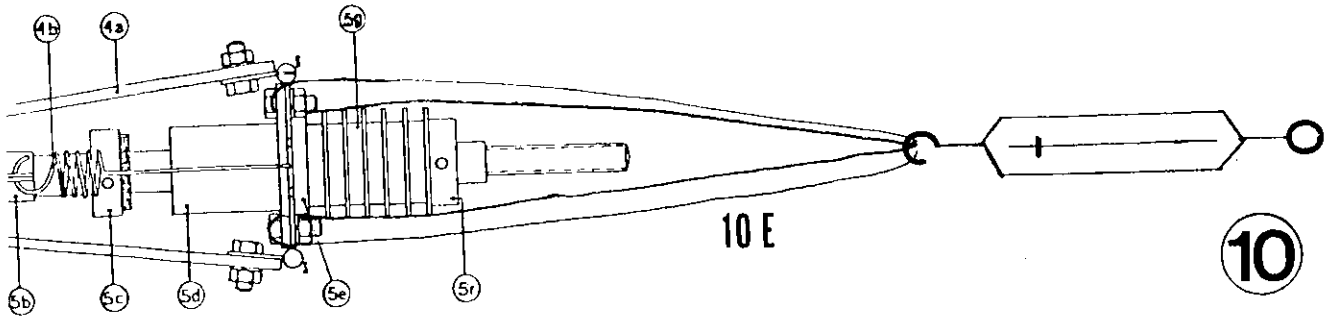
10 B



10 C



10 D



10 E

10

TEKENING 11

Afregelen systeem B

In tek. 11 zien we de spindelopbouw voor regelsysteem B. Merk op dat de centrifugaal gewichten **6** nu aan de achterzijde van de rotorbladen zijn aangebracht. De samenstelling van deze gewichten is hetzelfde als in systeem A (tek. 6). Zoals in hoofdstuk 'Werkings-principe bladverstelling' is aangegeven verstellen de bladen bij toenemend toerental zich naar een steeds grotere pósitieve bladhoek. De richting waarin de bladen worden versteld is dus tegengesteld aan die in systeem A. De verbindingsstroken **4a** worden, in tegenstelling tot systeem A, op trek belast dus: Centrifugaalgewichten willen naar buiten en trekken via de bladen aan de stroken **4a** zodat bus **5d** de veer **4c** indrukt. Veer **4c** is voorgespannen tussen ring **5c** en, via bus **5d**, ring **5r**. De bladen in tek. 11 staan getekend met een werkstand van 0 graden. Voor juiste bladstand zie afregelprocedure.

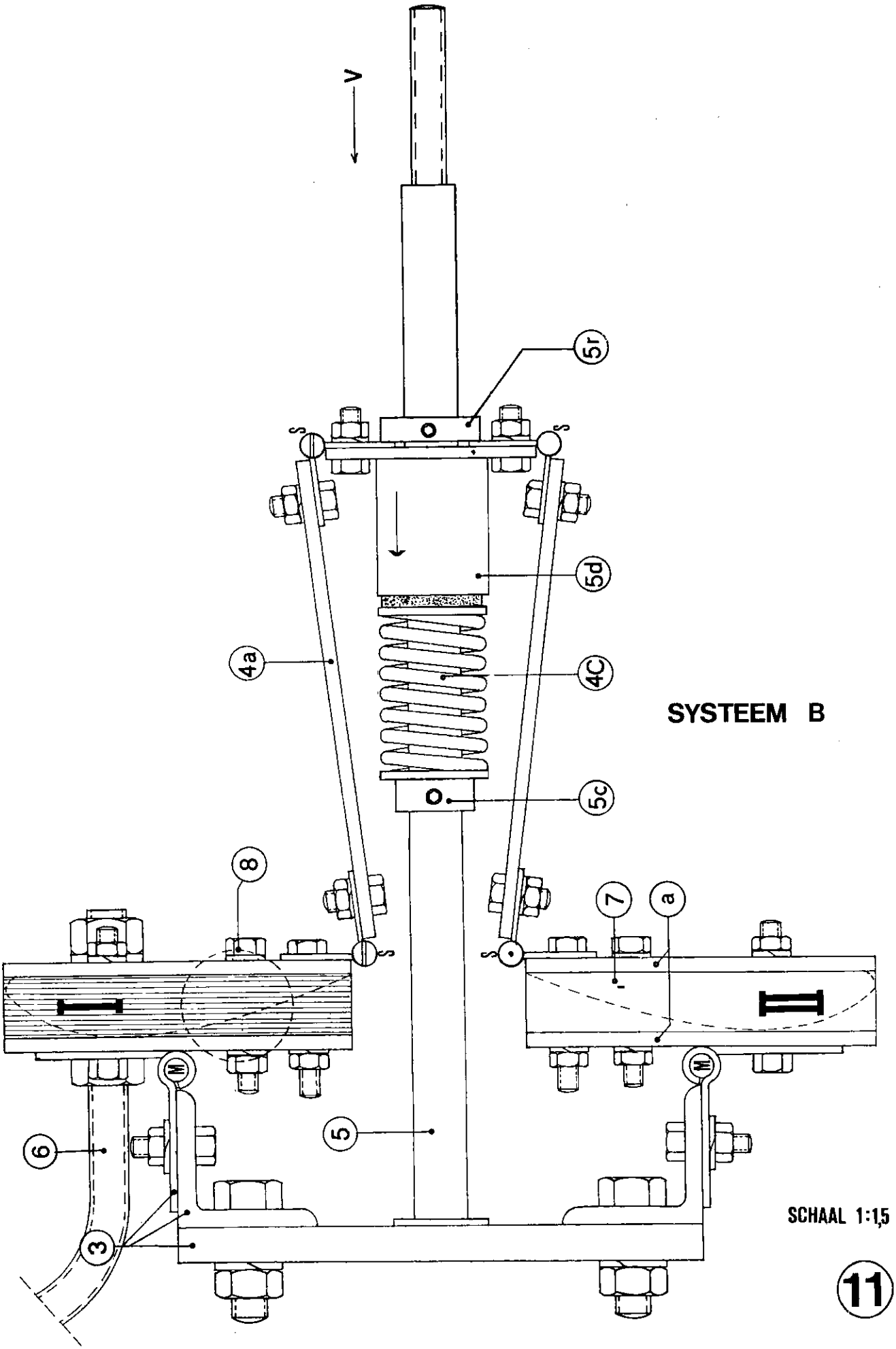
Afregeling werkstand

Onderdelen plaatsen volgens tek. 11. Ringen **5c** en **5r** losnemen. Wanneer de rotor uit zichzelf moet aanlopen worden de bladen ingesteld op een werkhoek van 5 graden (instellen met de bekende mal). Met de bladen in deze stand wordt ring **5r** tegen de scharnierflanken van bus **5d** geschoven en vastgezet.

Wanneer de generator ook als motor kan worden gebruikt kan de werkhoek op twee graden worden ingesteld. De snel-lopendheid ligt dan wat hoger zodat, onder gegeven omstandigheden, iets eerder met stroomlevering kan worden begonnen. Bedenk dat met deze werkstand het aanloopkoppel erg laag is zodat voorzieningen moeten worden getroffen om, b.v. via een windmeter, de generator eerst enkele seconden als motor te laten werken om de molen te laten aanlopen.

Afregeling veer **4c**

Met ring **5c** wordt veer **4c** zover opgedrukt dat bij het geschikte toerental de bladen beginnen te verstellen. Dit is echter een lastig karwei omdat veer **4c** te sterk is om deze met handkracht door **5c** te laten opdrukken. Daarom het volgende: We laten ring **5r** los en schuiven **5c** zover naar voren als we denken dat nodig is voor een redelijke veerspanning. Daarna **5c** vastzetten. Daarna drukken we, via beide centrifugaalgewichten, veer **4c** zover samen tot de gewenste werkstand is bereikt. Met de bladen in deze stand wordt ring **5r** vastgezet.
De veerdruk van **4c** is niet opgemeten en dient zelf te worden bepaald, rekening houdend met het maximale toerental van de rotor. Met enige experimenten bij sterke wind wordt snel inzicht verkregen omtrent de juiste veerspanning. We dienen er voor te zorgen dat veer **4c**, nadat deze is voorgespannen, nog zover kan worden ingedrukt dat de bladen tot **minstens 30 graden positief** kunnen worden versteld. Door het naar buiten trekken van de centrifugaalgewichten tegen de veerspanning in, en meten met 30 graden mal kunnen we dit kontroleren. Veer **4c** staat afgebeeld in tekening 4. Veer **5g** uit systeem A mag hiervoor niet worden gebruikt. De veerkarakteristiek van **4c** moet lineair verlopen. Regelmatig gewikkelde klepveren van een automotor hebben ongeveer een dergelijk verloop. Ook spiraalveren uit de drukgroep van een koppeling zijn meestal wel te gebruiken. Dit moet zelf worden bekeken. Tot zover afregeling systeem B.
Wie systeem B mocht toepassen moet er wel voor zorgen dat de lagering van de rotoras zodanig wordt uitgevoerd dat de centrifugaalgewichten vrij kunnen bewegen. Deze gewichten wijzen nu immers naar achteren.



SYSTEEM B

SCHAAL 1:1,5

11

TEKENING 12

Konstruktie windservo

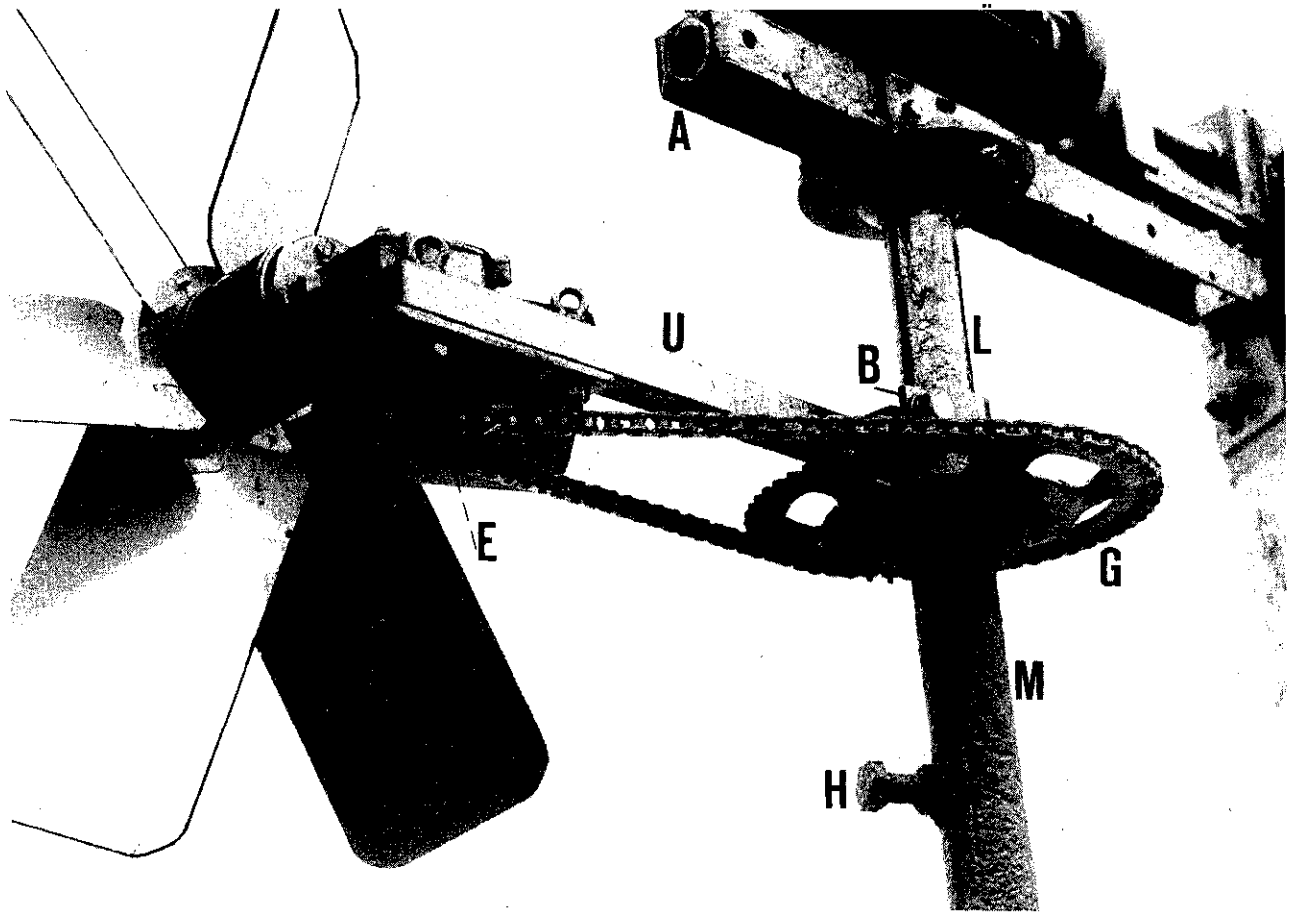


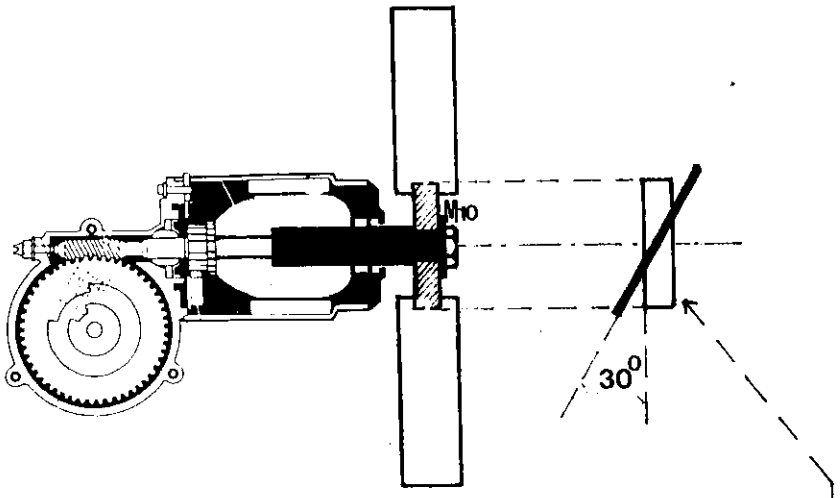
Foto 5. Overbrenging windservo; ruitenwissermotor samen met kettingwiel. Vertraging: 300 : 1.

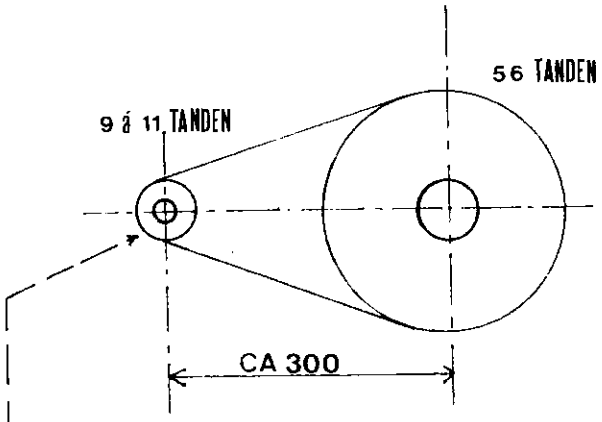
In de principe-beschrijving van de windservo is voor de duidelijkheid gebruik gemaakt van twee snaarwielen welke haaks op elkaar staan plus een snaar als overbrenging. In werkelijkheid is deze opstelling niet erg handig. Tussen kruimolen en het vaste wiel aan de mast moet een groot toerentalreduktie aanwezig zijn, hetgeen doorgaans niet met twee snaarwielen mogelijk is. Deze grote reduktie is nodig om de kruimolen tijdens het kruien niet te zwaar te belasten zodat deze licht kan draaien. De windservo kan hierdoor al op kleine hoekveranderingen van de windrichting reageren terwijl ook de afmetingen klein kunnen blijven. Tevens realiseert de grote toerentalreduktie de gewenste trage hoekveranderingen van de vertikale as van de molen. In dit ontwerp is gebruik gemaakt van een wormwieloverbrenging van 50 : 1 samen met een kettingwieloverbrenging van 6 : 1. Het produkt van deze twee geeft een totale overbrenging van 300 : 1. Foto 5 geeft hiervan een overzicht.

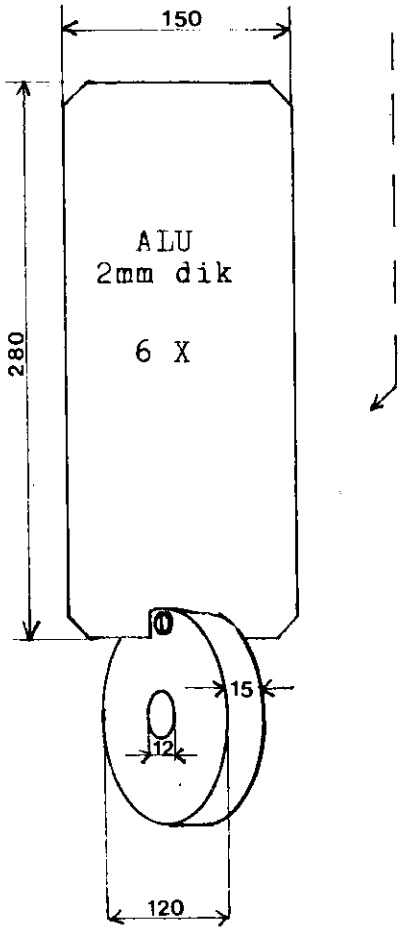
Op deze foto zien we hoe het drijfwerk van de ruitenwisser via uithouder **U** aan de molen is gemonteerd. Uithouder **U** zit met beugel **B** geklemd aan het draaibare gedeelte **L** van het kruilager en beweegt dus mee met de montagebalk **A** waarop de molen is gemonteerd. Uithouder **U** is een stalen kokerbalk van 3 bij 3 cm, wanddikte 3 mm, lengte ongeveer 45 cm. Beugel **B** zit met twee bouten en moeren (M12) om maststuk **L** aan uithouder **U** geklemd. De ruitenwisser is van een soort dat is uitgerust met een wormoverbrenging. Er zijn ook soorten welke zijn voorzien van een aantal tandwieltjes. Dit type is voor ons doel niet geschikt omdat hierin niet de haakse overbrenging is opgenomen. De wormoverbreng-verhouding ligt meestal in de buurt van 50 : 1. Op de uitgaande as van de ruitenwisser zit een kettingwiel **E** (9 tanden, uit bromfietsmotor) goed vast gezet. Een goede kwaliteit bromfietsketting verbindt deze met stalen kettingwiel **G** (56 tanden, bromfiets) welke aan de, niet zichtbare, binnenpijp van het kruilager is vastgezet. (Zie ook 'Kruilager' tek, 13 blz. 46). Deze binnenpijp zit weer geklemd in mast **M** met bouten **H**. De ketting moet strak worden aangebracht. Het gebruik van een ekstra kettingwieltje om de ketting strak te houden mag wel, doch moet zeer stug zijn afgeveerd.

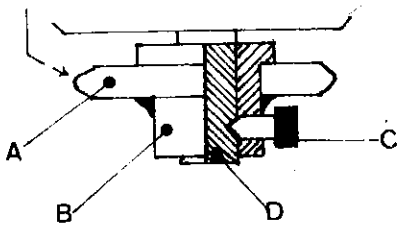
Elektro-mechanische windservo

Wanneer het servosysteem elektro-mechanisch wordt gemaakt kan de ruitenwisser geheel in takt blijven. De motor wordt dan bestuurd door twee micro-switches welke worden bediend door een windvaan. (Zelf uitzoeken). Bedenk wel dat deze oplossing stroom verbruikt uit de accu. Een voordeel is dat de molen uit de wind kan worden gedraaid wanneer dit nodig mocht zijn.









Kleine tandwiel **A** gelast aan bus **B**. Bus **B** met twee M6 imbus aan uitgaande as **D** van ruitenwisser.

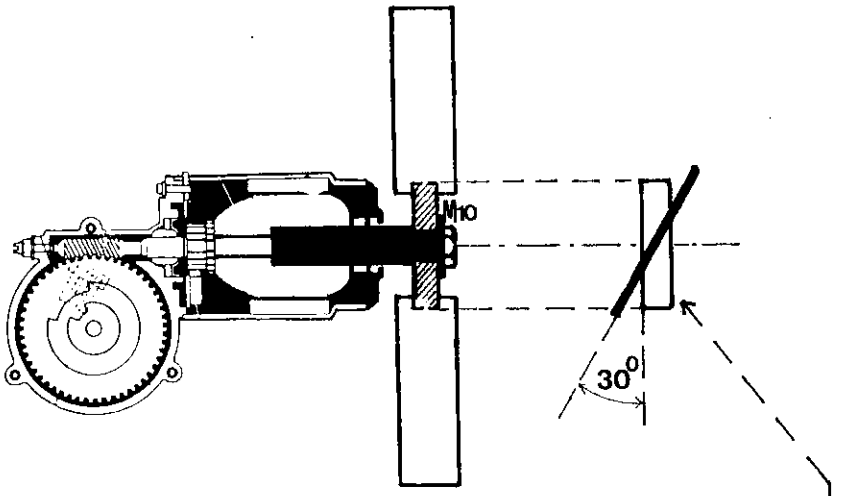
12

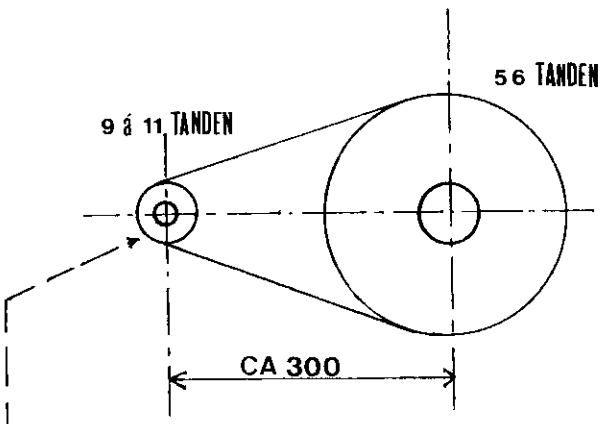
Windservo prototype

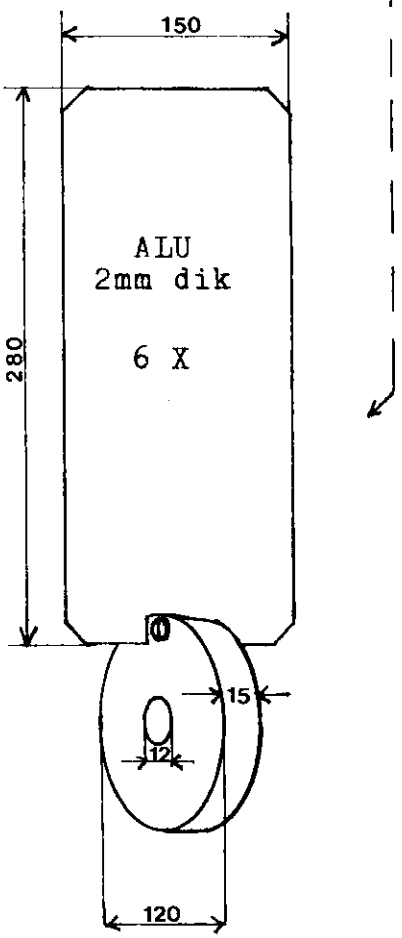
Zelf heb ik de voorkeur gegeven aan een krui-molen om het servomechanisme aan te drijven. Dit vraagt om een operatie van de ruitenwissermotor. Hierbij wordt de rotoras verlengd, eventueel met verwijdering van de met draad bewikkelde rotor. De verlengde as kan worden gelagerd in het bestaande lager. Beter is het de verlengde as wat dikker te nemen dan de bestaande as en de lagering daarop aan te passen. De verlengde as, 12 à 15 mm dik, laten we ongeveer vier cm uit het motorhuis steken. Hieraan wordt straks, met een **M10** bout, de kruimolen gemonteerd. De kruimolen bestaat uit zes plaatjes alu volgens tek. 12 welke onder 30 graden met het draaivlak worden opgesteld. De zes schoepen worden vastgezet in een houten of kunststof schijf. Schuin inzagen, twee-komponent lijm + schroeven M6. Diam. kruimolen: ca. 60 cm. De richting waarin de schoepen schuin worden opgesteld kan het beste worden bekeken wanneer de gehele overbrenging is gemonteerd. Draaien aan de rotoras van de ruitenwisser en denkbeeldig opgeroepen veranderingen in de windrichting bepalen dan; **linksom** of **rechtsom** schuin opstellen van de schoepen. Zie ook 'Werking windservo' blz. 11. Wanneer molen in bedrijf wordt genomen moet het wormwielkastje en eventuele lagers met zacht vet worden gesmeerd waarna alle openingen waterdicht worden afgesloten (vloeibare pakking e.d.).
Voor diverse informatie en maten zie tek. 12. Omdat de molen lange tijd in bedrijf moet zijn is het zinvol om ketting en kettingwielen te voorzien van een regenbescherming; bovenkant en zijkant druipwaterdicht. Onderzijde kan open blijven.

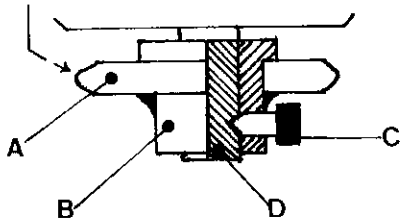
Professionele wormvertraging

Het gebruik van een professionele worm-vertraging maakt alles wat eenvoudiger omdat de ingaande as al naar wens is uitgevoerd en de konstruktie een langere levensduur toestaat. De overbrengverhouding is niet kritisch en mag liggen tussen 50 : 1 en 200 : 1. De totále overbrenging tussen kruimolen en kruilager (vertikale as) moet minstens 1 : 300 bedragen. Uit praktische overwegingen is het raadzaam niet verder te gaan dan 1 : 2000.









Kleine tandwiel **A** gelast aan bus **B**. Bus **B** met twee M6 imbus aan uitgaande as **D** van ruitenwisser.

12

TEKENING 13

Molenmast

Het prototype staat op een mast met een centerhoogte (= ashoogte) van acht meter. De eerste zes meter bestaat uit twee vakwerkmasten van elk drie meter. De vakwerkmast is aan de bovenzijde afgedekt met een driekante stalen topplaat van vier mm dik welke met zes maal M10 aan deze vakwerkmast is gemonteerd. In het bovenste stuk van de vakwerkmast is een drie meter lange, dikwandige (4 mm) twee-duims pijp **m** gemonteerd, zodanig dat deze 130 cm boven de vakwerkmast uitsteekt. In de topplaat wordt hiertoe een gat gemaakt waar de pijp doorheen steekt. De pijp wordt aan de topplaat gelast. Het gedeelte van de pijp welke in de vakwerkmast is gestoken wordt op twee plaatsen hieraan stevig bevestigd met dwarsstukken en beugels. Hierbij wordt gezorgd dat geen voorkeur voor één bepaalde trilling kan optreden. Dit wordt bereikt door het pijpstuk (170 cm) op te delen in twee lengtes welke niet deelbaar op elkaar zijn. In het prototype werd gekozen voor 75 resp. 95 cm. (zie tek. 13). Met deze oplossing is niet alleen het pijpstuk van de vakwerkmast gedempt voor trillingen; ook de eigenresonantie van het boven de topplaat uitstekende stuk pijp is, door deze a-periodische opstelling sterk verminderd.

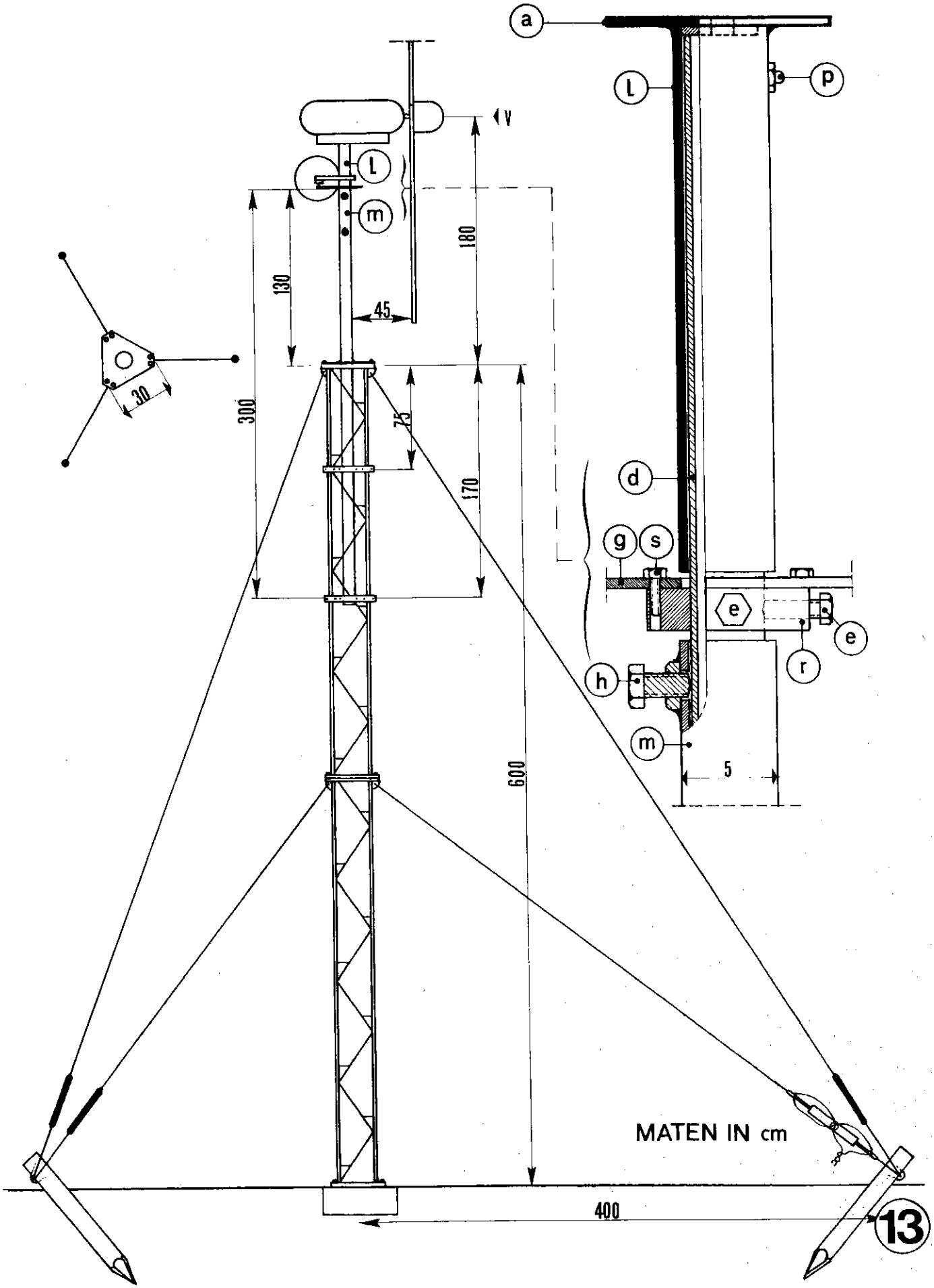
Voor wie zich afvraagt waarvoor dit allemaal nodig is het volgende: Het blijkt in de praktijk niet mogelijk om een werkende moleninstallatie geheel trillingsvrij te krijgen ook al is de statische en dynamische balans ogenschijnlijk in orde. De oorzaak hiervan is dat beide vormen van balans slechts blijven gehandhaafd in een homogene luchtstroming. Dit betekent; over het gehele oppervlak van de molen heerst éénzelfde windsterkte en éénzelfde windrichting. Dat blijkt in een buitenopstelling niet te realiseren. Binnen het molenoppervlak blijkt een grillig windpatroon te bestaan welke op de molen een wisselende winddruk, een variabele lift op het bladprofiel en een steeds andere bladdoorbuiging doet ontstaan.
Deze faktoren hebben een direkte invloed op de statische en dynamische balans van de molen en zijn waarneembaar als trillingen.
De frequenties van deze trillingen zijn doorgaans gelijk of hóger dan de frequentie van het molentoerental. Als we er nu voor zorgen dat de frequentie van de eigenresonantie van de mast lager ligt dan de frequentie van het gebruikte molentoerental en daarnaast ook nog is gedempt dan kunnen we rekenen op een rustig draaiende molen.
De lage eigentrilling van het hoogste gedeelte van de mast, in ons geval dus het stuk pijp welke boven de topplaat uitsteekt, kan worden bereikt door het gewicht van de windmolen zelf welke op deze mast is geplaatst. Het totale molengewicht van het prototype bedraagt ca. 45 kg (incl. servo).

Tuien van de mast

De vakwerkmast wordt vastgezet met zes tuikabels aan drie schuin in de grond geplaatste schoorpalen van 12 cm dik. Dikte van de tui-kabels minimaal 6 mm. (breuksterkte Σ = 160 kgf/mm², 3 ton). De afstand van de voet van de mast tot aan de schoorpalen moet minstens vier meter bedragen. De voet van de mast komt te rusten op een betonnen tegel van 50 × 50 cm, 20 cm dik. Mast wordt vastgezet aan tegel en tegel gefixeerd in de grond (tegel ingraven). Bij zachte grond, konstruktie aanpassen aan omstandigheden. (Tegel laten rusten op twee ingegraven bielsen). Wanneer spanwartels worden gebruikt moeten deze worden geborgd met gegalvaniseerd ijzerdraad 3 mm dik (zie tek 13).
De vakwerkmast bestaat uit drie stalen pijpen (uitw. 27 mm, wanddikte 3,5 mm) welke volgens een bepaald patroon met massief 10 mm aan elkaar zijn gelast. De mast-basis is 30 × 30 × 30 cm. Het geheel is gegalvaniseerd en voorzien van tui-ogen en montageplaten i.v.m. boven elkaar monteren van de (3 meter lange) mastdelen. Fabrikaat prototype: BICC.

Beklimbare molenmast

In de praktijk is gebleken dat een molenmast waar je niet in kunt klimmen erg onhandig is. In de eerste plaats moet de mast met molen en al overeind worden gehesen. Daarna blijkt dat je nergens meer bij kunt wanneer dat nodig is. Verwacht niet dat de molen direkt naar wens zal werken. Daarom is de volgende oplossing aan te bevelen:
Een mast volgens tekening of een andere beklimbare mast waarbij de mogelijkheid bestaat om óp de mast te kunnen staan. Je kunt je dan vasthouden aan de uitstekende pijp of de klimgordel daaraan vastzetten. Het kruilager zit dan ongeveer op borsthoogte en de rotor-as op ooghoogte. Op deze manier kunnen in enkele minuten wijzigingen worden aangebracht terwijl de molen zonder moeite bereikbaar is voor onderhoud. Een nadeel is echter het gevaar dat de draaiende molen kan opleveren omdat de draaicirkel, ook voor anderen, makkelijk toegankelijk is. **Pas op dus. Een klap van de molen is levensgevaarlijk.**

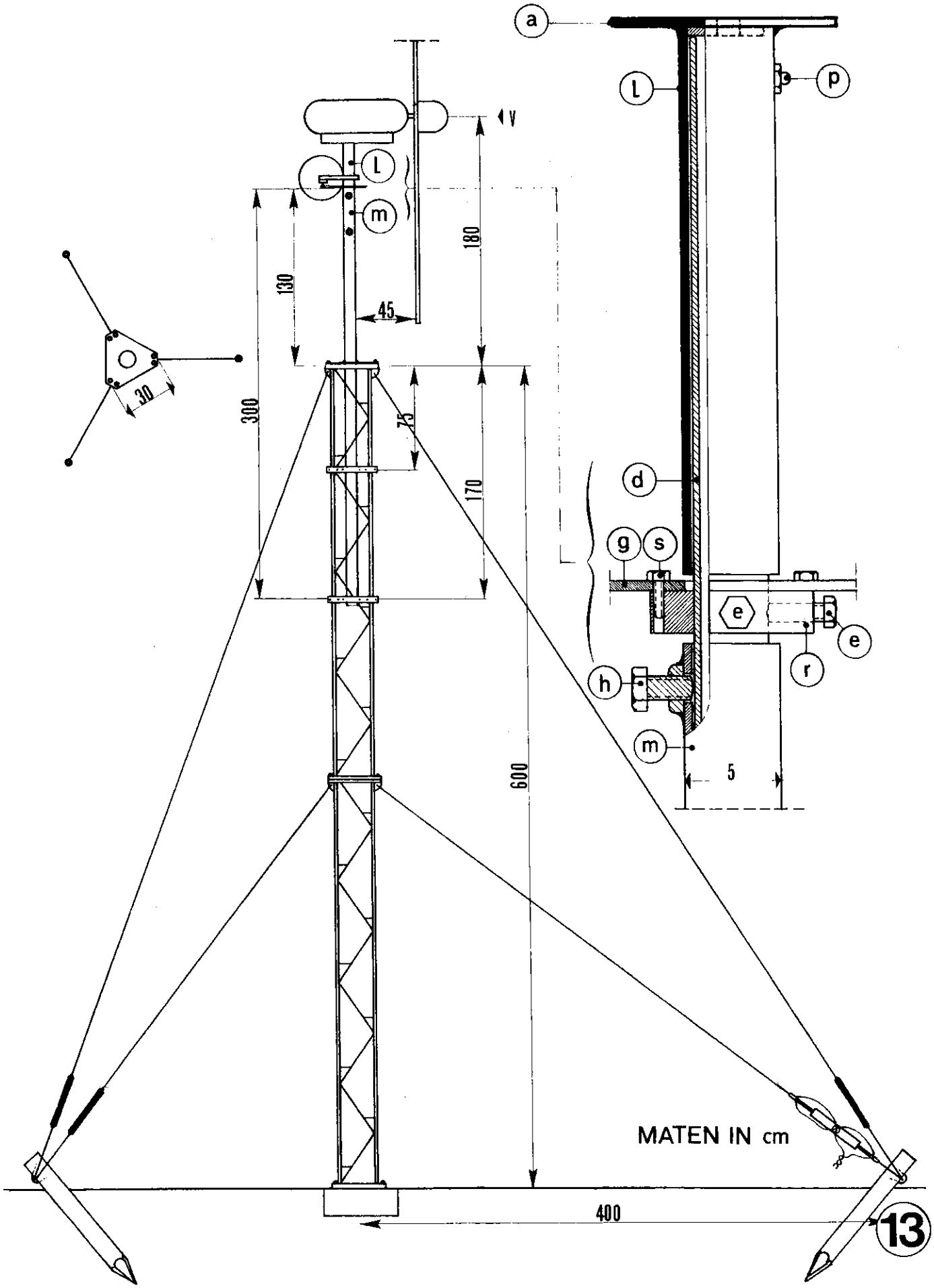

a
l
p
V
l
m
180
130
45
30
300
75
170
d
g
s
e
e
r
h
m
5
600
MATEN IN cm
400
13

KRUILAGER

In tek. 13 zien we ook het kruilager afgebeeld. Een gedeelte hiervan is opengesneden getekend. Boven op plaat **a**, welke is gelast aan pijp **L**, wordt de molen gemonteerd. Pijp **L** kan draaien om geschikt passende pijp **d**, zodanig dat plaat **a** op de bovenkant van pijp **d** kan rusten. Het is raadzaam om het drukpunt tussen plaat **a** en binnenste pijp **d** te voorzien van een schijfje brons of nylon om het invreten van de pijp in plaat **a** te vermijden. De lengte van het kruilager, dus van pijp **L**, moet 25 à 30 cm bedragen.
Pijp **d** loopt door in pijp **m** (molenmast) en wordt hierin vastgeklemd met bout **h** (M16, moer gelast aan pijp **m**). 50 cm lager op de mast **m** wordt dit herhaald. De aansluitdraden van de generator worden door de mast geleid via een gat in het midden van plaat **a**. Met vetnippel **p** wordt het lager gesmeerd. Beide pijpen **L** en **m** kunnen van hetzelfde materiaal worden gemaakt; twee duims dikwandig 4 mm. De binnenste buis **d**, eveneens dikwandig, kan het beste een flink eind in mast **m** worden gestoken, b.v. 1,5 meter. Dit opent de mogelijkheid de gehele molen nog wat omhoog te brengen nadat de molen is gemonteerd waarbij, naast de hoogtewinst, ook de eigen resonantie van de mast wordt verlaagd c.q. aangepast. Onderschat niet de gunstige eigenschappen van deze afstel-mogelijkheid. Probeer te voorkomen dat pijp **d** gaat roesten in pijp **m** door de juiste voorzorgen te nemen. Dat geldt natuurlijk ook voor pijp **d** in **L**. De vrijslag tussen bladtip en mast moet minstens 45 cm bedragen. Houd hier rekening mee tijdens molenopbouw. De tekening van het kruilager bevat nog een aantal onderdelen welke zijn bestemd voor de windservo. We zien hier het middengedeelte van het grote kettingwiel **g** (56 tanden) welke rondom met vier of zes bouten **s** (M8) aan metalen ring **r** wordt bevestigd. Ring **r** wordt met twee maal bout **e** (M10) om binnenpijp **d** goed vastgezet. Kettingwiel kan dus niet draaien! De afmetingen van de diverse onderdelen zullen afhangen van het verkregen materiaal en kunnen worden vergeleken met de pijpdiameter. Zorg in ieder geval dat alles stevig in elkaar zit en kettingwiel goed gecentreerd. De draagarm van de windservo komt met een beugel om pijp **L** bevestigd. Zie hiervoor 'Konstruktie windservo' blz. 11.

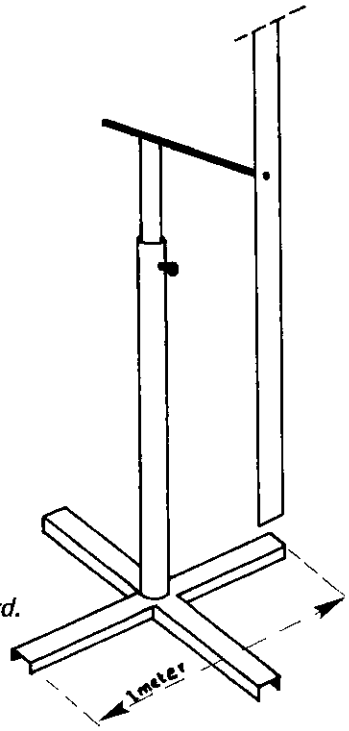
PLAATSEN VAN DE MOLEN

Het plaatsen van de molen kan gebeuren nadat de mast is opgezet en getuid. Het kruilager is zo ingericht dat de molen zonder meer over pijp **d** kan worden geschoven. Dit kan het beste gebeuren door twee mensen welke op de vakwerkmast staan. De molen wordt, zonder bladen, met een touw naar boven getrokken en op het kruilager geplaatst. Zorg dat het kruilager is of wordt gesmeerd. Daarna worden de bladen aangebracht waarvan we intussen precies weten hoe dat moet gebeuren. Vergeet niet de molen op de rem te zetten. (Zie molenrem blz. 58). Wanneer de kruimolen al gereed is kan ook de ketting hiervan worden aangebracht welke tevoren in de werkplaats op maat is gemaakt en uitgekookt in dik kettingvet.


a
l
p
V
l
m
180
130
45
30
300
75
170
d
g
s
e
e
r
h
m
5
600
MATEN IN cm
400
13

BEPROEVINGSSTANDAARD

In een bepaald stadium van de molenbouw komt de wens naar voren om, alvorens de molen op de mast te zetten, eerst eens alle onderdelen te passen en te monteren inclusief bladen en winservo. In zo'n situatie blijkt de molen vooral op de werkbank een zeer onhandig apparaat geworden. We kunnen veel ergernis besparen door een proefstandaard te maken volgens afb. 16. De standaard wordt zo ingericht dat de binnenpijp van het kruilager samen met kettingwiel tijdelijk hierin kan worden aangebracht. We kunnen nu de molen precies zo monteren zoals later in de mast zal gebeuren. We maken de standaard zo hoog dat de bladen vrij kunnen ronddraaien. De rotor kan zo makkelijk worden gebalanceerd terwijl tevens allerlei kritische maten, zoals kettinglengte windservo en het in lijn brengen van de kettingwielen, eenvoudig kunnen worden bepaald.



Afb. 16.
Beproevingsstandaard.

ROTORAS-OVERBRENGING-GENERATOR

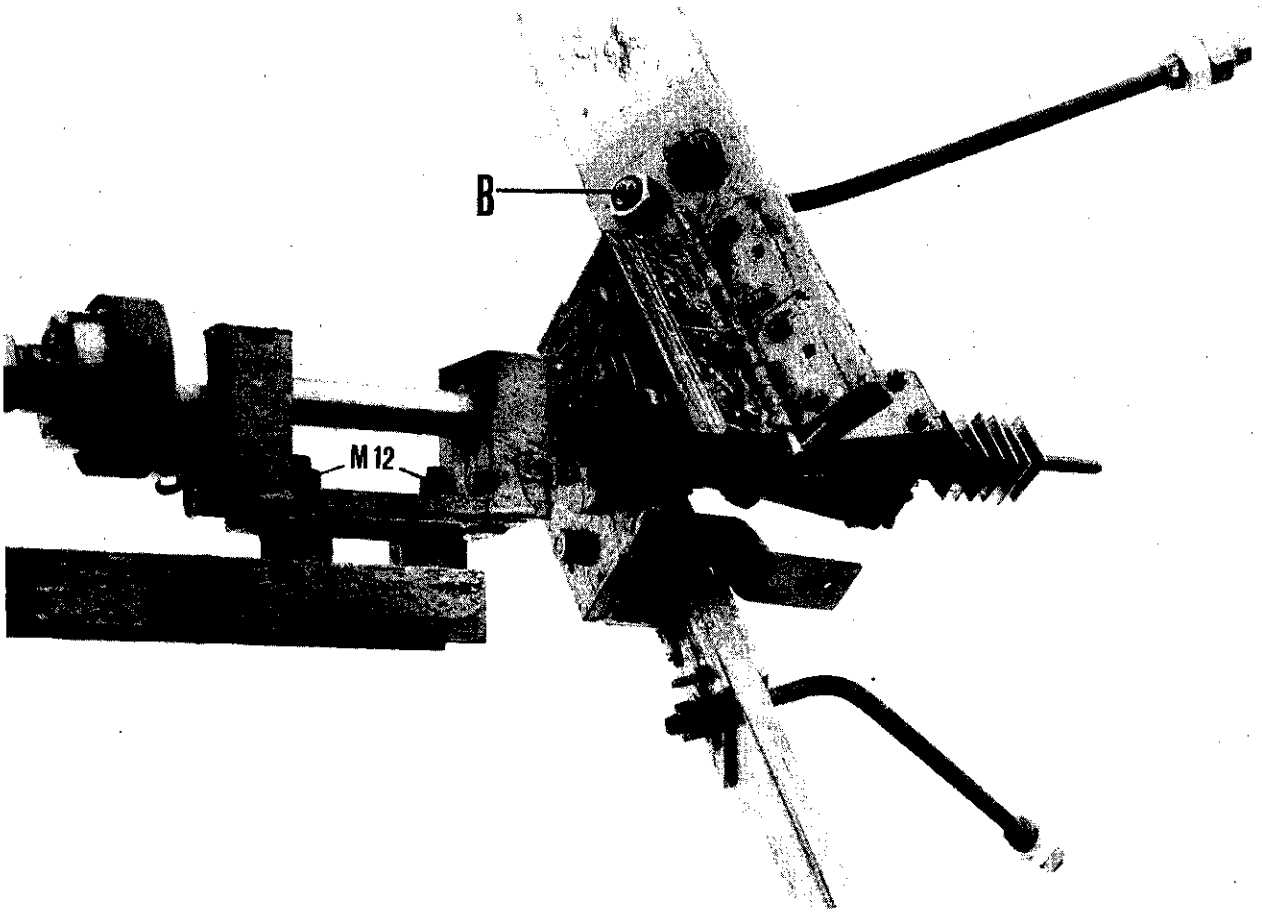
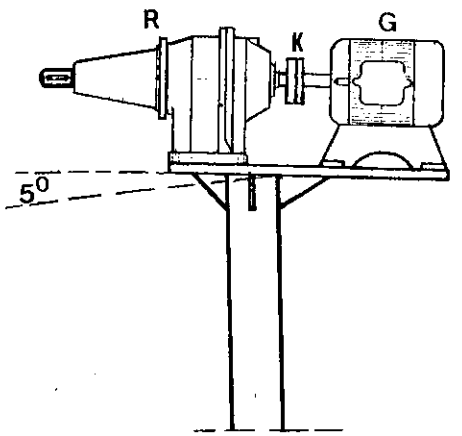


Foto 6: Lagering rotoras, achteraanzicht rotor in aanloopstand. **B** *is een balans-gewicht.*

De rotor-as moet een diameter hebben van minstens 25 mm. De as wordt gelagerd in twee ruimbemeten groefkogellagers (b.v. 6405, SKF) welke in lagerhuizen 25 cm uit elkaar staan gemonteerd op een **U** balk (5 × 5 × 5 × 0,6 cm). De lagerhuizen moeten geschikt zijn voor buitenopstelling. Op foto 6 zien we hoe dit bij het prototype is opgelost, echter, de hier gebruikte lagerhuizen zijn geen gangbare uitvoering.

Wie bovenomschreven lageropstelling kiest heeft in ieder geval de rotor al mooi draaibaar zodat allerlei mogelijkheden openblijven voor zelfbedachte overbrenging/generator zonder het rotorlager steeds te moeten afbreken.

Een andere benadering voor het lageren van de rotor-as is het aanschaffen van een tandwielkastje. De langzaamdraaiende ingaande as wordt dan gebruikt als rotoras mits deze voldoet aan de gewenste dikte. Omdat met deze opstelling de vrijslag van de bladtips in gedrang kan komen kunnen we het beste uitzien naar een tandwielkast met een verlengde uitgaande as. Dit staat bekend als een **roerwerk** uitvoering. Om de zaak kompleet te maken kiezen we een roerwerk uitvoering samen met een voetmontage en twee vrije aseinden. Zie afb. 17. We plaatsen het roerwerk op een montageplaat welke op de mast wordt gelast. Op deze plaats vindt ook de generator een plaats. Wanneer de montageplaat onder een kleine hoek op de mast wordt aangebracht kan de vrijslag van de bladtips nog wat worden vergroot. Het vermogen van de tandwielkast moet ongeveer 0,75 kilowatt bedragen bij een ingaand toerental van 430 omw/min.



Afb. 17. Roerwerk **R** *en generator* **G** *iets schuin opgesteld (5 graden).*

Elastische koppeling

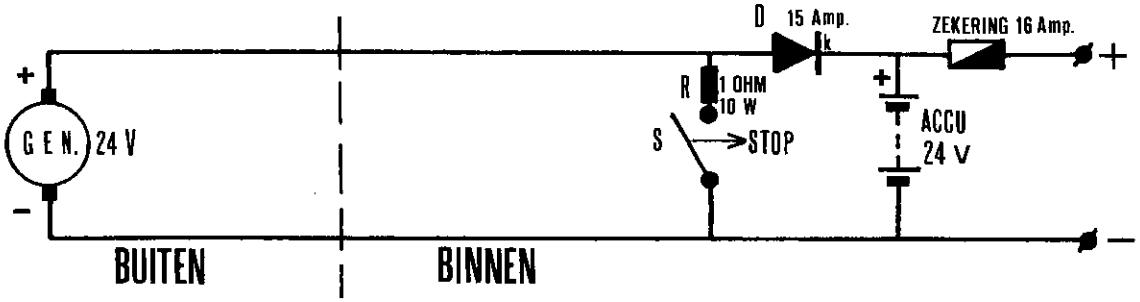
Wanneer de konstruktie zo wordt gekozen dat tussen de molenas en transmissie een elastische koppeling wordt toegepast, dan moet het nominale koppel hiervan 6 kgfm (60 Nm) bedragen. Wanneer een elastische koppeling wordt geplaatst tussen transmissie en generator, dan kunnen we de sterkte hiervan bepalen door deze 6 (kgfm) te delen door de overzetverhouding van de transmissiekast. Voorbeeld: We willen tussen transmissiekast en generator een elastische koppeling. De overzetverhouding van de transmissiekast is 1 : 5. We hebben dan een koppeling nodig die een draaimoment kan overbrengen van 6 : 5 = 1,2 kgfm (12 Nm). Dit voorbeeld betreft de drie meter molen.

Overbrenging

De overbrengverhouding is afhankelijk van de gebruikte generator. Met de generator uit het prototype moet dit 1 : 9 zijn. Bij gebruik van een auto(wisselstroom)generator van 12 of 24 volt welke bij 1000 omw/min de nominale spanning bereikt moet de overbrenging 1 : 4,5 bedragen. Overtuig u ervan dat schuinvertande tandwielen zijn/worden gebruikt met de voorgeschreven smering. Rechtvertande tandwielen zijn echt niet om aan te horen. Het gebruik van V snaren moet worden afgeraden vanwege hoge verliezen. Kettingen lopen licht doch maken lawaai en geven smeerproblemen. Het enige alternatief voor een tandwielkast is een tandriem geschikt voor buitenopstelling. Welke soort overbrenging ook wordt gebruikt; lichtlopend is altijd vereist.

Generator

De in het prototype gebruikte generator is in feite een gelijkstroom elektromotor afkomstig uit een RUTON wasmachine type AWC 326 RU. Opmerkelijk aan deze motor is het gebruik van permanent magneten (stator). Het type van de motor is PM T 12 met bestel/service nummer 4822 361 50195. (Philips) prijs *f* 155,-. Gebruikt als generator kan hiermee direkt stroom worden geleverd zodra de accuspanning is bereikt zonder dat voorzieningen nodig zijn om eerst een magneetveld op te wekken zoals gebruikelijk bij auto-generatoren. Deze eigenschap maakt het mogelijk de molen reeds bij een windsnelheid van 2,5 m/s stroom te laten leveren in een 24 volts installatie. (Bij 1420 omw/min van de generator is de opgewekte spanning 28 V.) De maximale stroom mag echter niet hoger zijn dan 8 amp. of bij zeer goede (lucht)koeling 10 ampère (280 watt). In relatie echter met de windhistogrammen zal blijken dat dit nadeel verhoudingsgewijs slechts korte tijd per jaar optreedt. Daartegenover staat een zeer lange tijd waarin van de voordelen van deze generator kan worden geprofiteerd. Anders gezegd; deze generator levert al een lange tijd energie waar de auto-generator nog steeds bezig is het benodigde veldvermogen op te wekken en dus geen bruikbare energie levert.
Dit moet dan meteen een pleidooi zijn om, in het algemeen gesproken, een generator met permanent veldbekrachtiging toe te passen waarbij tevens de mogelijkheid is geopend de molen af te remmen door de generator kort te sluiten. Nog een graad eleganter is een generator waarbij in het geheel geen borstels zijn toegepast en waarbij de rótor is uitgevoerd als permanent magneet en de hoofdstroom wordt afgenomen van de (3 fase) statorwikkeling dus eigenlijk een autogenerator maar dan met permanente magneet. Wie zoiets op zijn weg tegenkomt kan er wat moois van maken. Deze soort generatoren begint trouwens, ook in grotere vermogens, steeds meer voorhanden te komen. (Zie documentatie Siemens motoren met permanente magneet.) Wanneer generator uit prototype wordt gebruikt kan aansluitschema uit afb. 18 worden gehanteerd. Met schakelaar **S** wordt molen op de rem gezet, dus de generator wordt via **R** kortgesloten. Diode **D** voorkomt dat accu stroom levert aan generator. Diode moet worden gekoeld op koelplaat van 1 dm² alu 2 mm dik. Bij gebruik van generator uit prototype wordt het toerental van de molen zo afgeregeld dat de maximale laadstroom 10 ampère bedraagt.



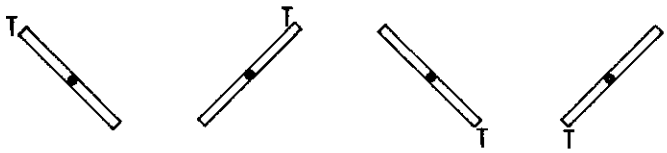
Afb. 18. Aansluitschema gen/accu. Meer is niet nodig. Voor een afstand van 25 m tussen gen. en accu een draaddikte van 2,7 mm (6 mm²).

Tandwielkast prototype

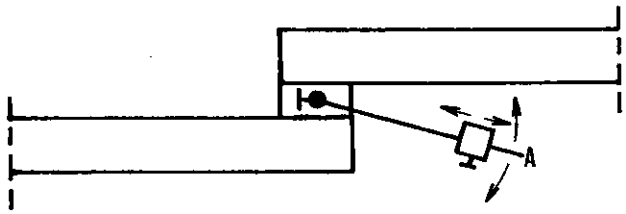
De toegepaste overbrenging in het prototype bestaat uit een planetair tandwielkastje afkomstig uit een wasmachine (Miele, X 550720 1330/133 omw/min). De overzet verhouding bedraagt 1:10 hetgeen in feite iets te hoog is voor de toegepaste generator. Naar het zich laat aanzien is de mechanische sterkte van dit kastje onvoldoende om hiermee laten we zeggen 10 jaar te kunnen overbruggen zodat beter naar een iets robuuster uitvoering kan worden gezocht.

BALANCEREN

Een goede balans is belangrijk voor de molen. Het verlengt de levensduur en imponeert de waarnemer. Windmolens met bladverstelling kunnen het beste worden gebalanceerd met de bladen in de werkstand; uiteindelijk zal de molen meestal in deze toestand draaien. Balanceren vindt plaats nadat de rotor geheel is afgebouwd. In dat geval is de positie van de werkstand vastgelegd. De molenaanloopveren **4b** (tek. 1 blz. 17) worden losgenomen waarna de bladen met de hand in de werkstand worden geplaatst. De rotor moet vrij kunnen draaien op een plaats waar geen luchtstroom heerst. Transmissie en/of generator worden losgekoppeld zodat alleen de kogellagerwrijving van de rotoras overblijft. Wanneer dit niet mogelijk is moet de rotor tijdelijk op een andere manier lichtdraaiend worden opgesteld. We plaatsen nu de rotor achtereenvolgens in vier standen zoals aangegeven:

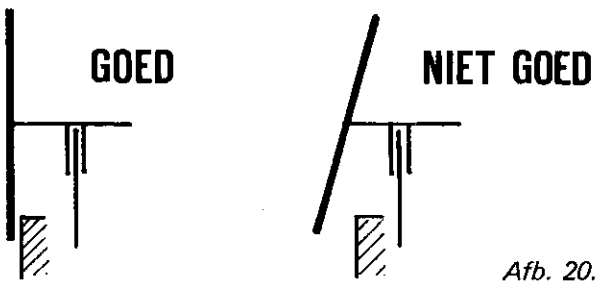


dus steeds 90 graden doordraaien. In elk van de standen wordt de rotor losgelaten. Blijft de rotor in deze vier standen op zijn plaats dan is de balans in orde. Wanneer de rotor vanuit deze posities zich naar een ander evenwichtspunt beweegt dan moeten korrekties in de gewichtsverdeling worden aangebracht. Omdat de rotor niet altijd precies laat zien waar de onbalans ligt verscholen, kun je hier uren mee bezig zijn. Om dit te vermijden kan het volgende worden gedaan: Op de spindel van het regelmechanisme wordt, b.v. in een geboord gaatje in ring **5r** (tek. 1) of in een ekstra ring, een stijve draad **A** (lasdraad 4 mm) aangebracht zoals aangegeven in afb. 19. Lengte van de draad is ongeveer 40 cm. Op de draad een gewichtje van 100 gram dat kan worden verschoven en vastgezet.



Afb. 19. Perfekt balanceren met gewichtje.

Met deze opstelling kan door draaien van **A** en schuiven met gewicht een perfekte balans worden verkregen. De gevonden onbalans wordt 'vertaald' naar een ekstra gewicht ergens op de grondplaat of bladinklemming. Tot zover de **statische balans**. De **dynamische balans** blijkt voor de meeste windmolens niet veel problemen te geven. Volstaan kan worden met het kontroleren van de rotortips tegen een vast punt waarbij beide tips op gelijke afstand moeten passeren. (afb. 20)



Afb. 20.

Aero-dynamische onbalans

Een andere vorm van onbalans welke kan optreden is de **aero-dynamische onbalans.** Deze onbalans kan ontstaan wanneer de bladhoeken van de twee bladen niet precies gelijk zijn waardoor op elk van de bladen een andere liftkracht werkt. We kontroleren dit door de bladen op 0° t.o.v. het draaivlak (dus in de buurt van de wérkstand) precies gelijk te zetten. Omdat mogelijk, door werking in het hout b.v., de bladen een lichte tordering kunnen hebben gekregen, wordt het gelijkstellen van de bladen bekeken aan de bladtips en niet aan de wortels. Anders gezegd; **de bladtips moeten precies dezelfde stand innemen, ongeacht de stand van de bladen aan de wortels**. Met sleufgaten in één van de verbindingsstroken **4a** (tek. 1 blz. 17) kan een nastelmogelijkheid worden verkregen zodat e.e.a. kan worden ingesteld.

FLUTTER VAN HET ROTORBLAD

Flutter is een verschijnsel dat in vrijwel alle stromings-technieken wordt gevreesd en staat bekend als zeer destruktief. Flutter is een trillingspatroon waarbij het betrokken onderdeel energie opneemt en spontaan omzet naar een of andere vorm van beweging. In de rotorbladen van een windmolen kan flutter ontstaan wanneer de bladhoek zich ongekontroleerd kan wijzigen. We kunnen ons dit als volgt voorstellen: Wanneer de wortel van het rotorblad wordt ingeklemd (in bankschroef) dan zal blijken dat we de bladtip met de hand een paar graden kunnen torderen. Dit is afhankelijk van de kracht waarmee we dit doen. Het blad blijkt dus niet oneindig torsie-stijf te zijn. Dit kan zich ook bij een draaiende molen voordoen; aan de wortel blijft de bladhoek in orde maar verder naar de tip kan een niet bedoelde torsie optreden. Deze torsie kan afhankelijk zijn van bladdoorbuiging, bladlift, middelpuntvliedende kracht en natuurlijk materiaal en konstruktie van het rotorblad. In feite blijkt hier een gekompliceerd samenspel op te treden dat tot gevolg kan hebben dat de bladhoek een waarde krijgt waarbij verval van bladlift optreedt, d.w.z. de bladhoek wordt nu zó groot dat de luchtstroom het profiel niet meer kan volgen en 'loslaat'. Het blad, dat eerst mede door deze lift mechanisch was opgespannen, springt hierdoor terug geholpen door de , veelal verende, eigenschappen van het bladmateriaal. De nieuw ingenomen bladhoek blijkt echter weer gunstig te zijn voor het ontstaan van een grote bladlift waarbij het spel weer van voren af aan begint. Tijdens het ronddraaien van de bladen blijkt bovengenoemde cyclus zich, afhankelijk van de bladkonstruktie, met een bepaalde frequentie te herhalen. Het komt er dus op neer dat vooral de bladtips zich tijdens de rondgang zigzaggend door de lucht bewegen met steeds een andere invalshoek. Zie afb. 21.

Omdat de frequentie van flutter relatief hoog kan zijn (prototype: 30 à 40 Hz) spreekt het voor zich dat een dergelijke bladbelasting de molen binnen korte tijd kan vernielen. De besproken flutter wordt 'stall-flutter' genoemd (flutter door overtrek). Naast stall-flutter kan er nog op andere manieren flutter optreden bij windmolens.

Bij het prototype ontstond flutter bij tipsnelheden in de buurt van 120 m/s en dit is waar te nemen als een sterk brommend geluid. Bij juiste afstelling van het regelmechanisme zal de maximum tipsnelheid niet hoger kunnen (en mogen) worden dan 67 m/s (= 430 omw/min rotoras). Wie zich hieraan houdt zal geen last van flutter ondervinden, althans niet beneden de maximale toegestane windsnelheid van 25 m/s.

Afb. 21. Verschillende tiphoeken tijdens flutter.

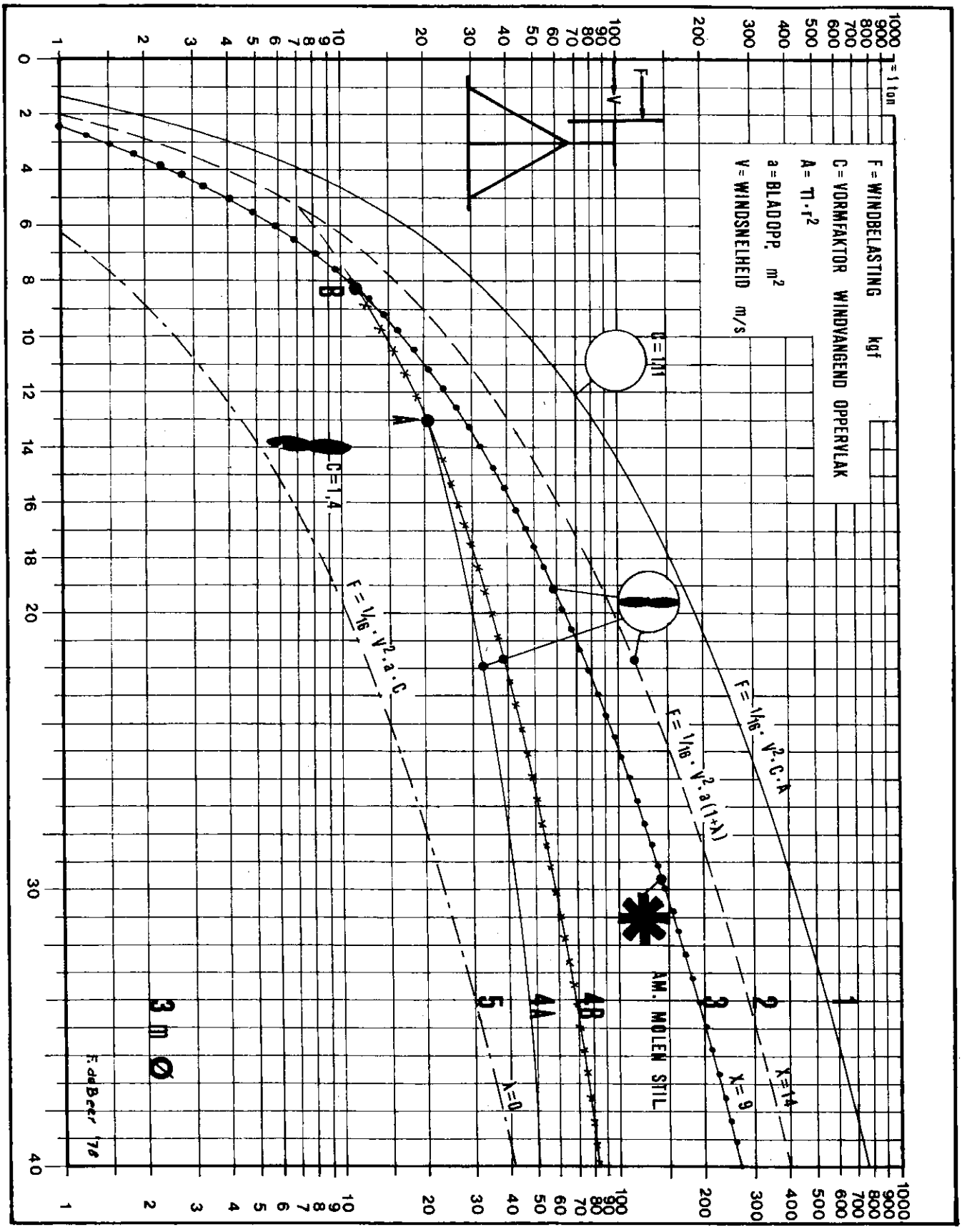
WAAROM GEEN BLADTORSIE ?

De rotorbladen hebben geen bladtordering of spoed en ook is de bladbreedte (koorde) over de gehele lengte konstant. Het molenrendement zal hierdoor 5 à 6 % lager liggen. Daar staat tegenover dat de bladkonstruktie zeer eenvoudig is, zonder het vele werk en materiaal dat voor een bladtorsie nodig is. Een bijkomend voordeel van een recht blad, dus zonder wrong (bladtordering) en bladbreedte verloop is, dat dit over een breder Lambda-gebied een hoog aerodynamisch rendement levert. Dit betekent dat de aanpassing van de generator aan de rotor, bepaald door de overbrengverhouding van de tandwielkast of tandriem, minder kritisch is.

Overigens wordt de totale molenopbrengst in de praktijk veeleer bepaald door hetgeen zich achter de molenas bevindt (transmissie, generator, accu's enz.). Vooral slechte accu's blijken vaak het molenrendement tot meer dan 50 % te reduceren zonder dat iemand zich daar zorgen over maakt (?). Verder is het maar net hoe je het bekijkt: Wanneer, om maar wat te noemen, 500 watt niet voldoende blijkt, is 530 watt dan wel genoeg? Wie echt meer wil moet aan een grotere molen.

HOUTVEREDELING

Voor een lange levensduur moeten de bladen worden voorzien van een weerbestendige coating. In de beginperiode van de experimenten werd verondersteld dat polyester een afdoende bescherming zou bieden tegen allerlei weersinvloeden. Hiertoe werden de bladen doortrokken met een sterkverdunde polyester oplossing waarna een onverdunde deklaag. De polyester bleek echter niet bestand tegen U.V.-straling (zon) waardoor de toch al hygroscopische eigenschappen werden versterkt. Hierdoor ontstonden rottings-haarden in het hout welke niet meer te verhelpen waren. Na een aantal minder geslaagde proeven met kombinaties van verdunde polyester en een deklaag van buitenvernis werd uiteindelijk geheel afgezien van de polyester en voor de volgende oplossing gekozen:
De bladen werden doordrenkt met een 50 % verdunde sneldrogende blanke buitenvernis (Valspar-varnish). Met een zachte kwast worden de bladen zoveel maal behandeld tot geen verdere absorbtie plaatsvindt (4 tot 6 maal). Dit moet, zonder droogtijd snel achter elkaar gebeuren. Daarna, nu met inachtneming van de droogtijd, twee maal een onverdunde laag. Wanneer de lak goed hard is geworden, licht naschuren met staalwol of fijn schuurpapier. Daarna een derde onverdunde laag aanbrengen. Het oppervlak moet er dan glad uitzien wat vooral aan de tips belangrijk is. De zodoende verkregen rotorbladen zijn, met betrekkelijk eenvoudige middelen, goed bestand tegen allerlei weersgesteldheden. Zoals elders is beschreven worden de bladen eerst afgewerkt en gevernist alvorens de wortels worden ingeklemd. De afgemonteerde wortels worden op vitale plaatsen en kieren met onverdunde vernis nabehandeld. Wie ervaring heeft met betere coatings (epoxy?) past die natuurlijk toe. Belangrijk


F kgf
V m/s
F = WINDBELASTING kgf
C = VORMFAKTOR WINDVANGEND OPPERVLAK
A = π · r²
a = BLADOPP. m²
V = WINDSNELHEID m/s
= 1 ton
C=1,11
C=1,4
F = 1/16 · V² · a · C
F = 1/16 · V² · a(1+λ)
F = 1/16 · V² · C · A
λ=14
λ=9
λ=0
AM. MOLEN STIL
3 m Ø
F. de Beer '78

Afb. 22.

blijft dat de bladen na de laatste behandeling glad zijn; een ruw oppervlak verlaagt de snellopendheid en daarmee de energie opbrengst.

WINDLAST OP DE MOLEN

De konstruktie van mast en molen moet zo zijn uitgevoerd dat stormkondities kunnen worden doorstaan. De windlast hangt af van de soort molen. Wanneer b.v. een toerentalbegrenzing wordt toegepast kan de winddruk een heel eind worden gereduceerd. Een andere uitvlucht is om de molen tijdens zwaar weer stil te zetten zodat de winddruk op de rotoras minimaal is. De wind blijft echter tegen de stilstaande bladen drukken waardoor deze op de wortels flink worden belast op buigkrachten. Wanneer de molen draait kunnen deze buigkrachten weer afnemen omdat de bladen zich door centrifugaalkracht willen opstrekken. In dat geval begint echter de bladlift een rol te spelen welke de bladeren weer naar achteren wil trekken.
Al deze faktoren spelen vrij ingewikkeld op elkaar in en het zou te ver voeren deze zaken aan alle kanten te belichten. Wel kunnen we aan de hand van de grafieken in afb. 22 zien hoe de winddruk op de molen verloopt. Als vergelijking is ook de windbelasting van een ronde schijf met eenzelfde diameter als die van de rotor uitgezet.

Grafiek 1 (getrokken lijn) toont ons de windbelasting van deze schijf. In zo'n geval blijkt de windlast bij een windsnelheid van 10 m/s omstreeks 50 kgf te bedragen. Bij 40 m/s is deze windlast opgelopen tot 750 kgf.

Grafiek 2 slaat op de molen. Wanneer we onze molen laten draaien doch niet zouden belasten en tevens een toerenregeling achterwege laten, krijgen we een winddruk verloop volgens lijn 2: 400 kgf bij 40 m/s.

Grafiek 3 geldt voor dezelfde molen; nog steeds zonder toerenbegrenzing doch wel met een belasting aan de rotoras. Windlast is nog steeds behoorlijk hoog (270 kgf bij 40 m/s).

Wanneer we de molen voorzien van een toerenregeling waardoor het toerental van de molen boven 8 m/s windsnelheid niet verder toeneemt, dan zal grafiek 4 ontstaan welke, op de plaats waar de toerenbegrenzing aanvangt (B), zal afbuigen in de kruisjeslijn 4B; 40 m/s = 85 kgf. Deze waarde geldt voor systeem B bij een tipsnelheid van 70 m/s.
Bij systeem A vindt nog een verdere reduktie van de windlast plaats doordat het toerental van de molen weer kan afnemen: punt A getrokken lijn 4A; 50 kgf bij 40 m/s. (Zie 'Werkingsprincipe molen') Dit is echter afhankelijk van de samenstelling van de veer welke het maximum toerental regelt.

Wanneer de molen wordt stilgezet is de windlast op de rotoras minimaal (grafiek 5: 40 kgf bij 40 m/s). We zien hier nu ook duidelijk verschil tussen de windlast van de stilstaande tweebladige rotor en de, ter vergelijking aangehaalde, 'Amerikaanse' molen van dezelfde diameter welke eveneens is stilgezet. (λ9 slaat niet op deze Amerikaanse molen). Dit verklaart waarom het prototype op een relatief dunne mast kan worden opgesteld.
Niettemin moet er voor worden gezorgd dat de molen boven 20 à 25 m/s wordt stilgezet. Dit niet vanwege de hoge windlast doch door verhoogd flutter risiko.

INSPEKTIE-SMERING-ONDERHOUD

Voor een lange levensduur moet de molen regelmatig worden geïnspekteerd. Omdat iedereen wel weet waar zijn zelfgebouwde molen zwakke plekken vertoont is het moeilijk algemene regels voor onderhoud te geven. Gezond verstand en een hoop feeling zijn de beste waarborgen. Bedenk dat vrijwel alles aan de molen in beweging is en dat materiaalmoeheid de belangrijkste bedreiging vormt. De molen zelf zal zo'n 150 miljoen omwentelingen per jaar maken met nog eens een veelvoud hiervan aan allerlei trillingen zodat enige bezorgdheid best op z'n plaats is, vooral wanneer de molen al geruime tijd in gebruik is.
Een strijkbout is op een bepaald moment kapot en maakt dit zonder verdere gevolgen kenbaar. Een windmolen welke 'op' is zal dit op een goeie dag duidelijk laten merken door uit elkaar te slaan met de hieraan verbonden gevolgen. Kortom, genoeg problemen voor de toekomst, tenzij de gehele molen regelmatig op slijtage en haarscheuren wordt onderzocht of anders de molen na verloop van tijd vervangen door een nieuwe.

De spindel van het regelmechanisme (viltje) moet elke zes maanden worden voorzien van wat olie. Met iets andere voorzieningen (olie kanaaltje in glijbus o.i.d.) kunnen de smeerintervallen veel langer worden gemaakt. Alle scharnieren worden met een stug vet (tuinvet dat gaat heel goed) in elkaar gezet waarna deze, wanneer molen definitief in bedrijf komt, aan alle kanten dik in de tectyl wordt gezet. Eénmaal per zes maanden de zaak kontroleren en zo nodig de behandeling opnieuw doen. Tandwielkast(je) op voorgeschreven intervallen voorzien van verse olie. Tandriemen kontroleren op slijtage. Kruilager af en toe wat vet. Wanneer de molen wordt geplaatst voorzie dan de generator van nieuw vet in de lagers en plaats eventueel nieuwe koolborstels.

Blanke metaaldelen (mast-molen-generator?) vetvrij maken en tweemaal behandelen met Tencopal chassislak (goudmerk). Dit is een bruinzwarte vloeistof tegen roest. (Werkt goed en zuinig). Rotorbladen van tijd tot tijd kontroleren op breuk of beschadiging van de laklaag. Bouten en moeren van rotorkonstruktie en asflens kontroleren op 'loslopen'. Het kan ook geen kwaad om af en toe de tuidraden eens langs te lopen zodat zwakke plekken op tijd kunnen worden verholpen.

ALGEMENE WENKEN EN GEGEVENS

T.V.-STORING

Rotorbladen van metaal (wie daarover mocht denken) kunnen een niet te verhelpen T.V. storing veroorzaken door ongewenste reflekties van radiogolven. De soort storing is te vergelijken met die waarbij het T.V. beeld scheeftrekt en vervormd wanneer een vliegtuig overkomt, echter, bij de molen gaat het nooit meer weg.

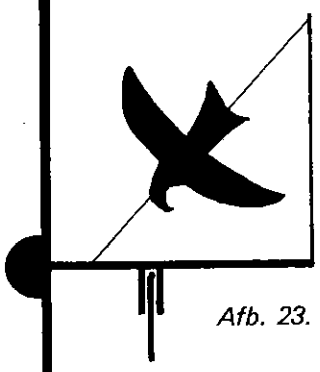
BUISKONSTRUKTIES KUNNEN STUKVRIEZEN

Buis- of pijpkonstrukties vriezen stuk wanneer water in de buis kan blijven staan. Remedie: één centimeter vanaf de onderkant een gat boren van zes mm.

OPTISCHE HINDER

Eén facet van het windmolenbedrijf waaraan vrijwel nooit wordt gedacht laat staan gesproken is de optische hinder welke de molen kan opleveren. Hiermee wordt niet bedoeld de optische of horizon vervuiling doch de hinder die wordt ondervonden wanneer de schaduw van de draaiende rotorbladen, vooral bij laagstaande zon, de woon- of werkruimte kan binnendringen. Niet iedereen blijkt de hierdoor ontstane periodieke lichtvariaties te kunnen verdragen. Vooral buren die mogelijk wat minder zijn betrokken bij uw energie-voorziening kunnen, door te wijzen op deze hinder, uw molen stilleggen. De klacht kan op medische grond formeel worden gemaakt. Beschouw dit niet als een grap en probeer hiermee rekening te houden door voor de molen een juiste plaats te zoeken.

VOGELS EN WINDMOLENS



Afb. 23. Roofvogel om andere vogels weg te houden.

Vogels kunnen het slachtoffer worden van de draaiende rotorbladen. Dit kan worden voorkomen door uit een zwarte kunststof de afbeelding van een 'vallende' roofvogel te knippen en deze op te spannen aan een draad volgens afb. 23. Het door de wind bewegende silhouet van deze vogel houdt andere vogels op afstand. De meeste vogels blijken echter de molen snel in de gaten te hebben. Voor uilen welke overdág vliegen om de jongen te voeren blijkt dit helaas niet op te gaan.

SCHARNIEREN

Zoals al eerder opgemerkt moeten de scharnieren, waarmee de bladverstelling plaatsvindt, van een **goede kwaliteit** zijn. 'Doe het zelf' winkels hebben meestal alléén courante maten in voorraad zodat het niet denkbeeldig is dat de door ons gezochte scharnieren er niet bij zitten. In zo'n geval kan het beste een katalogus van fijne metaalwaren worden geraadpleegd, of folders van scharnierfabriekanten. (Bosch NV in Terborg, Pimex in Moerkapelle).
Het blijkt dat er meer soorten bestaan dan we ooit hadden vermoed, ook in R.V.S. Kogelscharnieren, dit zijn scharnieren waarbij om de scharnierpen tussen de draaiende delen een kogelkransje is aangebracht, zullen zonder twijfel een gunstige uitwerking hebben op de levensduur van de molen. Het spreekt voor zich dat het gebruik van scharnieren om de bladen te verstellen is voortgekomen uit de wens zo veel mogelijk 'herkenbare' onderdelen toe te passen en dat andere oplossingen niet zijn uitgesloten. Een ieder moet zelf maar zien wat hem het beste schikt. **Als het maar sterk is.** Gebruik geen aluminium of messing scharnieren.

TANDWIELKASTEN

Tandwielkasten en roerwerken kunnen wanneer ze nieuw zijn tamelijk zwaar lopen. Dit wordt veroorzaakt door nieuwe kogellagers en eventueel aanwezige simmerringen. Na een paar weken draaien zal dit zijn verdwenen. Probeer bij de aanschaf wel een lichtlopend type uit te zoeken. Sommige fabrikanten voorzien hun tandwielkasten van een dikke oliesoort om de kast minder lawaai te laten maken (en mogelijk ook om andere redenen). Tandwielkasten met deze 'welvaart-smering' hebben een lager rendement omdat de dikke olie een ekstra draaiweerstand oproept. Informeer altijd of een tandwielvertragings kast (motorreduktor) omgekeerd kan worden gebruikt als versnellende kast. Kies verder een fabrikaat waarvan bekend is dat ze lawaai-arm zijn. Schuinvertande tandwielen zijn hiervoor wel nodig doch garanderen niet persé een geruisarme kast. Gebruik de door de fabrikant voorgeschreven smering.

METING TOERENTAL ROTORAS

Het bepalen van het rotortoerental kon bij het prototype plaatsvinden door de onbelaste generatorspanning op te meten. Deze spanning immers wordt bij deze generator evenredig groter met het toerental. Wanneer door het toepassen van een andere generator deze meting niet kan plaatsvinden kunnen we het beste een 6 volt gelijkstroommotortje uit een cassette recorder laten meedraaien met de generator(as). Van dit motortje, dat nu werkt als een kleine dynamo, wordt eerst de onbelaste spanning opgemeten bij een bekend toerental (boormachine). Gekoppeld aan de generator in de molen kan de afgegeven spanning worden herleid naar omw/min van de rotor. Voorbeeld: Stel opgemeten spanning van cassettemotor bij 1500

omw/min is 3 volt (ijkwaarde). Meedraaiend met de generator vinden we b.v. 5 volt overeenkomend met 5/3 × 1500 toeren = 2500 omw/min van de generator. Stel vervolgens de overbrengverhouding van rotor naar generator op 1:6, dan draait de rotoras 2500:6 = 417 omw/min. Overigens kan zo'n meedraaiende kleine dynamo ons nog veel meer diensten bewijzen zoals het opstarten van een auto generator zoals hierna zal worden besproken.

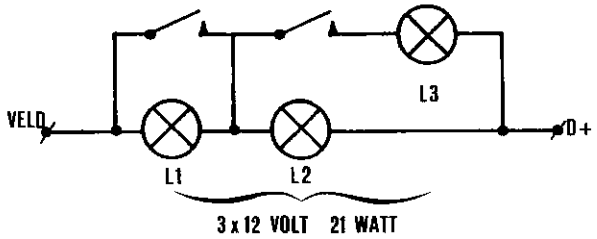
AUTO-WISSELSTROOM-GENERATOR

Telkens blijkt het 'aanzwengelen' en regelen van een autodynamo allerlei problemen met zich mee te brengen. Veelal wordt de veldwikkeling zonder verdere voorzorg verbonden met de regelaar en dan maar kijken wat er gebeurd. Zo ontstaat dan het volgende beeld: Molen gaat snel draaien totdat veld wordt opgewekt. Omdat de regelaar niet kijkt naar de molenbelasting zal de veldstroom direkt de maximale waarde bereiken (veld in verzadiging). Hierdoor wil de generator een groot vermogen leveren hetgeen doorgaans tot gevolg heeft dat toerental van de molen afneemt door te zware belasting. Dan stopt de veldopbouw in de generator waardoor molentoerental weer toeneemt en de cyclus zich herhaald. Velen zullen dit herkennen als de 'schommelstroom' waarbij de molenopbrengst gemiddeld erg laag is. Bovenomschreven verschijnsel treedt vooral op wanneer de veldstroom **te hoog** is of de overbrengverhouding tussen molenas en generator **te groot** is gekozen. Typerend voor de auto(wisselstroom)generator is dat deze bij laten we zeggen 1000 omw/min goed zou kunnen werken maar pas bij een aanzienlijk hoger toerental in staat is zelf de veldstroom op te starten. Om dit probleem het hoofd te bieden zijn al talloze oplossingen bedacht waaraan ik er graag nog een paar toevoeg. De opzet is als volgt:

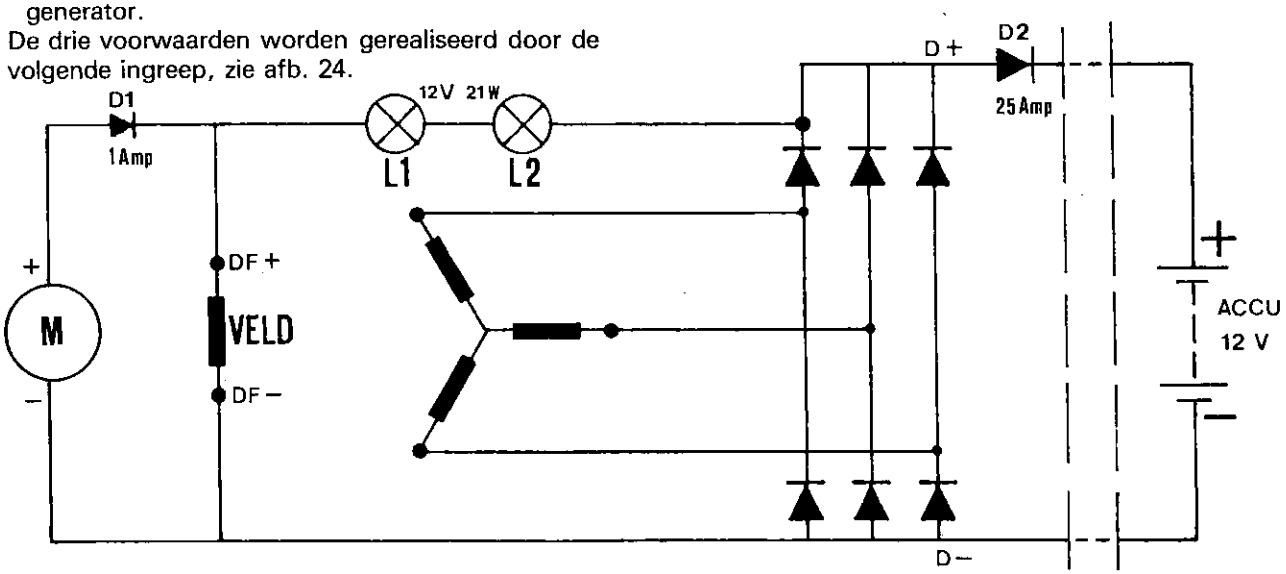
1 Laat de meedraaiende cassette motor het veld in de generator opstarten.
2 Houd vervolgens de veldstroom op een waarde welke gemiddeld de meeste energie levert.
3 Blijf uit de buurt van de veldverzadiging van de generator.

De drie voorwaarden worden gerealiseerd door de volgende ingreep, zie afb. 24.

De werking is als volgt:
De (6 volt) cassette motor **M** laat via **D1** een kleine stroom door de veldwikkeling lopen. Alle andere wegen zijn door dioden afgesloten. Na opstarten betrekt de veldspoel zijn stroom, via beide lampen **L**, uit de plus van de generator. Acculading kan beginnen via **D2** geschikt voor maximale laadstroom. Lampjes **L** houden de veldstroom op ongeveer de helft van de maximum toegestane veldstroom (algemene richtwaarde). Voor een normale 14 volt autodynamo ligt dat rond 1 à 1,2 ampère. Waarom lampen en niet gewoon een weerstand? Het blijkt dat de opstartprocedure, en dat geldt algemeen, voor een groot deel wordt bepaald door de kringweerstand van de veldwikkeling samen met de overgangsweerstand van de borstels. Deze weerstand moet zo laag mogelijk worden gehouden en het aanbrengen van een normale voorschakel weerstand is hiermee in strijd.
Bij gebruik van een gloeilamp is dit niet het geval omdat de weerstand van de lamp in **koude** toestand erg laag is. Na het opstarten gaat de veldstroom door de lampjes waardoor de weerstand hiervan toeneemt tot een waarde die in overeenstemming is voor een juiste veldstroom. In ons geval (14 volt dynamo, twee autolampen van 12 V 21 watt) gloeien de lampen net iets op. Het totale opgenomen vermogen van veldspoel en lampen is dan 14 watt. Wanneer we de schakeling uitbreiden met nog zo'n lampje en twee schakelaars volgens afb. 25 dan kan een goed kompromis voor de meest heersende wind worden gevonden.



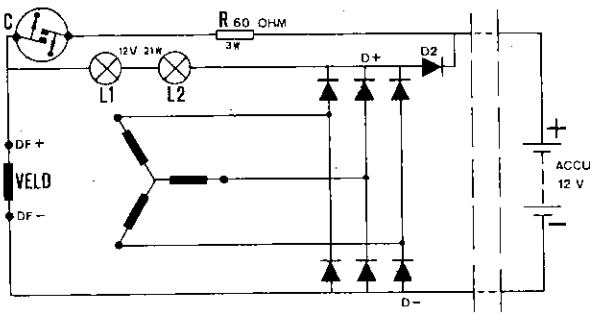
Afb. 25. Zoeken naar de optimale veldstroom.



Afb. 24. Cassette-motor, werkend als kleine dynamo, helpt generator opstarten. **L1** *en* **L2** *bepalen de veldstroom.*

Als de aansluitdraad van de veldspoel ook binnenshuis wordt gehaald kunnen we daar de zaak rustig afregelen. Uit dit verhaal moet de konklusie worden getrokken dat de overgangs-weerstand van de koolborstels van grote invloed is op de 'aanzwengelprocedure'. Zorg dus dat sleepringen en borstels glad, schoon en vetvrij worden gemaakt (en gehouden). Mocht bovenomschreven methode niet lukken dan moet de cassette motor wat sneller worden aangedreven b.v. twee maal het toerental van de generator (twee wieltjes, dun snaartje).

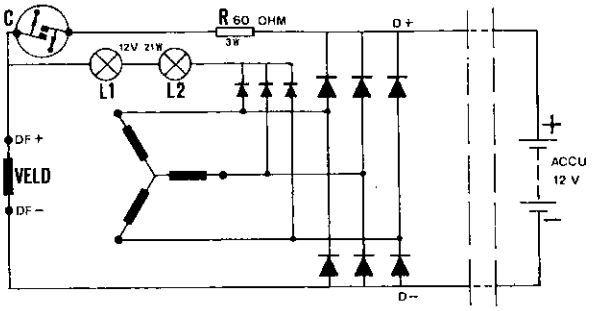
PAS OP. Sommige cassette motortjes zijn voorzien van een ingebouwde centrifugaal regelaar om, werkend als motor, het toerental te regelen. Bij te hoog toerental wordt binnenin het motortje de stroom onderbroken. Dit kan voor ons doel problemen geven. We kunnen dit kontroleren door de motor met een boormachine aan te drijven en de spanning op te meten. Bij een bepaald toerental, ergens tussen 1400 en 1800 omw/min, zien we de voltmeter terugvallen op het moment dat het inwendige kontakt zich opent. Voor slimme mensen opent zich nu weer een andere mogelijkheid; motortje uit elkaar nemen en de centrifugaal regelaar zo bewerken dat boven een bepaald toerental de regelaar juist kontakt máákt i.p.v. onderbreekt. Door nu alleen het centrifugaal kontakt via twee sleepringen en de borstels naar buiten te voeren, kunnen we bij een bepaald toerental de veldstroom van de generator op gang brengen. De rest van het motortje (wikkeling-magneet) is dan niet meer nodig. We krijgen dan het schema volgens afb. 26.



Afb. 26. Cassette-motor is omgebouwd tot centrifugaal schakelaar. Bij een juist toerental wordt generator opgestart.

Centrifugaal schakelaar **C** laat, bij geschikt toerental (900 à 1000 omw/min), een stroom van 0,2 amp. via **R** door de veldspoel lopen. Hierdoor komt de generator op spanning waarna veldstroom weer via **L1**, **L2** wordt geleverd. Centrifugaal schakelaars zijn ook in de handel verkrijgbaar. Bij gebruik van de, in de generator aanwezige velddiodes, komt **D2** te vervallen en wordt de situatie volgens afb. 27. Dit laatste geldt natuurlijk ook voor de eerder besproken mogelijkheden.

De schakelingen kunnen niet missen en voorkomen op effektieve wijze negatieve molenrendementen welke veelal het gevolg zijn van op verkeerde tijdstippen in- en uitschakelen van de veldstroom. Ekstra voordeel van lamp in serie met veld: wanneer onverhoeds de accu bij draaiende molen wordt losgenomen (mag natuurlijk niet), dan brandt lámpje door in plaats van generator.



Afb. 27. Veldstroom wordt geleverd door in generator aanwezige veld dioden. Opstarten met centrifugaal schakelaar.

Nog even iets over de lampjes: Koudweerstand per lampje is 0,4 ohm. Nominale weerstand is 6,8 ohm dus wanneer 21 watt wordt opgenomen (1,8 A). Bij 1A stroomdoorgang is de weerstand 4 ohm (opgemeten). Weerstand veldspoel is 5 ohm, daar komt bij; twee maal de lampweerstand (8 ohm) is totaal 13 ohm. Veldstroom stabiliseert zich rond 1,1 ampère. Eén gloeilamp van 24 V 40 watt doet ongeveer hetzelfde. Voor een 28 V generator kan op dezelfde wijze worden gewerkt (twee lampen van 24 V-40 watt). In de meeste gevallen kan de regelaar achterwege blijven. Bij voldoend grote accu-capaciteit (200 Ah hebben we toch minstens nodig) kan de maximum laadstroom makkelijk worden verwerkt. Bij volle accu's en toch nog voldoende wind had de generator, op kommando van de regelaar, gestopt met het leveren van energie. Dit lijkt me geen goed gebruik van de molen zodat we in zo'n geval beter een ekstra belasting aan de accu kunnen koppelen in de vorm van verwarmingselementen t.b.v. warm water. Een schakeling welke dit verzorgt wordt na het onderstaande praktijkvoorbeeld besproken.

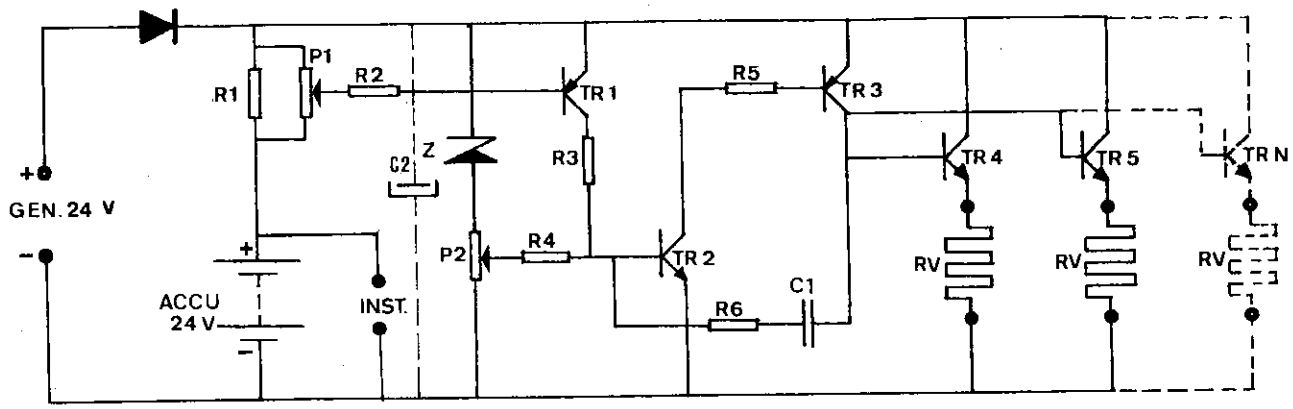
PRAKTIJKVOORBEELD AUTO-WISSELSTROOMGENERATOR OP DRIE-METER-MOLEN

Dynamo: FIAT type: A12 M 124/12/42 B. 12V Nom. 53 A.
Gekoppeld aan drie meter molen ($\lambda = 9$) via overbrenging 1:4,5.
Veldstroom: 1 à 1,3 A (twee lampjes). Lading in 12 V accu begint tussen 3-3,5 m/s windsnelheid. Zie afb. 26.

OVERLOOP VAN ACCU NAAR EKSTRA BELASTING

Bewaking maximale accuspanning/stroom

Het is raadzaam de moleninstallatie te voorzien van een 'overloop' schakeling die, bij volle accu's, de opgewekte energie uit de molen naar een ekstra belasting stuurt. Deze ekstra belasting kan bestaan uit een verwarmingselement welke een (kleine) hoeveelheid water kan voor- of opwarmen. De molen kan dan blijven draaien zodat we van de maximale opbrengst kunnen profiteren. Het principe van de schakeling is dat de verwarmingselementen worden



Afb. 28. Bewaking accuspanning/stroom.

TR1 – ASY 27
TR2 – 2N2219A
TR3 – BDW52C
TR4, TR5, TRN – 2N3055

Z – ZENER Z27

P1 – 1K Ω
P2 – 1K Ω

R1 – 0,01 Ω 2 WATT
R2 – 10 KΩ
R3 – 33 KΩ
R4 – 1 KΩ
R5 – 470 Ω 2 WATT
R6 – 68 KΩ

RV – 5 Ω 150 WATT

C1 – 0.15 µF
C2 ZIE TEKST

ingeschakeld zodra, óf de maximale spanning óf de maximale laadstroom van de accu wordt overschreden. De schakeling is ontwikkeld voor een 24 volts installatie doch kan, zij het iets minder efficiënt, ook op een 12 volts installatie worden toegepast. Afb. 28 geeft het schema van een dergelijke voorziening.

Koeling: TR3, TR4, TR5-TRN elk 0,5 dm² alu 3 mm dik. Mits TR3 geïsoleerd is opgesteld kunnen TR3 t/m TRN op één koelplaat.

24 volt (RV = 5 ohm, 150 watt)
Voor 2 × RV is R3 33 kohm en R5 470 ohm (2 watt)
Voor 4 × RV is R3 18 kohm en R5 330 ohm (3 watt)
Voor 6 × RV is R3 10 kohm en R5 220 ohm (4 watt)

12 volt (RV = 2,3 ohm, 75 watt)
Voor 2 × RV is R3 18 kohm en R5 220 ohm (4 watt)
Voor 4 × RV is R3 10 kohm en R5 150 ohm (5 watt)
Voor 6 × RV is R3 5 kohm en R5 100 ohm (7 watt)

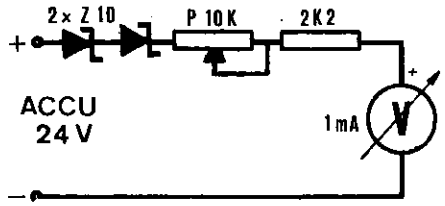
De werking van de schakeling is als volgt:

Via diode **D** (in prototype moest deze diode worden aangebracht om te voorkomen dat de stroom uit de accu terug kan vloeien naar de gelijkstroom generator) en weerstand **R1** wordt accu opgeladen. Over de lage weerstand (0,01 ohm) **R1** ontstaat een spanning welke afhankelijk is van de laadstroom. Bij de maximale laadstroom, welke met **P1** wordt ingesteld, gaat (germanium) transistor **TR1** open. Hierdoor eveneens **TR2** en **TR3** (**TR3** = BWD 53C = complementair aan 2N3055) waardoor de verwarmingselementen **RV** via **TR4** en **TR5** met de accuspanning worden verbonden en het oververmogen wordt opgenomen.
Per element, dus per **RV** kan 150 watt worden verwerkt. Met de weerstands-waarden bij het schema kunnen twee van deze **RV's** worden toegepast. Wanneer meer **RV's** nodig zijn moeten enkele weerstandswaarden worden veranderd (zie tabel 24 volt). Bij een 12 volts accu kan per **RV** niet meer dan 75 watt worden opgenomen (zie tabel 12 volt bij afb. 28). De schakeling is door **C1** en **R6** 'meegekoppeld' om te zorgen dat de transistoren óf open óf dicht staan wat voorkomt dat ze te warm worden. Wanneer slechts weinig stroom moet 'overlopen' zal de schakeling in eerste instantie de **RV's** pulserend met de accu verbinden. Bij toenemende vermogensopname door de **RV's** zal het pulserend karakter geleidelijk verdwijnen totdat uiteindelijk de sturing op **TR2** zo groot is geworden dat de **RV's** kontinu via de **3055'ers** met de accu zijn verbonden. Tot zover de werking wanneer de maximale laadstroom wordt overschreden. Voor de maximale spanning gedraagt de schakeling zich hetzelfde, alleen wordt nu het overloop-proces ingeleid wanneer de stroom door de zenerdiode **Z**, ten gevolge van een te hoge accu-spanning, zal toenemen waardoor **TR2** opengaat enz. Potentiometer **P2** wordt ingesteld op een maximale accuspanning van 27 volt (= iets beneden kookpunt accu). Voor een 12 volts accu moeten de **RV's** een waarde hebben van 2,3 ohm terwijl de overloop moet beginnen bij een accuspanning van 13,5 volt (zenerdiode is **Z12**). De schakeling kan op elke 12 of 24 volts gelijkstroom installatie worden gebruikt ongeacht de toegepaste generator. Wanneer niet in aktie, verbruikt de schakeling geen stroom.
Niet vergeten; Voor een 24 volt accu: maximale spanning 27 volt, minimale spanning 21 volt. Voor 12 volt accu: maximale spanning 13,5 volt, minimale spanning 10,5 volt.

Tenslotte nog dit: Wie alle, door de molen opgewekte, energie wil afstaan aan b.v. een elektrische (24 volts) boiler, kan de accu beter achterwege laten. Voor een goede werking van de molen moeten echter de verwarmings-elementen van de boiler op het juiste moment worden aan- of afgeschakeld. Hiervoor kunnen we eveneens de schakeling in afb. 28 toepassen. Deze schakeling 'kijkt' in dit geval alléén naar de generatorspanning. Bij het overschrijden van een bepaalde spanningswaarde (in te stellen door zenerdiode **Z** en potentiometer **P2**), zal de schakeling in werking treden zoals eerder omschreven, d.w.z. de verwarmings-elementen **RV** (welke hiertoe in de boiler zijn aangebracht) zullen alle beschikbare energie opnemen. Voor een dergelijk gebruik komen de volgende onderdelen te vervallen; **R1** - **P1** - **R2** - **TR1** - **R3** en accu of andere belastingen. Toegevoegd moeten worden de kondensator **C2**. Voor een 28 volts installatie is de grootte van de kondensator: 4700 uF 60 volt.

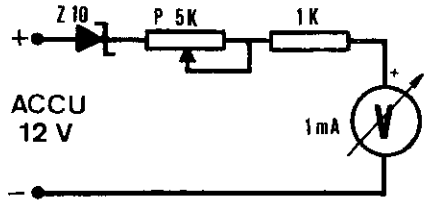
METEN VAN ACCUSPANNING

Voor het meten van de accuspanning kunnen we het beste een voltmeter gebruiken met een uitgestelde schaal. We laten de voltmeter alleen dát gebied van accuspanning aanwijzen wat voor ons van belang is. Voor een 24 volts installatie is dat van 20 tot 30 volt. De schaalverdeling op de voltmeter loopt dus niet van 0 tot 30 volt maar van 20 tot 30 volt zodat we over het interessante gebied een nauwkeurige schaalaflezing hebben terwijl ook de konditie van de accu in de gaten kan worden gehouden. Hoe de eerste 20 volt worden onderdrukt zien we in afb. 29.



Afb. 29. Voltmeter met uitgestelde schaal.

Zenerdiode **Z** begint pas boven 20 volt stroom door te laten. M.b.v. potentiometer **P** wordt bij een spannig van 30 volt de meter op volle schaal ingesteld. Daarna in stappen van één volt de schaal ijken en de gevonden wijzerstanden op de bestaande schaal intekenen. Voor 12 volt zie afb. 30. Voor deze spanning loopt de schaal op de voltmeter van 10 tot 15 volt.



Afb. 30.

12 OF 24 VOLT?

Hoewel 12 volts onderdelen wat meer voorhanden zijn moet toch worden aangedrongen de installatie te baseren op 24 volt. In het algemeen geldt dat wanneer de spanning hoger wordt gekozen, de stroomsterkte dan evenredig kleiner kan zijn. Dit houdt in dat de gehele installatie met dunner draad kan worden uitgevoerd terwijl de verliezen in allerlei onvermijdbare weerstanden (zekeringen, overgangsweerstanden van schakelaars, lampen, aansluitstroken e.d.) zelfs vier maal zo klein zullen zijn. Dit laatste b.v. wanneer in plaats van 12 volt voor 24 volt wordt gekozen. Al deze zaken leggen de voorkeur duidelijk op een 24 volts installatie.

MOLENREM

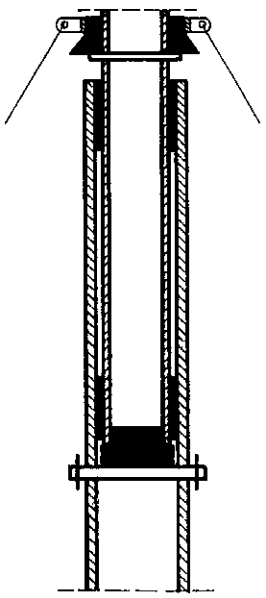
De molen installatie zoals deze is omschreven is niet voorzien van een mechanische rem. Het prototype kon immers worden stilgezet door de generator kort te sluiten. Wanneer een generator zonder permanent magneten wordt gebruikt is het **noodzakelijk de molen uit te breiden met een goedwerkende rem.** De remeigenschappen moeten van dien aard zijn dat de molen geleidelijk kan worden afgeremd. Dit kan het beste gebeuren voor de eventuele overbrenging dus direkt op de rotoras. Trommel-, schijf- of bandrem zijn voor dit doel geschikt. Het remkoppel moet voor de drie meter molen minstens, doch niet veel meer dan 5 kgfm (kilogramforce-meter) bedragen. Ofwel 50 Nm (Newton-meter). Opmeten als volgt: Molen op de rem zetten, op één meter afstand van de rotoras haken we een unster (12 kg) aan één van de rotorbladen en trekken in de draairichting van de molen, haaks op het rotorblad. Bij 5 kg mag de rem nog net niet slippen.

AFSCHERMKAP REGELMECHANISME

Om het regelmechanisme te beschermen tegen allerlei ongerief moet een afschermkap worden aangebracht. Hiervoor kan een op maat gekozen plastic emmer worden gebruikt welke door twee steunen, gemonteerd aan grondplaat, op zijn plaats wordt gehouden zie foto 4 blz. 34. Centrering van de kap vindt plaats door een gat in de bodem van de emmer welke over de uitstekende spindel past.

MOLENS OP HUIS OF BOOT

Het plaatsen van molens op woningen moet worden afgeraden. In de eerste plaats is de geluidsoverlast veroorzaakt door allerlei trillingen moeilijk onder de knie te krijgen. Verder veroorzaken de voortdurend aanwezige trillingen een degradatie van (stenen) gebouwen omdat na een aantal jaren de specie tussen de stenen los begint te raken. Wanneer geen andere plaats voor de molen beschikbaar is zoals b.v. op een woonboot dan kan een gedempte mastkonstruktie worden toegepast zoals in afb. 31 is weergegeven.



Afb. 31. Mast met trillingdemper.

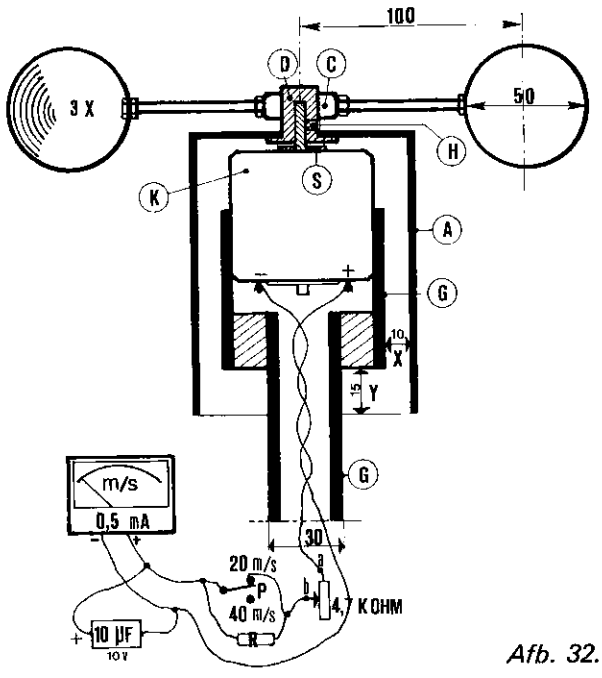
We zien hier hoe twee pijpen in elkaar zijn gestoken en door rubbermateriaal of NEOPRENE van elkaar zijn gescheiden. In de binnenste pijp wordt een rubber stop aangebracht welke op doorgestoken

pen rust. Pen goed borgen. Deze opstelling kan tweemaal onder elkaar worden toegepast wanneer een enkele demper te weinig blijkt. Dikte van rubber materiaal hangt af van de 'zwaarte' van de konstruktie. Voor drie meter molen minstens 1 cm dik over een lengte van twee maal 10 cm. De rubber stop minstens 5 cm dik. De beide pijpen ca. 100 cm in elkaar laten steken. Bij tuien bóven de gedempte mast kan de eveneens getekende oplossing worden gekozen. De beugel waaraan de tuidraden zijn bevestigd mag niet strak om het rubberstuk zijn aangebracht. Eventueel kunnen tuidraden ook worden afgeveerd. Rubbermateriaal niet te stug en voorzien van talkpoeder.

VERKEERDE DRAAIRICHTING MOLEN

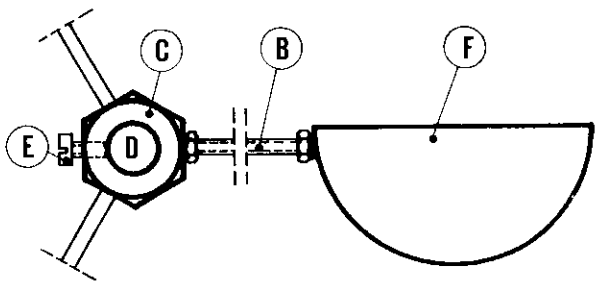
Wanneer de molen wordt opgestart door de generator een kort moment als motor te gebruiken moet op de juiste draairichting van de molen worden gelet. **Bij verkeerde draairichting zal de negatieve hoekverstelling zijn veranderd in een positieve hoekverstelling waarvan het regelbereik onvoldoende is om de molen te beveiligen.** Bij juist gebruik zal deze situatie zich nooit kunnen voordoen. Ook niet wanneer de molen 'van achteren' wordt aangeblazen omdat dan de 'negatieve lift' voorkomt dat de molen op toeren komt.

WINDSNELHEIDSMETER



Afb. 32.

Voor een juiste beoordeling van de windsnelheid mag een windsnelheidsmeter niet ontbreken. Een opstelling, die zonder problemen vele jaren heeft gewerkt, is afgebeeld in bijgaande tekeningen (maten in mm). Als opnemer wordt gebruik gemaakt van een 6 of 9 volts gelijkstroommotortje **K** uit een cassette recorder (afb. 32). Nadat de aansluitdraden zijn aangebracht, wordt dit motortje met PVC-buis **G** (en PVC-lijm) opgesteld volgens tekening. Messing bus **D** wordt passend gemaakt op de as van de motor (niet helemaal doorboren). Op het flensje van **D** wordt plastic bakje **A** gelijmd met tweecomponentenlijm. De maten **X** en **Y** zijn belangrijker dan zo op het eerste gezicht lijkt; deze oplossing zorgt ervoor dat de windmeter onder alle weersomstandigheden blijft draaien (regen, ijzel, vriezen). Messing bus **D** en bakje **A** worden d.m.v. een M4 (imbus) boutje **H** aan de as van de cassettemotor vastgezet. Viltje **S** dient voor 'long life' smering. Bakje **A** draait dus mee met de windmeter. Het molentje zelf wordt gemaakt van drie cups **F** (afb. 32 a) die met drie maal draadstang **B** (M4) zijn verbonden met een afgezaagde boutkop **C** (M 12). In de zijkanten van deze boutkop worden vier gaten geboord en voorzien van schroefdraad M4. Verder nog een gat, zodat **C** over **D** kan worden geschoven, waarna met **E** de zaak aan **D** wordt vastgezet. Zie ook tekening. De diameter van de cups **F** is niet kritisch, maar moet wel liggen tussen 45 en 55 mm. (Kleine aluminium 'wereld-bolletjes', bestaande uit twee halve bollen, zijn goed bruikbaar. Speelgoedwinkels, Hema.) Zorg dat de draairichting in orde is i.v.m. de polariteit van de opgewekte spanning. Blanke metaaldelen met tectyl behandelen.



Afb. 32a.

IJking

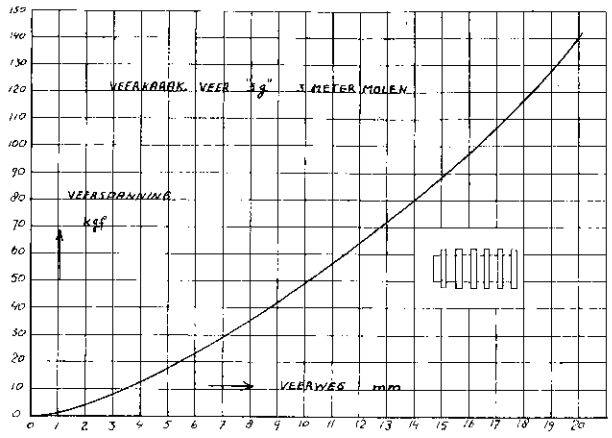
Als we op een windstille dag met een auto precies 72 km/h, dit komt overeen met 20 m/s, rijden en de windsnelheidsmeter hoog genoeg boven het dak houden (meer dan 1,5 m), kunnen we met de potentiometer van 4,7 kohm de uitslag van de windsnelheidsmeter op maximum afregelen. De bovenomschreven ijkmethode gaat prima door het roldak van een eendje, maar liever niet in je eentje. Voor het meten van hogere windsnelheden dan deze windkracht acht à negen kunnen we de schakeling uitbreiden met schakelaar **P** en weerstand **R**. De waarde van **R** is even groot als de weerstandswaarde die we vinden tussen de punten **a** en **b** van de potentiometer, wanneer deze is ingesteld voor een volledige uitslag bij 20 m/s. Dan kan dus tot 40 m/s windsnelheid worden gemeten. De kondensator van 10 microfarad dient om onregelmatigheden in de collector van de cassettemotor 'op te vangen'.

Windsnelheidsmeter gekoppeld aan molenrem

Een windsnelheidsmeter biedt tevens de mogelijkheid de molen bij zwaar weer op de rem te zetten door de molenrem te koppelen met het van de windmeter afkomstige signaal. (Signaal van windmeter integreren met een tijdkonstante van 2 minuten, dan zóveel versterken dat een relais kan worden bestuurd. Relais wordt gekoppeld met molenrem. Vraag aan 'elektronische vriendenkring' hoe dat moet).

VEER **5g** VAN HET REGELMECHANISME

De veer **5g** van het regelmechanisme is samengesteld uit metalen plaatjes en rubberringen. Alhoewel het prototype hiermee geruime tijd (3 jaar) heeft gewerkt is het niet uitgesloten dat het binnenbandmateriaal na verloop van tijd gaat uitdrogen. We kunnen dit voorkomen wanneer we de ringen of schijfjes van dit veerpakket snijden of slaan uit siliconen rubber of Neoprene met ongeveer dezelfde dikte en 'zachtheid' als het autoband materiaal: De eerste jaren hoeven we dan daar alvast niet naar om te kijken. (Neoprene, fabr. MIPOLAN, Fa. DAMMAN UTRECHT). Tevens is in afb. 33 nog een grafiek van de veerwerking weergegeven. Met deze gegevens kan mogelijk een stalen veer worden samengesteld. De opgegeven grafiek geldt voor de drie meter molen en is opgenomen van het rubber veerpakket.



Afb. 33. Veerkarakteristiek veer 5g van drie meter molen.

WINDSNELHEID EN OPGEWEKTE ENERGIE

Om een indruk te krijgen hoeveel energie uit de wind kan worden onttrokken is in afb. 34 een tabel uitgewerkt voor molens met verschillende diameters tegen verschillende windsnelheden. De uitkomsten laten ons het geleverde vermogen zien uitgedrukt in watts en gelden voor een generator welke geen ekstra vermogen vereist om het magneetveld op te wekken (permanent-magneetveld). De getallen zijn gezuiverd in die zin dat alle verliezen zijn verrekend uitgezonderd de generator- ($I^2 \times R$) en opslagverliezen. In de tabel is ook aangegeven hoeveel % van de tijd een bepaalde windsterkte per jaar aanwezig is op een bepaalde plaats (De Bilt). Deze percentages zijn gemakshalve op de onderste regel uitgezet in dagen per jaar. Totaal 360 dagen. De overige vijf dagen liggen verdeeld over windsnelheden groter dan 14 m/s.

DIAM.	OPPVL.	0	1	2		3		4			5		6			Beaufort	
m	m^2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	m/s
1	0,78	0	0,1	1	3,4	8	16	26	42	63	91	125	165	220	280	350	watt
2	3,14	0	0,5	4	13	30	60	100	170	250	360	500	660	860	1100	1400	,,
3	7	0	1,1	9	30	70	140	240	380	560	810	1100	1500	1900	2400	3000	,,
4	12,6	0	2	15	50	120	240	400	650	950	1400	1900	2500	3300	4200	5200	,,
5	19,6	0	3	25	80	190	380	650	1000	1500	2200	3000	4000	5200	6600	8300	,,
6	28	0	4,5	35	120	280	560	950	1500	2200	3200	4500	6000	7700	9800	12000	,,
7	38	0	6	50	170	380	760	1300	2000	3000	4400	6000	8000	10000	13000	16000	,,
8	50	0	8	65	220	500	1000	1700	2700	4000	5800	8000	10000	13000	17000	22000	,,
voorkomen de Bilt		5	10	12	19	16	11	8,5	6	5	3,3	1,3	0,9	0,6	0,3	0,2	%
per jaar		18	37	44	69	58	40	31	22	18	12	4,5	3,3	2	1	0,7	dagen

RELATIE DIAMETER MOLEN / WINDSNELHEID / VERMOGEN
(meter) (m/s) (watts)

Referentie: 20 watt/m^2 bij 5 m/s
(C_p = 0,4)

VOORBEELD: Een molen met een diameter van 4 meter kan bij een windsnelheid van 6 m/s een vermogen afgeven van 400 watt.

Afb. 34.

Vermogens en toerental begrenzing zijn niet in tabel verwerkt.

Enkele typerende konklusies uit de tabel zijn:

Bij eenzelfde windsnelheid geeft een verdubbeling van de molendiameter een *vier maal* zo hoge energieopbrengst.

Bij eenzelfde diameter geeft een verdubbeling van de windsnelheid een *acht maal* zo hoge energieopbrengst.

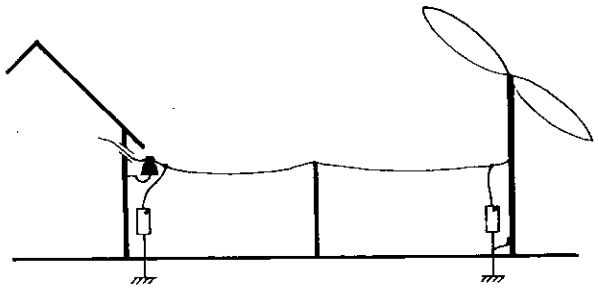
Slechts een **kleine** verandering van de windsterkte heeft al grote gevolgen voor de opgewekte energie. Wie kans zou zien op een bepaalde plaats de windsnelheid te verhogen van 4 m/s naar 5 m/s (door b.v. zijn mast te verhogen) kan rekenen op een twee maal zo hoge energieopbrengst zonder iets aan de molen te veranderen. (Zie tabel).

Kies een generator van het juiste vermogen

Wat we nog meer zien is dat b.v. de drie meter molen bij 14 m/s windsnelheid 3 kilowatt kan leveren ware het niet dat de praktijk ons een aantal beperkingen oplegt. Wanneer we drie meter molen met een 3 kilowatt generator zouden uitvoeren dan zal de konstruktie zo zwaar worden dat de molen beneden, pak weg, 8 m/s niet aan draaien toekomt d.w.z. 300 dagen per jaar zal de molen niet kunnen worden gebruikt en dat allemaal omdat we enkele dagen per jaar 3 kilowatt willen opwekken. We zitten dus duidelijk vast aan een kompromis dat voornamelijk wordt bepaald door de gemiddelde windsnelheid die voor een bepaalde plaats geldt.
De gehele moleninstallatie moet hierop zijn gebaseerd wil de molen, praktisch gesproken, de maximale jaaropbrengst kunnen leveren. Ook over de lagere windsnelheden valt nog wat te vertellen. De opgewekte energie is dan weliswaar gering maar gezien het grote aantal dagen dat deze lagere windsterkte aanwezig is moet hiervan gebruik worden gemaakt. Nu zal ook blijken waarom, bij lage windsnelheden, een auto-dynamo eigenlijk helemaal niet zo geschikt is als windmolen generator: Voor het opwekken van het magneetveld in dit type generator wordt een vermogen van 30 à 35 watt verlangd. Dit vermogen moet steeds van de in de tabel aangegeven waarden worden afgetrokken. Zo zal de drie meter molen bij een windsnelheid van 3 m/s in het geheel geen bruikbare energie afgeven wanneer een auto dynamo wordt toegepast welke de opgewekte energie verbruikt voor de veldopbouw (0,75 kWh per dag). Bij gebruik van een generator met permanent magneetveld had dit vermogen wél kunnen worden afgenomen. Zoals we zien hangt de zaak van kompromissen aan elkaar en het loont de moeite daar eens goed over na te denken.

BLIKSEMINSLAG

Het blijkt moeilijk een windmolen tegen bliksem te beveiligen. Een kleine ontlading zal door de metalen molen-onderdelen naar aarde kunnen worden afgevoerd mits de molenmast voldoende is geaard. Een sterke ontlading op de molen zal zoveel sekondaire gevolgen hebben dat aanzienlijke schade vrijwel zeker het gevolg is. Wanneer de molen bovengronds met de accu is verbonden kunnen aan de voedingslijnen bliksem patronen of vonkbruggen worden gemonteerd om althans de weg naar binnenshuis voor de bliksem wat moeilijker te maken. Deze bliksem patronen worden nog wel gebruikt om radio en T.V. antennes tijdens blikseminslag een korte aardingsweg te geven door vonkoverslag. Het beste kunnen de patronen (een soort neon buislamp) zowel bij de molen als op de plaats waar de draden het huis binnengaan worden gemonteerd volgens afb. 35.



Afb. 35. Bliksembeveiliging door het toepassen van overslagpatronen.

Een dikke, goede aardleiding is noodzakelijk. Wanneer de bedrading ondergronds is uitgevoerd dan wordt alleen bij de molen een ontladings patroon aangebracht. Boven-omschreven beveiliging moet op élke draad worden toegepast. Een goede omschrijving over het ontstaan van bliksem en de beveiliging hiertegen is te vinden in de uitgave 'BLIKSEMAFLEIDERINSTALLATIES' (NEN 1014) uitgegeven door het Nederlands Normalisatie Instituut, Kalfjeslaan 2 Delft.

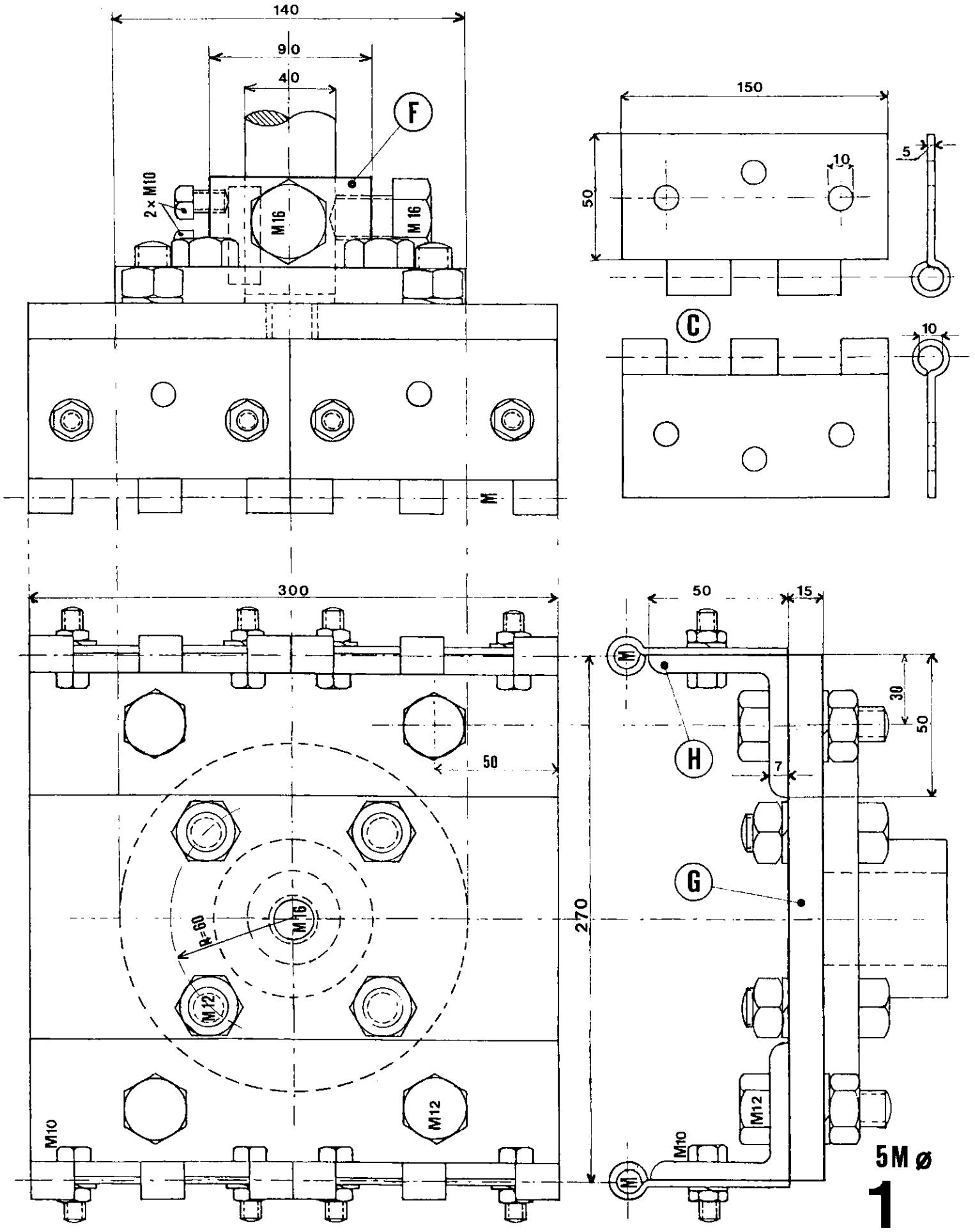
VIJF-METER-MOLEN

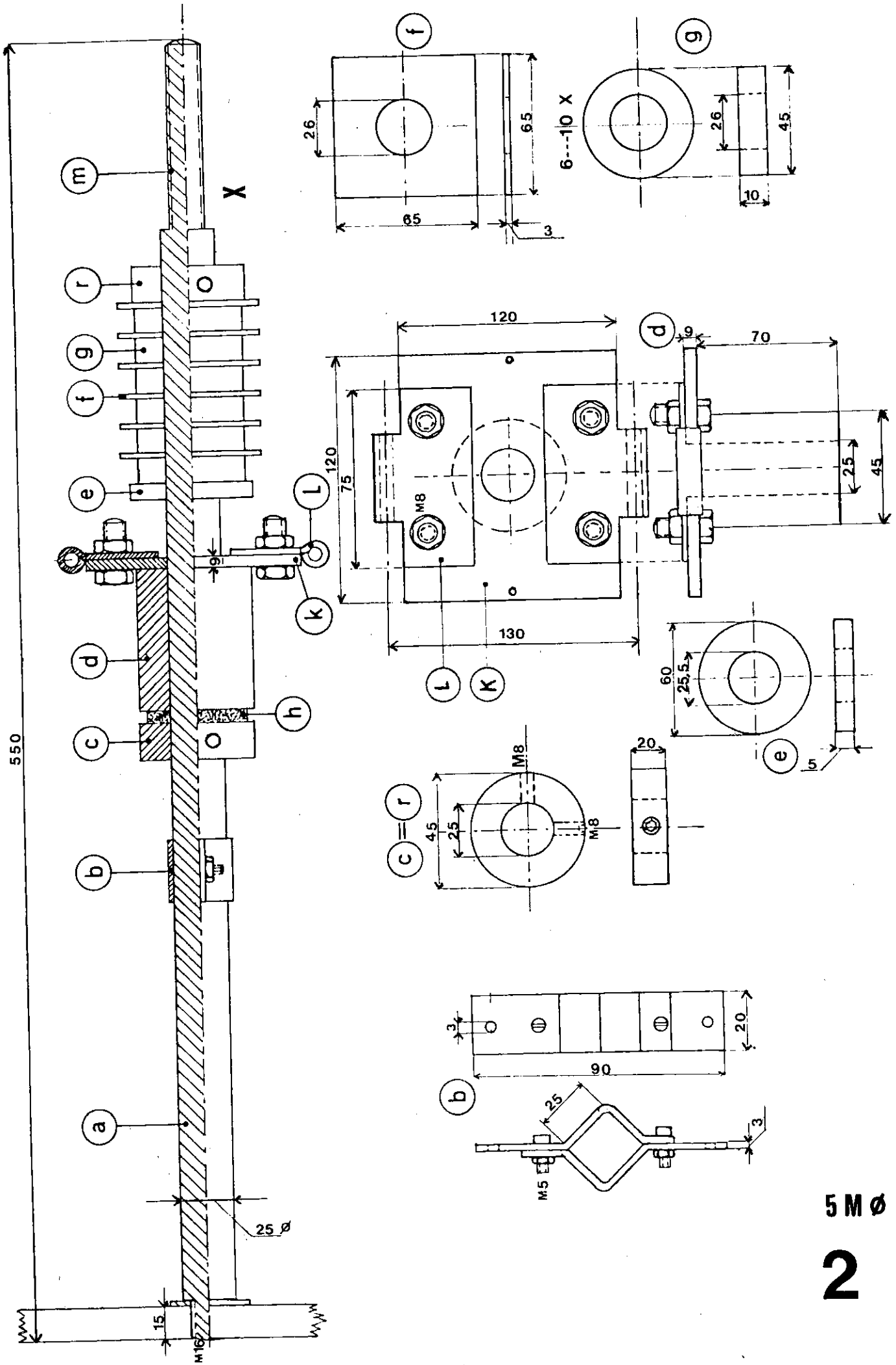
Inleiding

Volgens hetzelfde principe als de drie meter molen is ook een vijf meter molen gebouwd. Gezien de gunstige resultaten hiermee worden ook voor deze molen een aantal bouwtekeningen gegeven. Wie de aanwijzingen voor de bouw van de drie meter molen heeft begrepen zal zich onmiddellijk thuis voelen bij het zien van de tekeningen van de vijf meter molen; het zijn dezelfde tekeningen alleen met een andere maatvoering. Een paar tekeningen zijn weggelaten wegens onnodige informatie terwijl ook de tekeningnummers t.o.v. de drie meter molen zijn veranderd. Voor beginnende molenbouwers is het aan te bevelen eerst ervaring op te doen met de drie meter uitvoering. Vergeet niet dat met het toenemen van de diameter de gebruikte materialen meer dan evenredig zwaarder en sterker moeten zijn zodat op dit punt al snel problemen kunnen ontstaan. Er zijn negen tekeningen van de vijf meter uitvoering. De tekeningen zijn gemerkt met 5 M Ø om verwarring met het drie meter type te voorkomen. Deze tekeningen, samen met een aantal foto's en diverse adviezen, plus wat we al wisten van de voorgaande beschrijving, moeten voldoende informatie geven voor de bouw van de vijf meter installatie. Voor bouwers van de vijf meter molen betekent dit dat eerst het verhaal van de drie meter molen moet worden doorgeworsteld. Door diverse aanpassingen in de tekeningen is het niet zinvol gebleken een bruikbare schaal op te nemen.

GEGEVENS PROTOTYPE VIJF-METER-MOLEN

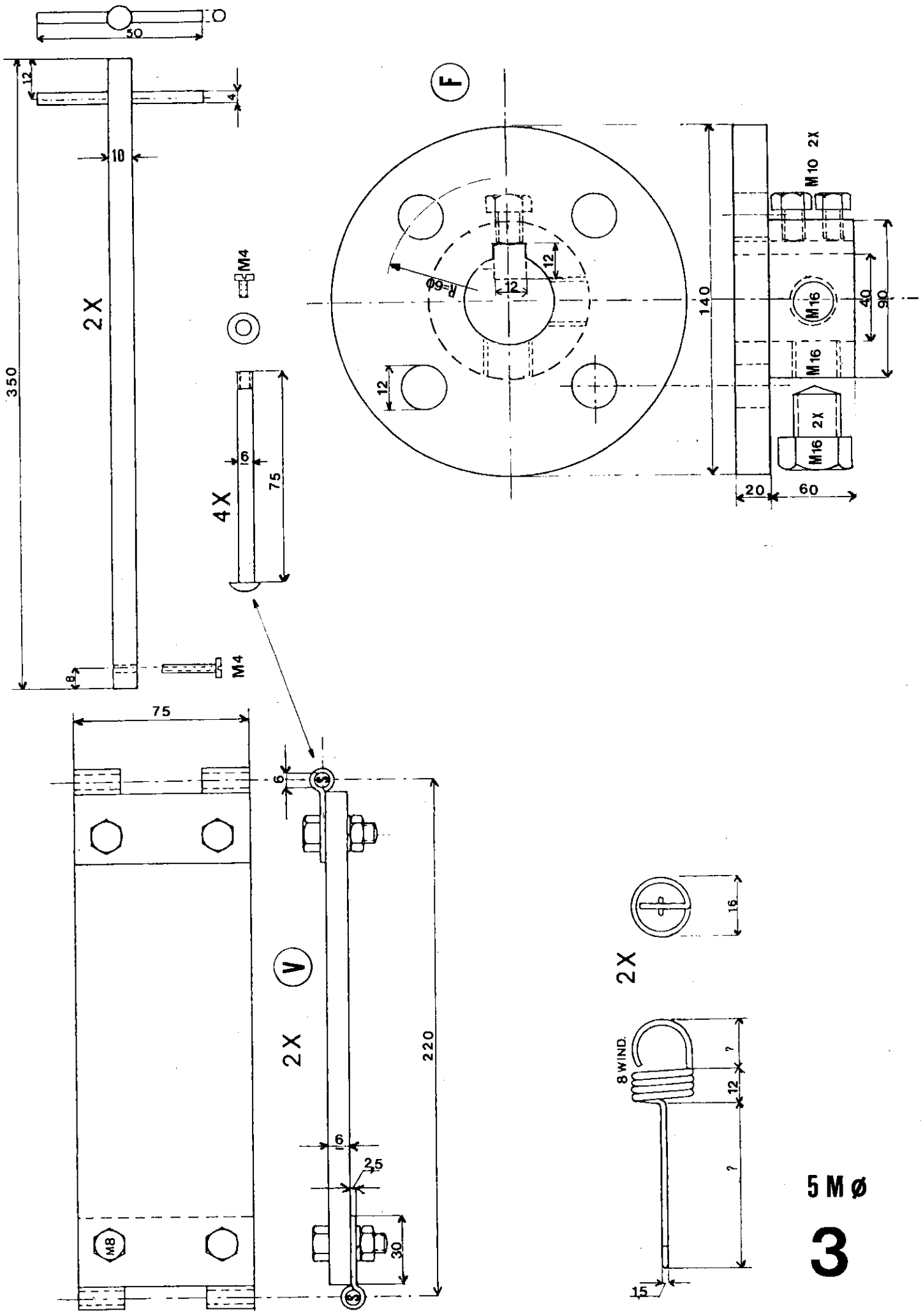
Diameter: 5 m
Oppervl.: 19,6 m^2
Omtrek: 15,7 m
Aantal bladen: 2 konstant koorde konstant spoed.
Lambda: 9
Bladmateriaal: Okumé hechthout (Bruynzeel) 14 lagen.
Toerental: 207 omw/min.
Beveiliging: negatieve bladverstelling, rem.
Bladaanloophoek: 25°.
Bladverstelling: d.m.v. centrifugaal gewichten.
Rotoras: prototype direkt op roerwerk 40 mm diam.
Transmissie: roerwerk 5,5 kW (CB3R) i=7,4 (i = overbrengverhouding).
Fabrikaat: Carl Bockwoldt, imp. KÖBO.
Generator: CEBEHA asynchrone draaistroom-remmotor: 4 kW 3×380 V, toerental 1500 omw/min. Isolatieklasse: IP 55. Voorzien van schijfrem. Remkoppel: 3,5 kgfm bij 1500 omw/min.
Prijs roerwerk + draaistroom-remmotor: *f* 2900,- (excl. B.T.W.)
Oriëntatie op de wind: Windservo, i = 1000.
Opslag: Koppeling 3 fase net of verwarming.
Begin levering: 4,5 m/s wind.
Molen op rem bij V = 3 m/s en bij V = gem. 18 m/s.
Gewicht roerwerk en generator: 120 kg.
Gewicht rotor en regeling: 45 kg.
Gewicht gehele molen incl. kruimolen en kruilager: 260 kg.
Kruilager: 60 cm hoog, kogeltaatslager 0,5 ton + naaldlager.
Mast: driekante vakwerkmast, lengte 6 meter. Afm. driekant basis 3×35 cm (Bicc). Deze vakwerkmast bestaat uit drie stalen pijpen (uitwendig: 34 mm, wanddikte 4,25 mm) welke volgens een bepaald patroon met massief 11,5 mm aan elkaar zijn gelast. In de vakwerkmast een uitschuifbare binnenmast, 5,5 meter lang, buitenmaat 12 cm, wanddikte 5 mm.
Mastlier 1 ton. Zie ook aanhangsel 2 achter in boek.
Voedingskabel: 4×4^2, $2 \times 1{,}5^2$ (rem) ruimte voor 5 slagen vertikale as.
Gehele molen wordt bestuurd door windsnelheidsmeter.
Vrijslag bladtip-mast is 65 cm.
Tui-kabels: 8 mm dik.
Fundatie: twee bij twee meter, 60 cm diep, gewapend beton.


140
90
40
F
2 × M10
M16
M 16
M
150
50
10
5
C
10
300
50
15
M
30
50
H
7
G
270
R=60
M16
M12
M12
M10
M12
M10
M
5M ø
1


550
X
m
r
g
f
e
d
c
b
a
h
k
L
9
25 Ø
15
M16
f
26
65
65
3
g
6---10 X
26
45
10
120
120
75
M8
9
70
25
45
130
L
K
d
60
25,5
e
5
c=r
M8
M8
45
25
20
b
3
20
90
25
3
M5

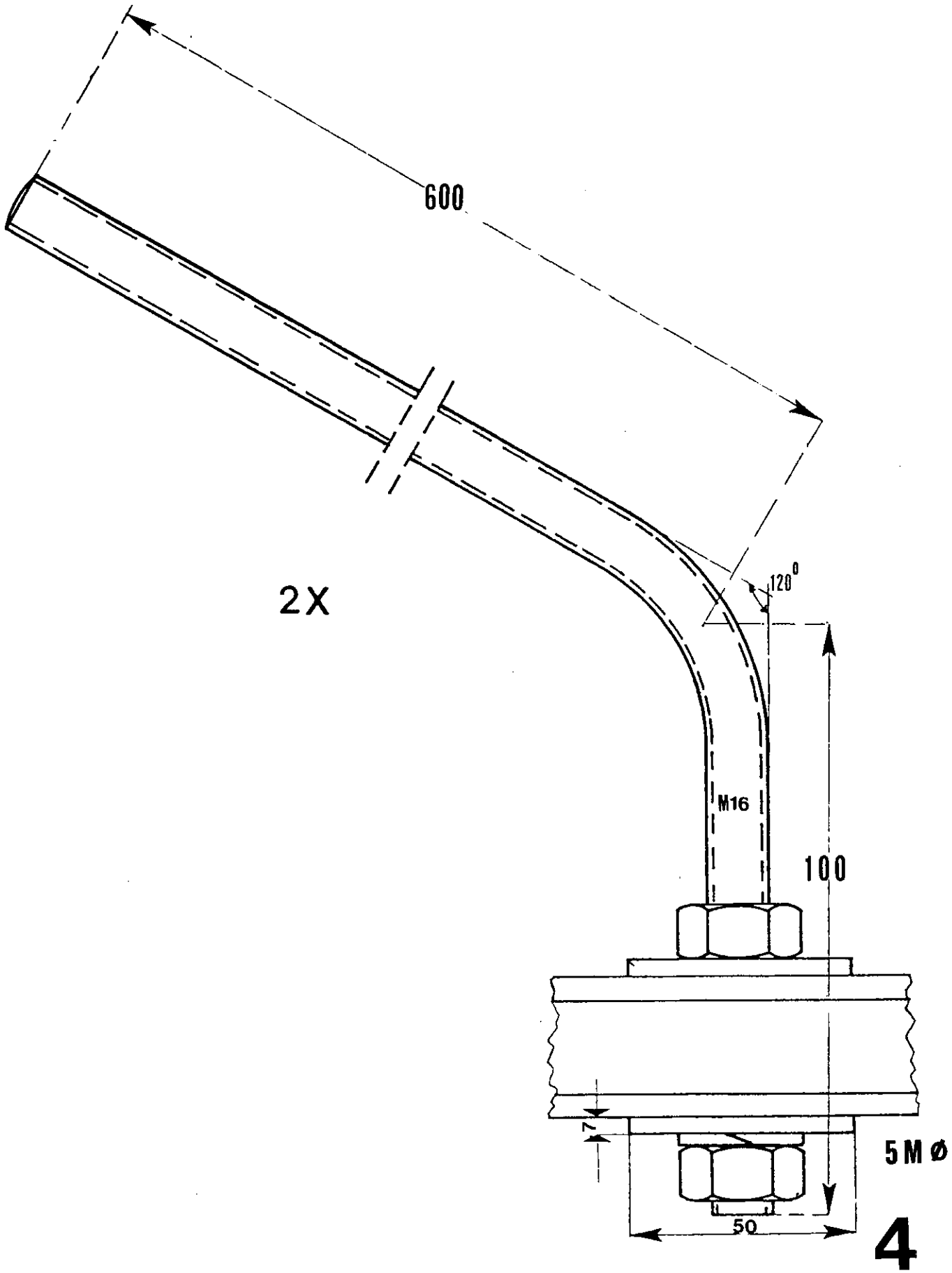
5 M Ø

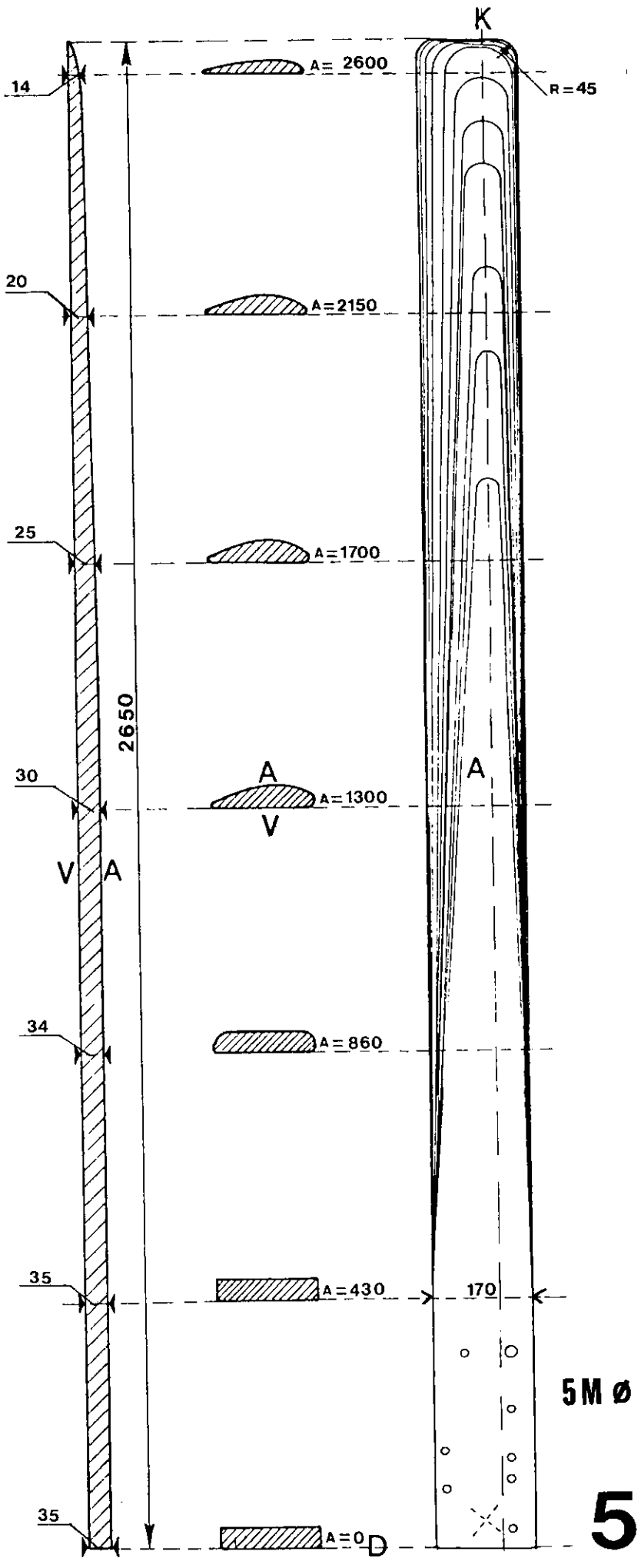
2

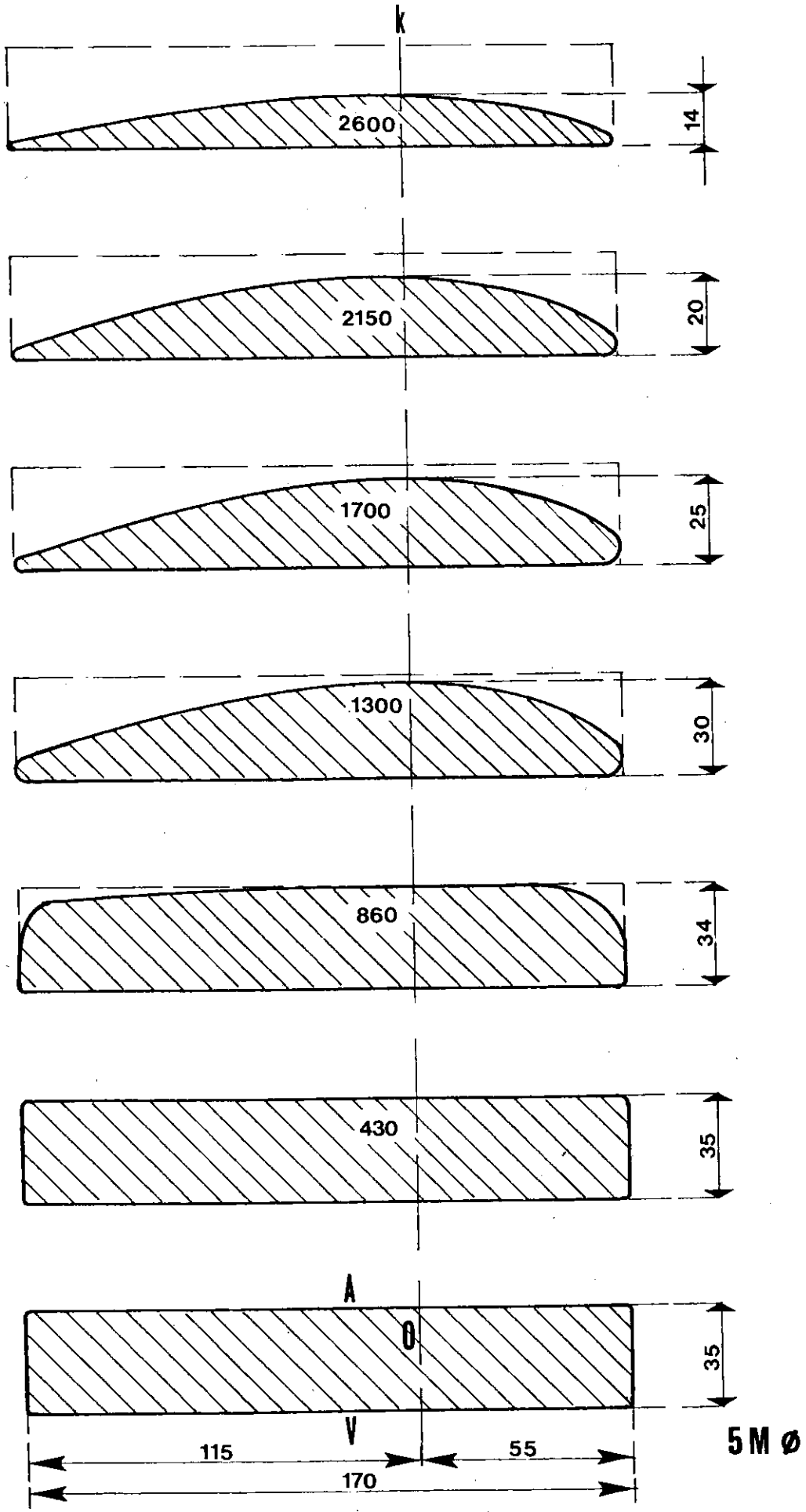

50
12
4
10
2X
350
8
M4
M4
4X
6
75
F
R=6Φ
12
12
12
140
M10 2X
M16
M16
M16 2X
40
90
20
60
75
6
V
2X
220
6
2,5
30
M8
2X
16
8 WIND.
?
12
?
15

5 M ø

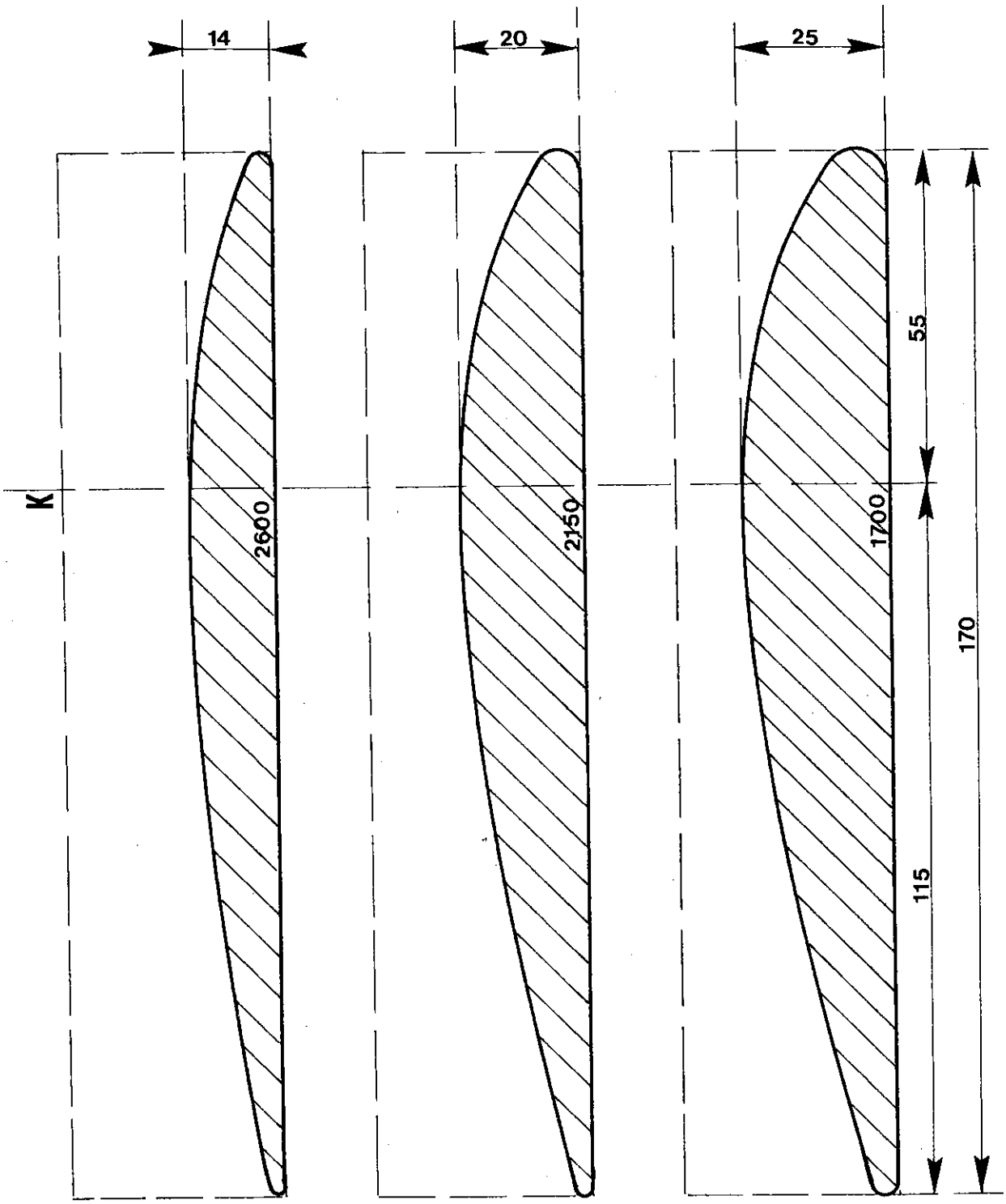
3


600
2X
120°
M16
100
7
5MØ
50
4


K
A= 2600
R=45
14
20
A=2150
25
A=1700
2650
30
A
A=1300
V
V
A
A
34
A=860
35
A=430
170
5M Ø
35
A=0
D
5


k
2600
14
2150
20
1700
25
1300
30
860
34
430
35
A
0
V
35
115
55
170
5M ø

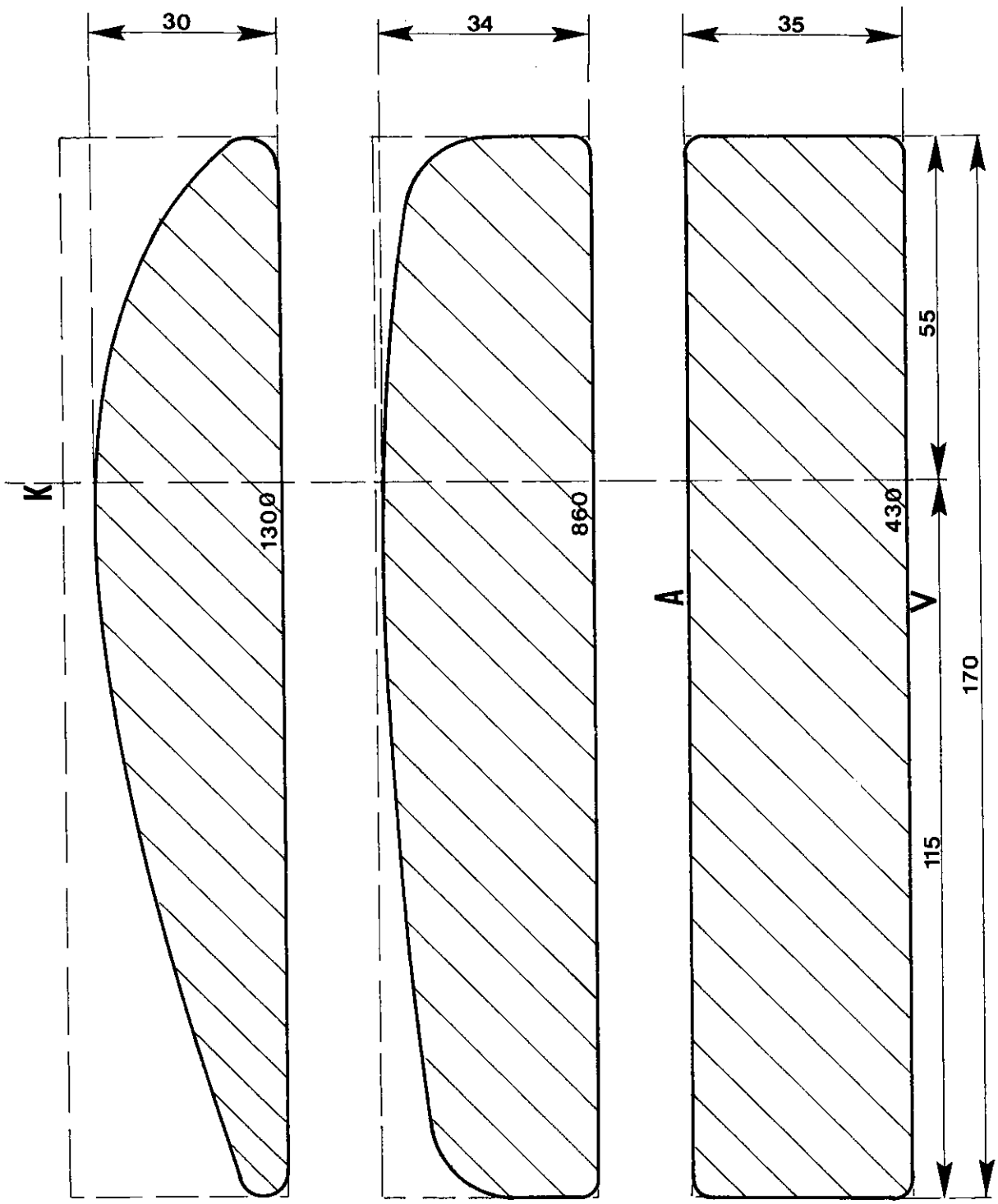
6



SCHAAL 1:1

5 Mø

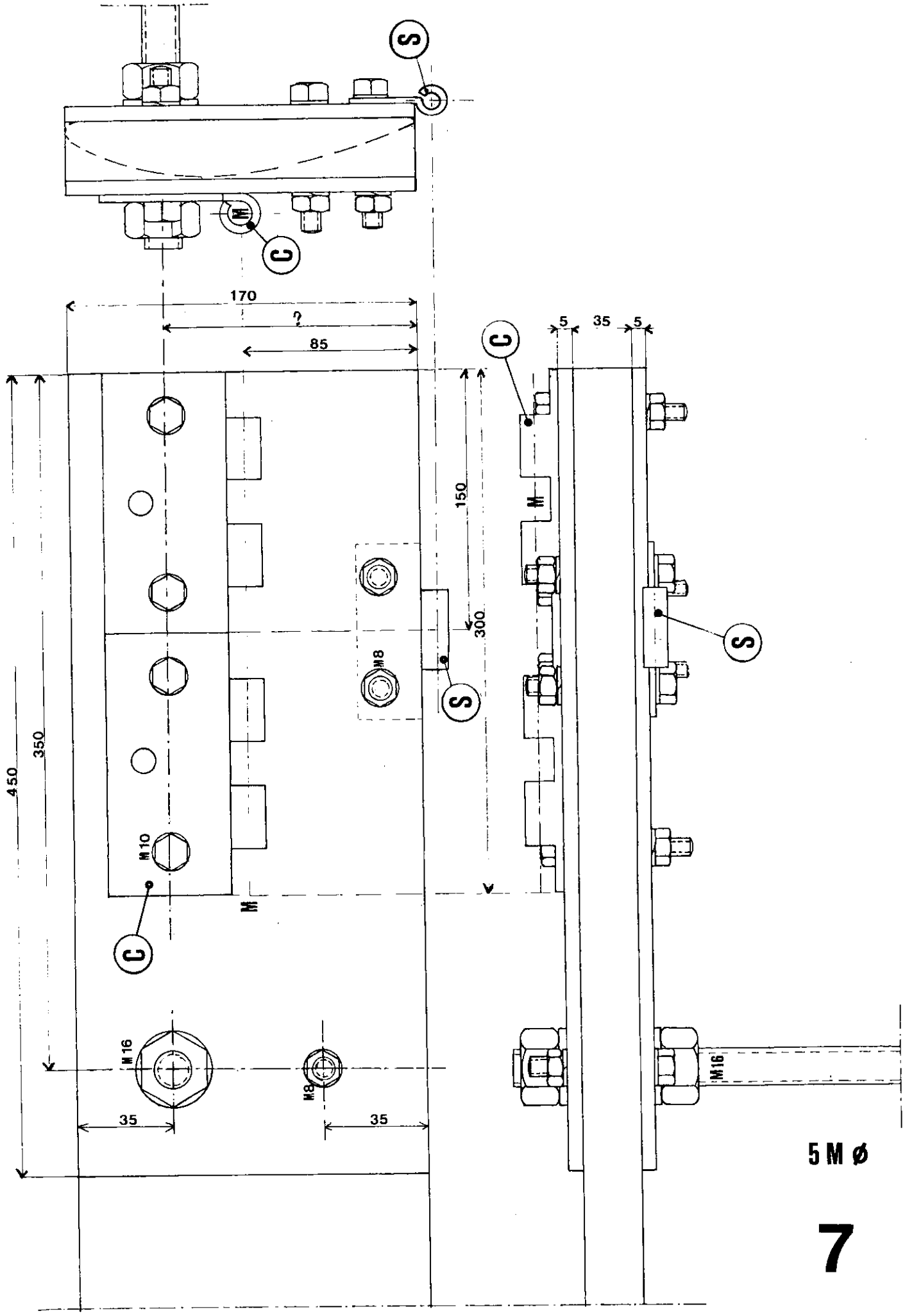
6a



SCHAAL 1:1

5 M ø

6b



5 M ø

7

FOTO'S, ALGEMENE AANWIJZINGEN VIJF-METER-MOLEN

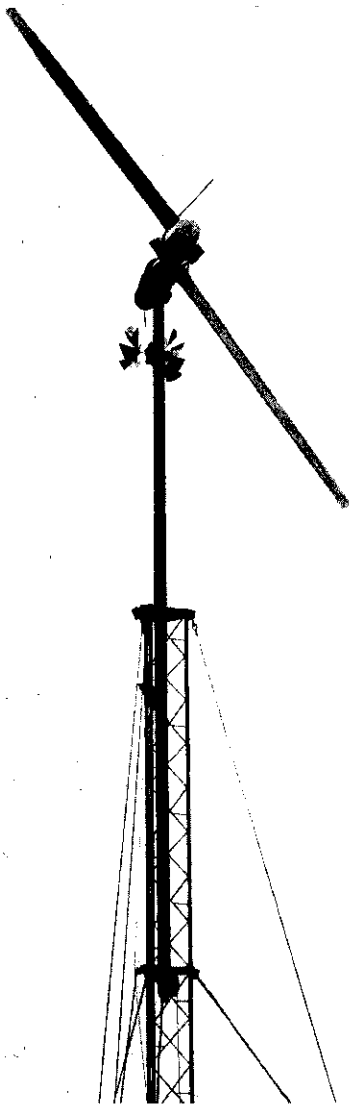


Foto 7.

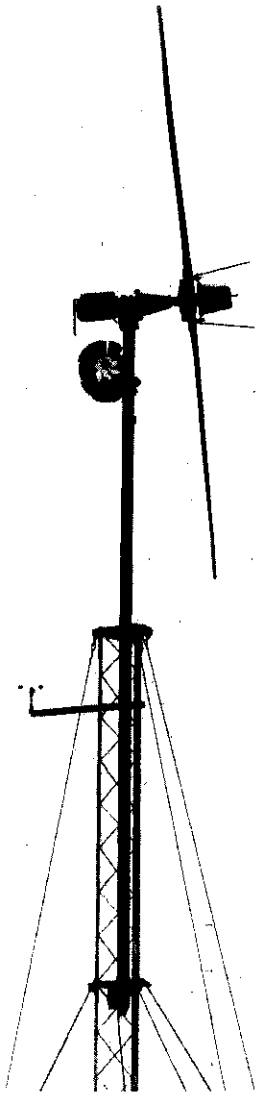


Foto 8.

Op de foto's 7 en 8 zien we resp. het voor- en zij-aanzicht van de 5 meter molen. De binnenmast is door de mastlier (niet zichtbaar) zover omhoog getrokken dat de bladtips ongeveer 25 cm boven de vakwerkmast uitkomen. De binnenmast loopt door twee beugels welke aan topplaat en tussenplaat zijn aangebracht en worden, na het omhooghijsen van de binnenmast hierom vastgeklemd. **De molen op de foto is rechtsomdraaiend. De tekeningen van de 5 metermolen zijn uitgewerkt voor een linksomdraaiende molen.** Doet verder niets af aan **de werking doch houd hier rekening mee tijdens vergelijken tussen foto en wat zelf wordt gemaakt.** Door enkele experimenten zien de bladen er op de foto iets anders uit dan de tekeningen 5 en 6 (5 M Ø) aangeven. We houden ons echter aan de tekeningen. Breuksterkte tuidraden: $\Sigma =$ 160 kgf/ mm², 5,5 ton.

Op foto 9 zien we het bovengedeelte van de mast. Maststuk **L** draait mee met de molen tijdens het kruien evenals de kruimolen welke via een uithouder aan **L** zit verbonden. De lengte van **L** bedraagt 60 cm en is bovenaan én ter hoogte van het kettingwiel van de windservo gelagerd om een binnenpijp welke nog 1,5 meter in maststuk **M** steekt. De binnenpijp is aan mast **M** vastgezet door twee bouten **H** (M16). Vergelijk opstelling 3 meter molen tek. 13. De windservo is samengesteld uit twee kruimolens **S** op één as. De kruimolens hebben een diameter van 50 cm en kunnen worden vervaardigd uit twee ronde platen alu met een dikte van 2,5 mm. Zie echter ook oplossing 3 meter molen. Ter oriëntatie is de hoofdmaat (95 cm) van roerwerk-transmissiekast-generator weergegeven. De generator is voorzien van een schijfrem welke elektrisch kan worden bediend. De rem kan ook met de hand worden gelicht door handel **B**(trekken in pijlrichting) wanneer dat nodig mocht blijken. Over de generator is een afschermkap geplaatst tegen direkte regeninslag. Voor koeling moet de wind tussen regenkap en generator kunnen doorstromen. Kijk af en toe ook eens naar de gegevens van de 5 meter molen op blz. 62.

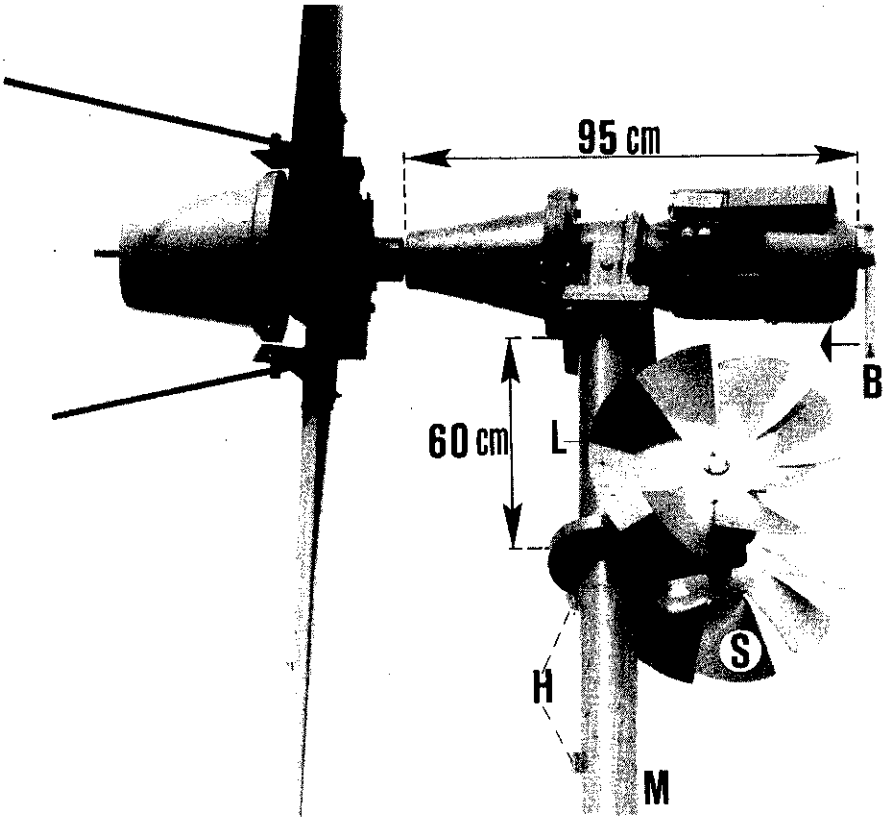


Foto 9. Bovengedeelte mast en kruilager.

Foto 10 geeft een overzicht van de kopkonstruktie van de molen. **R**,**T** en **G** zijn resp. roerwerk, transmissie en generator welke als één geheel is uitgevoerd. Roerwerk **R** heeft niets geheimzinnigs; het bevat slechts een verlengde (in ons geval ingaande) as van de tandwielkast **T**. De lagering van deze as is echter zodanig uitgevoerd dat grote axiale en radiale krachten (langs- en dwarskrachten) kunnen worden opgevangen. Ekstra voordeel van de ver vooruitstekende as (prototype 35 cm) is dat de bladen al een stuk voor de mast staan. Op de top van de mast is een stalen plaat gelast van 15 mm dik waarop de gehele opstelling is geplaatst. De voet van de transmissiekast **T** is met 4 maal M12 op deze topplaat vastgezet. (**Denk aan veerringen**). Indien nodig kan de topplaat onder een kleine hoek (prototype 5°) op de masttop worden aangebracht zodat de molen iets achterover staat waardoor de vrijslag tussen bladtip en mast wat ruimer wordt. Deze vrijslag moet voor 5 meter molen minstens 65 cm bedragen. De veer **g**, voor regeling maximum toerental, bestaat hier uit een stalen schroefveer. Zoals al eerder is beschreven zijn de veereigenschappen van zo'n veer niet geschikt voor een mooie regeling van de molen. In het prototype is dit geen bezwaar omdat deze molen op het elektriciteitsnet is gekoppeld waarbij de veer niet als toerenrégeling doch als toerenbeveiliging funktioneert. Aangeraden wordt om de 5 meter molen uit te rusten met het rubber veerpakket uit tek. 2 (5 MØ). De centrifugaal gewichten (stangen) **4** van het prototype zijn verstelbaar opgesteld. Omdat de stand hiervan intussen definitief is vastgelegd, kan tek. 4 (5 MØ) worden aangehouden (blz. 66). De rotorkop zit met een spieverbinding aan de as van roerwerk **R** (as minstens 40 mm Ø) en wordt vastgezet met tweemaal M16 in geboorde centers in de rotoras. De spie (12 × 12 mm) wordt vastgedrukt met tweemaal M10. Zie in dit verband de tekeningen 1 en 3 van de 5 m Ø molen. (Asflens **F** blz. 63,65). Verder wordt er op gewezen dat door het aanpassen van de tekeningen van de 3 meter molen aan 5 meter molen de juiste verhoudingen enigszins verloren zijn gegaan. De maten in de tekeningen zijn echter korrekt.

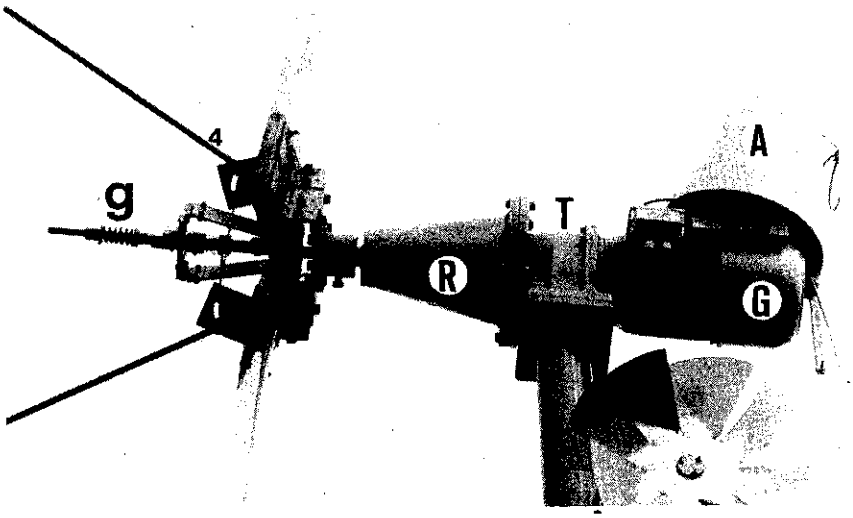


Foto 10. Kopkonstruktie 5 metermolen. Afschermkap **A** *is afgenomen.*

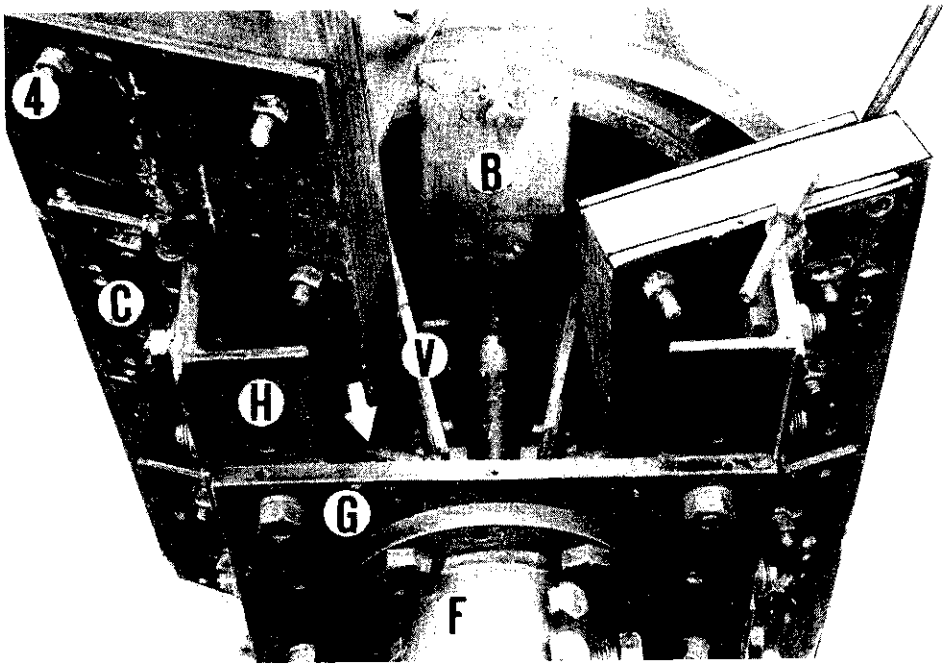
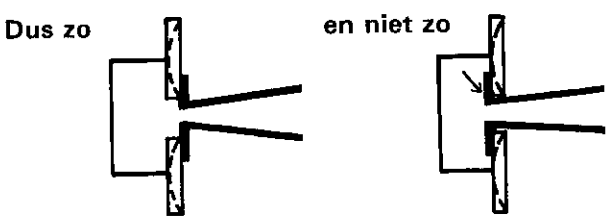


Foto 11. Rotorkop 5 meter molen. Bladen in aanloopstand. ***PAS OP: Draairichting van prototype op foto is omgekeerd t.o.v. de tekeningen. Tekeningen aanhouden.***

Foto 11 geeft zicht op de rotorkop met de scharnierpunten waarin de bladverstelling plaats vindt. De grondplaat **G** is wat korter uitgevallen dan de hoeksteunen **H**. Probeer maten van tek. 1 (5 MØ. blz. 63) aan te houden. Dit geldt zeker voor de totale lengte van de scharnieren **C** (30 cm). N.V. BOSCH in Terborg levert scharnieren van (roestvrij) staal met een scharnierpen diam. van 10 mm, lengte 10 cm, breedte 12 cm en materiaaldikte van 5 mm (Bosch katalogus 1968, artikel No. 4071). Met drie van deze scharnieren naast elkaar komen we op een lengte van 30 cm, zodat we totaal 6 scharnieren nodig hebben. Deze scharnieren zijn nog niet voorzien van montagegaten zodat we daar alle vrijheid in hebben. De hoeksteunen **H** zijn, elk met twee maal M12, aan de grondplaat **G** bevestigd. De grondplaat **G** zit met vier maal M12 aan de asflens **F**. (**Veerringen**!). Verder zien we om de middenspindel twee uithouders **B** ter bevestiging van de afschermkap. Op **4** komt in plaats van de op de foto zichtbare M8, één van de centrifugaal gewichten (M16). In het prototype is dit namelijk anders uitgevoerd. De bouwtekeningen zijn op deze nieuwe situatie aangepast. Zie tek. 7 (5 MØ blz. 71) Wat mogelijk ook verwarring kan geven is de plaats waar de verbindingsstroken **V** met de bladen zijn verbonden: De stroken zijn in het prototype bevestigd aan de **'bolle'** zijde (achterkant) van de bladen, zie pijl. De bedoeling is dat de scharnieren van deze verbindingsstroken aan de **vlakke** zijde (voorkant) van de bladen worden gemonteerd,



Zie tek. 7 blz. 71 scharnier S. Zie in dit verband ook tek. 1 van de drie meter molen op blz. 17.

Foto 12. Vanaf de transmissiekast **T** naar beneden kijkend zien we de, aan de mast **L** gelaste, uithouder **U** voor het servo systeem. (Pijp, 50 mmØ wanddikte 4 mm). De kast **W** met wormoverbrenging (250 : 1) is met twee beugels **B**, via plaat **P** aan deze uithouder bevestigd. Haaks op uithouder **U** zien we de doorlopende as **K** van de wormoverbrenging **W** met daaraan de twee kruimolens **S**. De as **K** is in het prototype 8 mm dik. Om trillingen tegen te gaan wordt aangeraden de asdikte wat groter te nemen b.v. 12 à 15 mm. Het is niet noodzakelijk de opzet van het servomechanisme uit het prototype te kopiëren. Laat de konstruktie afhangen van de onderdelen die worden verzameld. Zorg wel dat de verschillende onderdelen deugdelijk en sterk zijn uitgevoerd en gemonteerd. Voor het spannen van de ketting (zie ook foto 13) kan een poulie-trekker worden gebruikt; beugels **B** loszetten, ketting opspannen, beugels **B** weer vast. (Dit is maar een aanwijzing, opgedaan in het prototype). Het gebruik van twee kruimolens is niet persé noodzakelijk; wanneer de as van de kruimolen licht kan draaien (grote overzetverhouding) dan zal één kruimolen met de opgegeven diameter (50 cm) de hele zaak prima kunnen kruien.

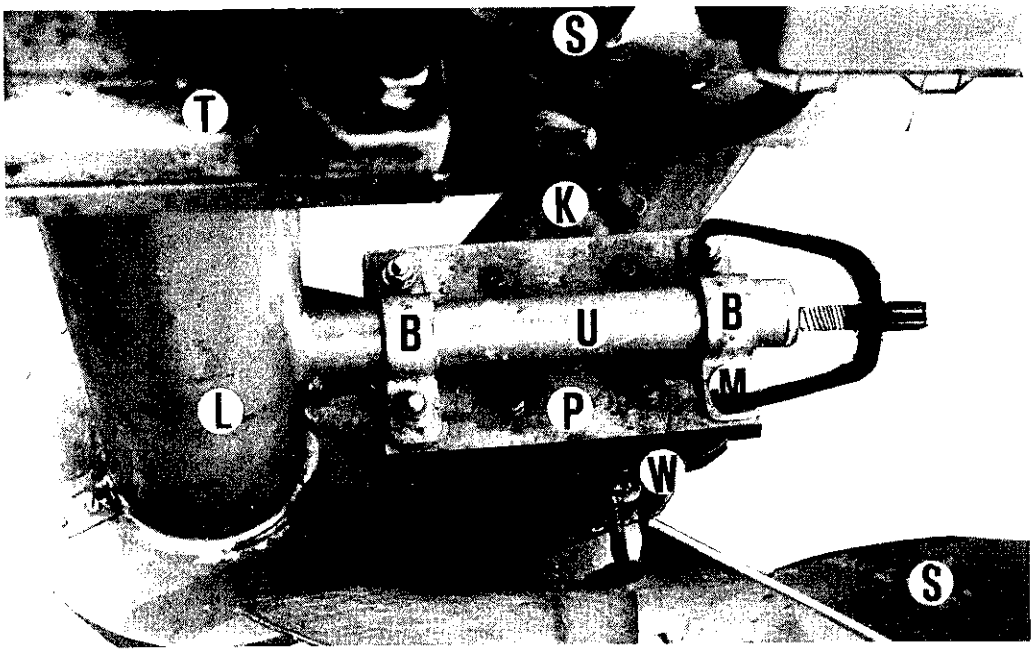


Foto 12.
Overzicht windservo.

Foto 13 geeft het onderaanzicht van de windservo. We zien hoe de uitgaande as van de wormoverbrenging **W** is voorzien van een kettingwiel **K** (10 à 13 tanden). De dikte van de uitgaande as van de wormoverbrenging moet minstens 20 mm bedragen. Het kleine kettingwiel **K** wordt op een solide manier aan deze as bevestigd. Vastlassen is het beste, maar niet voordat de juiste plaats op de as is bepaald door uitlijnen van de ketting. Met behulp van een ketting is het kleine kettingwiel **K** verbonden met het grote kettingwiel **G** (50 à 60 tanden) welke aan de binnenbuis is gelast. De centerafstand tussen beide kettingwielen kan het beste in de buurt van 25 cm worden gehouden. Voor sterkte en levensduur moeten ketting en kettingwielen van goede kwaliteit zijn en van het kaliber 'motorfiets'. De ketting moet flink strak, maar niet overdreven, worden gespannen. Zie hierover ook foto 12. Het geheel afdekken met een regenkapje zoals op de foto is te zien.

De overbrengverhouding van de wormoverbrenging **W** bedraagt in het prototype 250 : 1. Dit is vrij hoog omdat, naast de wormoverbrenging, ook nog een tandwiel-overzet in het kastje is opgenomen. Het ligt niet voor de hand dat zo'n zelfde kastje kan worden gevonden en dat is ook niet nodig. We hadden namelijk al gezien dat de totále overzet verhouding van het servo mechanisme niet zo kritisch ligt (3 meter molen) zodat we zonder bezwaar op een wat lagere verhouding kunnen uitkomen. Voor de 5 meter molen echter niet lager dan 600 : 1, dus **inklusief** de overzetverhouding van de ketting.

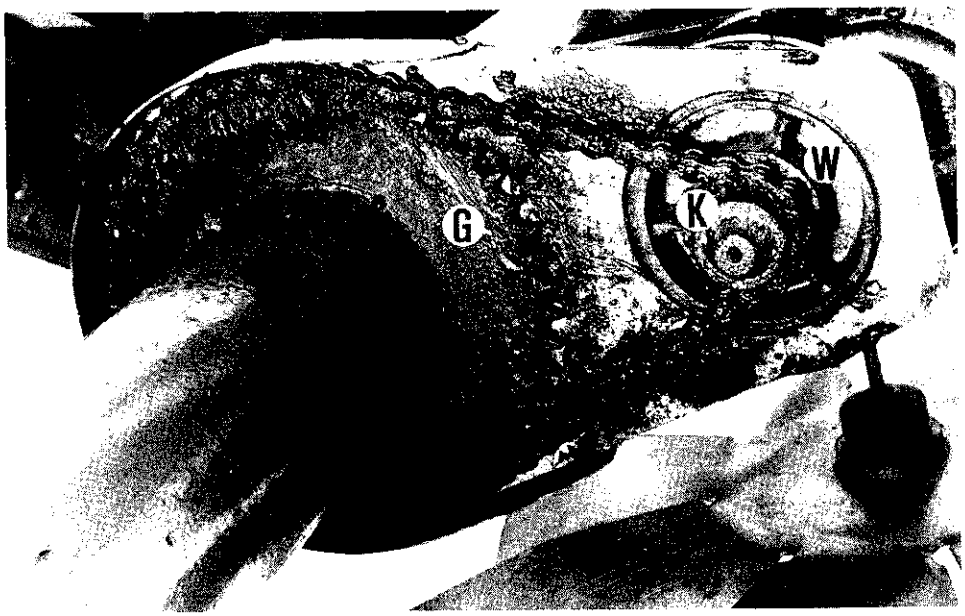


Foto 13.
Onderaanzicht windservo.

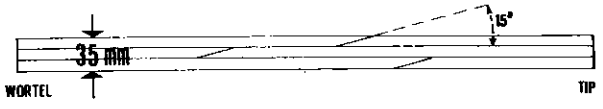
AFREGELING VIJF-METER-MOLEN

Het afregelen van de vijf meter molen vindt op dezelfde wijze plaats als bij de drie meter uitvoering. Alleen de veerspanningen zullen wat anders uitkomen. Wanneer de opzet van het regelsysteem is begrepen dan zijn geen moeilijkheden te verwachten. Ook hier is het raadzaam het toerental langzaam op te voeren door ring **r** (tek. 2 5mØ blz.64) in het begin zodanig naar voren te schuiven (dus naar richting **X**) dat de molen al bij een laag toerental in overtrek komt (bladhoek negatief). Vervolgens ring **r** steeds verder opschuiven naar bus **d** tot gewenste toerental is bereikt. De veerdruk van het rubber veerpakket is bij max. toerental vrij hoog. Zorg dus dat ring **r** na het afregelen stevig wordt vastgezet (2 × M8). De konstruktie van de rotorkop is zodanig uitgevoerd dat met een rotortoerental van 215 omw/min veilig kan worden gewerkt. Aangeraden wordt om **niet boven** dit toerental te experimenteren. Er zijn van de vijf meter molen geen veerspanningen opgenomen. Laat dat echter geen probleem worden. Met de gegeven adviezen in 'Troubleshooting', blz. 81, dirigeren we de molen zonder moeite naar een korrekte afstelling.

ROTORBLADEN VIJF-METER-MOLEN

Net zoals bij de drie meter molen zijn de profieldoorsneden van de rotorbladen op ware grootte (schaal 1 : 1) weergegeven. De afbeeldingen hiervan zijn te vinden in de tekeningen 6a en 6b van de vijf meter molen. Malletjes natekenen, uitknippen enz.

Zoals bij de gegevens van de 5 meter molen werd vermeld zijn de rotorbladen vervaardigd van Okumé hechthout. Met de opgegeven rotorblad-maten (tek.5 5MØ) moet dus hechthout worden aangeschaft met een lengte van 265 cm, 17 cm breed en 3,5 cm dik. Bruynzeel (Zaandam) heeft dit materiaal voorradig doch veelal zal een gehele plaat moeten worden afgenomen. Mogelijk dat in zo'n geval, samen met andere bouwers, een plaat kan worden besteld. Een andere mogelijkheid is om wat meer courante maten te verlijmen tot de gewenste afmetingen. We doen dit met een twee komponenten lijm van hoge sterkte (b.v. Araldite epoxylijm). De lagen worden zo verlijmd dat, gerekend vanaf de wortel van het blad, de buitenste lagen zo vér mogelijk doorlopen. Dit met de bedoeling om in ieder geval de bladwortel breukvrij te houden. Onderstaande afbeelding geeft hiervan een voorbeeld.



Zoals bij de konstruktie van de bladen van de drie meter molen werd verteld is het raadzaam om houtmateriaal te gebruiken dat is samengesteld uit behoorlijk wat lagen. Bij het aanbrengen van de profilering komen deze lagen erg goed te pas. **Het spreekt vanzelf dat het materiaal dat wordt aangeschaft, watervast is verlijmd.**

ELASTISCHE KOPPELING

Wanneer de konstruktie zo wordt gekozen dat tussen de molenas en transmissie een elastische koppeling wordt toegepast dan moet het nominale koppel hiervan 30 kgfm (300 Nm) bedragen. Wanneer een elastische koppeling wordt geplaatst tussen transmissiekast en generator, dan kunnen we de sterkte hiervan bepalen door deze 30(kgfm) te delen door de overzetverhouding van de transmissiekast. Voorbeeld: We willen tussen transmissiekast en generator een elastische koppeling. De overzetverhouding van de transmissiekast is 1 : 7,5. We hebben dan een koppeling nodig welke een draaimoment kan overbrengen van 30 : 7,5 = 4 kgfm (40 Nm). Dit voorbeeld betreft de vijf meter molen.

AANPASSING VIJF-METER-MOLEN AAN GEMIDDELDE HEERSENDE WINDSTERKTE

Het toerental van de vijf meter molen zal moeten worden aangepast aan de gemiddelde windsterkte geldig voor een bepaalde plaats. De draaistroom generator uit het prototype bij voorbeeld heeft een nominaal toerental van 1530 omw/min. De overzetverhouding van de transmissie is 1 : 7,4 zodat het molentoerental 207 omw/min bedraagt. Door de netkoppeling moet minstens dit toerental worden 'gehaald' om tot elektriciteitsproduktie te komen. Bij alle windsnelheden waarbij dit niet het geval is wordt ook geen stroom geleverd. Het spreekt vanzelf dat in windarme gebieden de generator lange tijd beneden het gewenste toerental blijft wanneer geen voorzieningen worden getroffen. Wat we moeten doen is de overzet verhouding van de transmissie zo zien te kiezen dat voor een specifieke plaats een maximale opbrengst wordt verkregen. Dit heeft echter ook weer gevolgen voor de grootte van de generator. In gebieden met minder wind b.v. is het verstandig om het vermogen van de gebruikte generator wat lager te kiezen. Hierdoor zal ook het gedeelte, dat de generator voor eigen gebruik konsumeert (veldopbouw), lager zijn zodat het molenrendement blijft gehandhaafd. De jaaropbrengst zal natuurlijk lager zijn omdat de wind nu eenmaal minder is. Omdat in windarme gebieden de molen langzamer draait, zal de overzet verhouding van de transmissie groter moeten zijn wil de generator op nominaal toerental worden gebracht. Hier komen we direkt op terug.

Overtrek

Een ander punt is de 'overtrek' welke optreedt in de bladprofielen wanneer de generator, (door koppeling aan het elektriciteitsnet, of een andere ingreep) op konstant toerental wordt gehouden. Het toerental van de molen zelf kan dan immers, bij een bepaald toerental, evenmin toenemen. Het gevolg is dat, bij toenemende wind, de invalshoek van de relatieve wind op het blad profiel steeds groter wordt, zodat bij een bepaalde windsterkte de molen in overtrek zal komen. **Let wel; dit vindt plaats**

zonder de bladstand te veranderen. Boven de windsterkte waarbij de molen in overtrek komt, zal het door de molen geleverde vermogen niet verder toenemen (kan zelfs afnemen). Aan, het zo verkregen maximum molen-vermogen, dient het generator-vermogen te worden aangepast. In windarme gebieden zal dus, voor maximum jaaropbrengst, de molen langzamer moeten draaien (grotere overzet verhouding transmissie) waardoor overtrek al bij een lage wind optreedt. Maximum opgewekt vermogen zal dus ook lager zijn zodat een kleinere generator moet worden toegepast. Voor windrijke gebieden geldt het omgekeerde; voor maximum opbrengst een hoger toerental van de molen, overzet verhouding transmissie lager, overtrek begint nu bij hogere wind, groter vermogen generator, zwaardere transmissie. Voor het verband tussen al deze zaken moet enig begrip worden opgebracht om het vele werk, dat met de bouw van de molen is verbonden, te belonen. Slechte resultaten op dit gebied zijn doorgaans niet het gebrek aan ijver doch ontstaan door fundamentele fouten in het molenontwerp.

Boven omschreven verhaal geldt specifiek voor netgekoppelde molens en in iets mindere mate voor laten we zeggen 'vrijlopende molens'. In het laatste geval kan immers nog worden gemarchandeerd met het toerental van de (zelfopwekkende) generator.

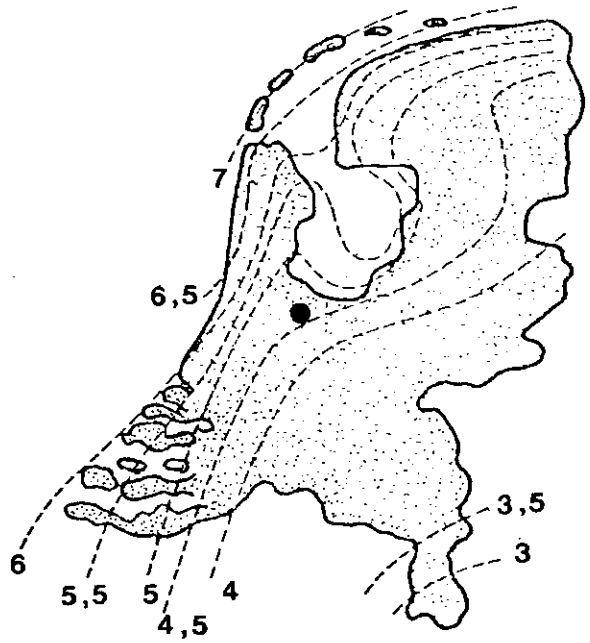
Overzetverhouding van de tandwielkast

Het bepalen van de overzetverhouding van de transmissie en het vermogen van de generator voor een bepaald windregime is een lastige rekenklus. Wanneer ik de vrijheid mag nemen deze rekenpartij achterwege te laten dan kunnen we ons direkt koncentreren op de uitkomsten waarmee voor een aantal windregimes het generator vermogen en de overzetverhouding van de transmissie zijn bepaald.

Gemiddelde windsnelheid m/s	**Overzetverh. transmissie i**	**Vermogen gen. kW**	**Toerental gen. omw/min**	**Toerental molen omw/min**
6 - 7	1:7,4	4	1530	207
5,5	1:8,1	3	1530	188
5	1:8,9	2,2	1530	171
4,5	1:10,2	1,5	1530	150
4	1:11	1,1	1530	138

Deze uitkomsten zijn van toepassing op het omschreven 5 meter ontwerp. Neem goede nota van het feit dat geringe verschillen in de overzetverhouding al grote gevolgen heeft t.a.v. de maximum opgewekte energie in de generator.

Voor de volledigheid is in afb. 36 een windkaart opgenomen waarop iedereen zijn eigen lokatie wel ongeveer kan terugvinden. Het heeft geen zin een zwaardere generator te kiezen dan voor een bepaalde gemiddelde windsnelheid staat aangegeven. De plaats waar het prototype staat opgesteld, is in dit kaartje met een stip aangegeven. Wanneer we de gegevens van het prototype goed hebben bekeken, dan zullen we konstateren dat het prototype, op deze plaats althans, is uitgerust met een te lage overbrengverhouding en een te zware generator (een mens kan ook niet alles van te voren weten). Het prototype hoort dus eigenlijk thuis in het kustgebied. Voor de aangegeven plaats op het kaartje (stip) zou moeten gelden'. Overbrengverhouding: 1:8,9 , generator vermogen: 2,2 kilowatt. De keuze van een kleinere generator maakt natuurlijk het 'piekvermogen' lager. **De jaaropbrengst (in kilowattuur) zal echter hoger zijn.**



Afb. 36. Windkaart van Nederland. Geeft aan het jaargemiddelde van de windsnelheid in m/s. (Afb. uit 'Toepassingsmogelijkheden voor zonne- en windenergie bij de Nederlandse P.T.T.' door ir. R. van Lutterveld.)

Generator met twee toerentallen

Bij het prototype werd in het beginstadium een generator toegepast met twee toerentallen (1000/1500 omw/min) om de molen over een breder windgebied optimaal te laten werken. Het windsnelheidspatroon was/is echter van dien aard dat de generator (en dus ook de molen) vele malen per dag van toerental moest veranderen. (Dus van 1000 naar 1500 omw/min, en omgekeerd). Hoewel het overschakelen (bestuurd door windmeter) werd 'verzacht', door korte tijd drie statorweerstanden in te schakelen, waren de impulsmomenten (schokken) op tandwielkast en aanhechting van de rotorbladen van dien aard dat van verdere experimenten werd afgezien.

Vermogen tandwielkast

Het spreekt vanzelf dat het vermogen van de tandwielkast zou kunnen worden aangepast op de gebruikte generator, doch pas op; een tandwielkast (roerwerk) van geringer vermogen heeft een minder zware ingaande (molen)as. **De molenas mag echter niet dunner zijn dan 40 mm Ø.** We kunnen nu twee dingen doen; of het vermogen van de tandwielkast zo groot kiezen dat de ingaande (molen)as minstens 40 mm Ø is, of de molenas los van de tandwielkast opstellen en alsnog een tandwielkast met aangepast vermogen toepassen. Tussen molenas en kast komt dan wel een elastische koppeling. Deze zaken moeten zelf worden bekeken. (Lees veel folders door inzake tandwielkasten e.d.).

Toerental generator

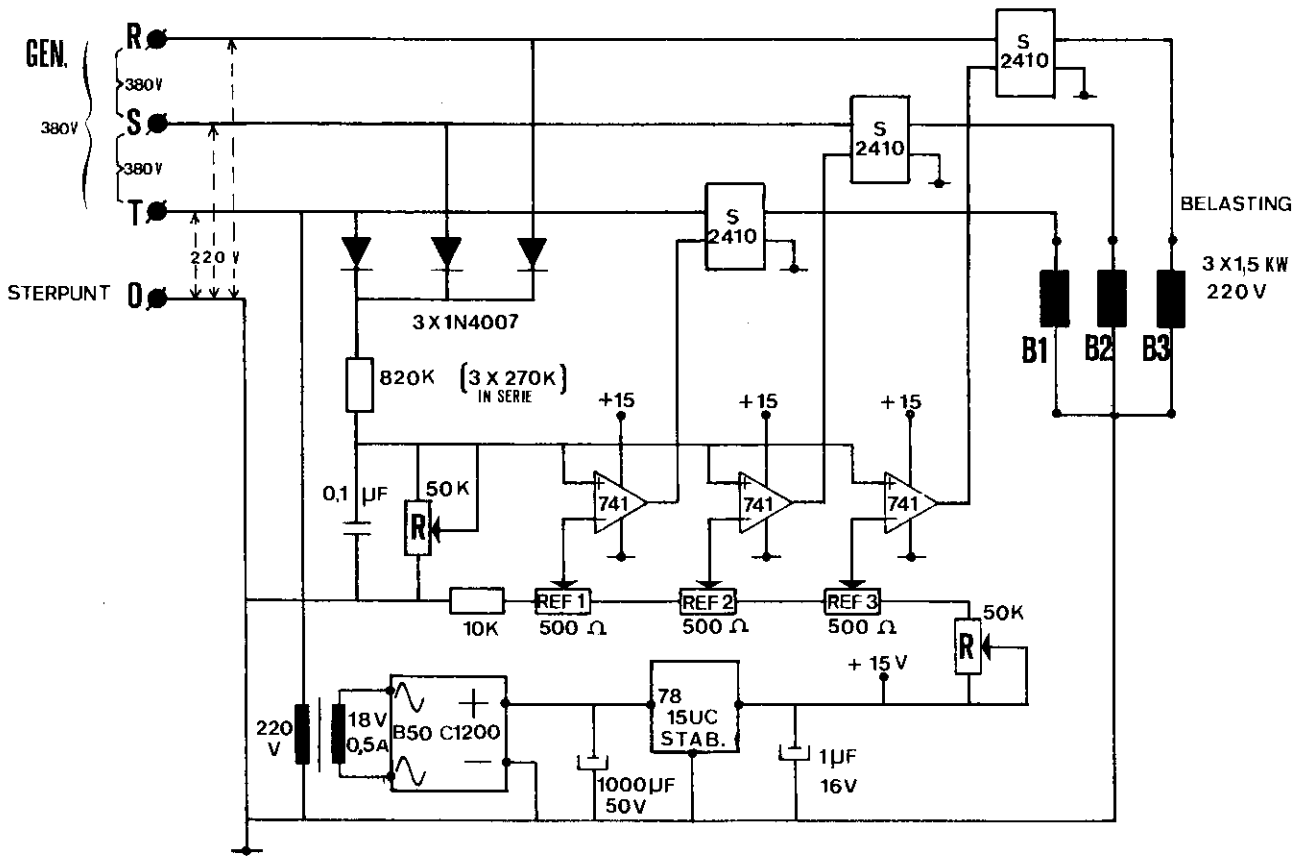
Het opgegeven toerental van de generator kan voor sommigen nog een raadsel zijn. In de tabel is steeds 1530 omw/min aangegeven. Dit toerental blijkt bij benadering te kloppen voor een 4 polige draaistroommotor welke als generator wordt aangewend. Vaak vinden we op het typeplaatje op de motor wel de aanduiding 'RPM = 1430' of zo iets. (1430 omw/min). Dat wil zeggen dat de (4 polige) motor bij nominale belasting ongeveer dit toerental zal draaien. Onbelast zal de motor in principe dichtbij het synchroon toerental draaien (1500 omw/min). Werkend als generator vinden we een overeenkomstig beeld maar nu bóven het synchroon toerental dus laten we zeggen ergens tussen 1500 en 1600 omw/min, bij een netfrequentie van 50 Hz. Van belang is dat we het beste een a-synchroon motor kunnen gebruiken met een toerental van 1500 omw/min en niet van 1000 omw/min vanwege een te hoog gewicht en ook niet van 3000 omw/min vanwege de grote overzet verhouding van de transmissie kast. Wie van dit alles niets meer begrijpt, moet een 'elektrisch/mechanisch vriendje' inschakelen voor nadere uitleg.

Rotorbladstand

Verder wordt nog opgemerkt dat het prototype werkt met een rotor-bladstand van 4° t.o.v. het draaivlak. Wie de gehele installatie heeft geïnstalleerd kan de bladstand nog iets nastellen voor optimaal resultaat. Bij een kleinere bladhoek t.o.v. het draaivlak (b.v. 2°) zal overtrek eerder optreden zodat daarmee het maximum vermogen wat lager komt te liggen. Dit kan nodig zijn om de generator te beschermen tegen overbelasting. Omgekeerd kan, door de bladhoek wat groter te nemen (max 8°), het maximale vermogen worden vergroot doordat de molen pas bij een hogere wind in overtrek komt. (Zo zullen we nog vele malen het gemak van het bladverstelmechanisme tegenkomen).

Netkoppeling

Wat hierboven is verteld zijn ervaringen met de netgekoppelde 5 meter molen. Hoewel de gegevens beslist steekhoudend zijn voor het basisontwerp van de molen, zijn ze onvoldoende om de netkoppelprocedure tot een goed einde te brengen. Daarover vertellen vraagt nog een heel boekwerk. Wanneer iemand daar z'n tanden toch in wil zetten, moet worden verwezen naar de 'Eindexamenopdracht' van R. de Goede en H. Schilde. Dit verslag, dat in samenwerking met het E.C.N. te Petten door



Afb. 37. Het op het juiste moment op- en afschakelen van verwarmings elementen gekoppeld aan molen. Ontwerp: Jan Vink (Kiel Windeweer).

de H.T.S. Amsterdam is uitgevoerd, geeft een goed overzicht van wat er allemaal komt kijken bij netgekoppelde windmolens. (Verslag nr. 1981-E41/42-03-11, verkrijgbaar bij ing. Valter, E.C.N.)

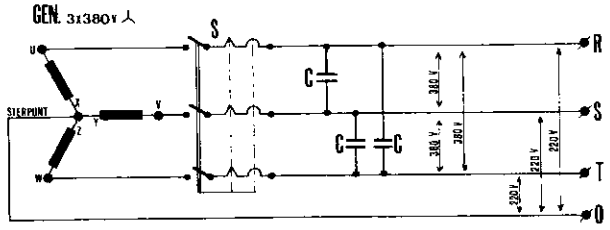
BELASTING AAN VIJF-METER-MOLEN

Het 5 meter prototype is gekoppeld aan het openbare net. De toegepaste techniek en schakelingen zijn dermate gekompliceerd dat ze buiten het bestek van dit boekje zijn gehouden. Als kompensatie echter is een schakeling opgenomen welke het mogelijk maakt de molenenergie aan verwarmingselementen af te staan. Dit op basis van 3 fase 220 volt. Zie afb. 37.

De essentie van de schakeling is dat bij het overschrijden van vooraf ingestelde referentie-drempels (**ref. 1 t/m 3**) een aantal belastingen **B** aan de molen kunnen worden gekoppeld. De schakeling biedt tevens de mogelijkheid om tussen het schakelen van de ene belasting en de volgende belasting het molentoerental enigszins te laten toenemen waardoor een gunstiger belastingslijn voor de heersende wind kan worden ingenomen. Voor een goed resultaat is een behoorlijke kijk op elektronika vereist. De in de schakeling verwerkte schakelaars (S 2410) zijn solid state relais welke zijn voorzien van optisch gekoppelde triacs zodat de uitgangen van de vergelijkers (3 × 741) niet met de 220 volt in aanraking kunnen komen. Bovendien zijn de schakelaars zo ingericht dat, alleen bij núldoorgangen van de 220 volt wisselspanning, wordt in- of uitgeschakeld zodat radio en t.v. storing wordt vermeden. De gebruikte solid state relais zijn geschikt voor het schakelen van 240 volt, 10 amp. Achteraf beschouwd lijken deze waarden, met name de spanning, wat aan de lage kant zodat beter naar een andere uitvoering kan worden gezocht. Goed bruikbaar is het Solid State Relais type S 302-A 210 van Siemens. (280 V 10 A).

Generator 'zelfopwekkend' door aanloopkondensatoren

De gebruikte generator in het prototype kan zonder meer op de schakeling uit afb. 37 worden toegepast wanneer voorzieningen uit afb. 38 worden genomen. Deze bestaan uit het zelf-opwekkend maken van de draaistroom generator (kortsluitankermotor) door kondensatoren.



Afb. 38. Kortsluitanker generator zelfopwekkend d.m.v. aanloopkondensatoren ***C. S*** *is een thermo-magnetische max. stroom schakelaar.* ***U, V, W,*** *en* ***X, Y, Z*** *zijn de aansluitklemmen op de generator welke zijn verbonden met de drie statorwikkelingen.*

Een richtlijn voor de grootte van de kondensatoren is 7 uF per kilowatt per fase voor een stergeschakelde rotor bij een spanning van 380 volt tussen de fasen (R.S.T.). (prototype: **C** = 28 uF voor 4kW generator). **PAS OP. Het gebruik van aanloopkondensatoren kan de generator binnen enkele minuten doen verbranden wanneer toerental en daarmee de frequentie en spanning (en dus stroom) te hoog worden.**

Zorg er dus voor dat de spanning niet hoger wordt dan 220 volt per fase tegen het sterpunt (= 380 volt tussen de fasen onderling), door het op juiste moment laten inschakelen van de belasting d.m.v. de schakeling uit afb. 37. (Afregeling: Eerst grof instellen d.m.v. de twee potentiometers **R50k**, daarna de potentiometers **REF 1, 2 en 3** zodanig instellen dat, bij toenemende wind, de verwarmingselementen **B1, B2 en B3** na elkaar worden ingeschakeld). Laat de frequentie niet hoger worden dan 50 Hz (1500 omw/min generator) door juiste afstelling van het maximum toerental van de molen.

Wat voor soort kondensatoren?

De kondensatoren moeten geschikt zijn voor een spanning van 380 volt en mogen niet 'polair' zijn, dus geen 'elko's'. Zoek naar 'aanloopkondensatoren' of kondensatoren ter verbetering van de 'Cos. Phi' geschikt voor een stroom van minstens 4 amp. Om de generator te beschermen tegen een te hoge stroom moet tussen de generator en de kondensatoren een 3 fase thermische-magnetische maximum schakelaar worden geplaatst. Deze schakelaar wordt met de hand ingeschakeld doch schakelt zichzelf uit wanneer de ingestelde stroomwaarde wordt overschreden. (Dus geen relais-schakelaar). De maximale stroom wordt ingesteld op 10 amp. Philips levert deze schakelaars onder de naam 'Stopcircuit beveiligings automaten' Type nr. ZT 10 MT 211. (10 amp. 3 polig).

Acculader

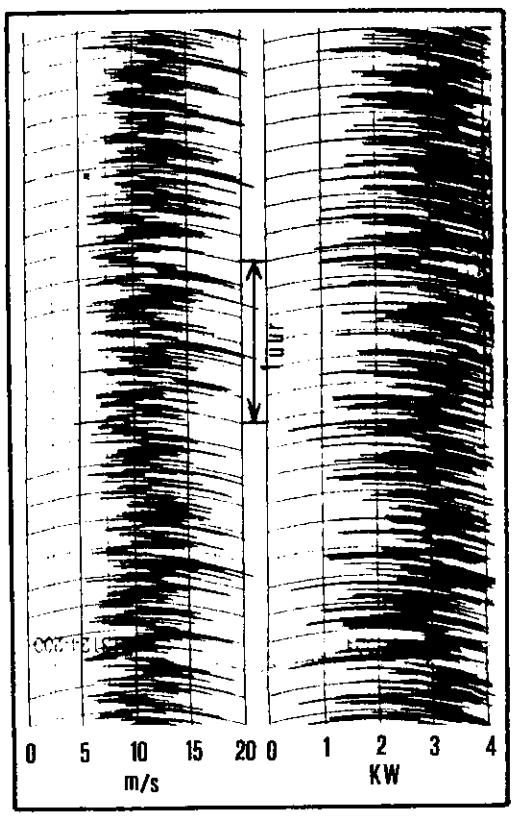
Wie tevens prijs stelt op levering aan accu kan, met een geschikte acculader gekoppeld aan b.v. één fase, de installatie hiermee uitbreiden. Denk er om dat 380 volt heel wat anders is dan een 24 volts installatie. Wie daar niet in thuis is doet verstandig de installatie door een installateur te laten aanleggen.

28 Volts gelijkstroomgenerator op vijf meter molen

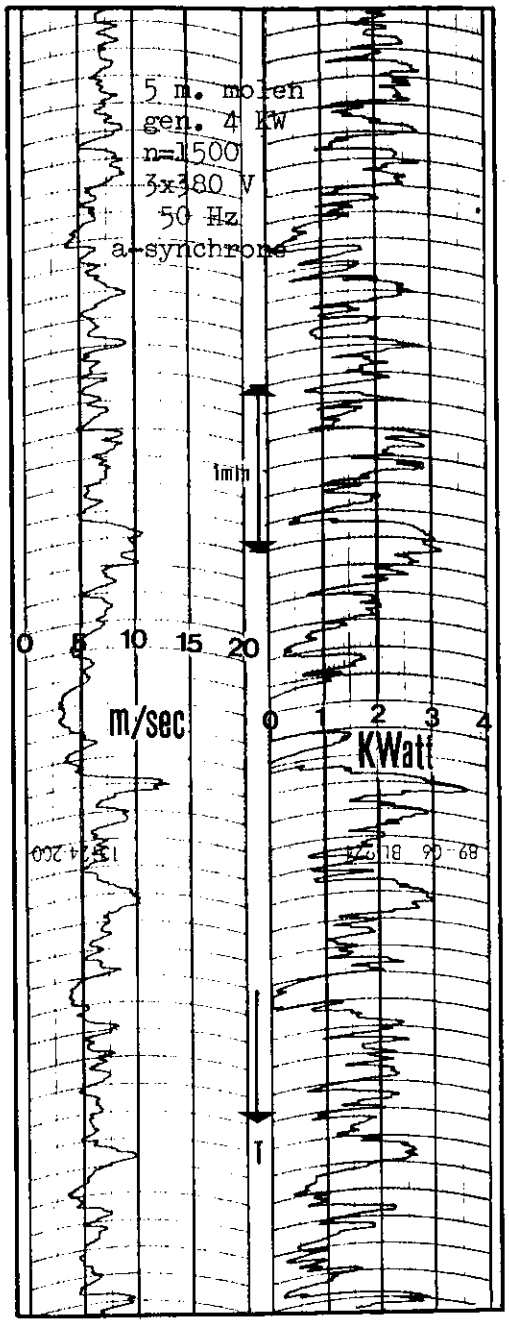
Niet iedereen blijkt gecharmeerd van allerlei 3 fase 380 V toestanden. Daarom nog een toepassing van de vijf meter molen gekoppeld aan een 28 volts autodynamo. We zoeken dan wel een zware generator op van zo'n 1,5 à 2 kilowatt (55 à 70 amp) veelal aanwezig in grote vrachtauto's, draglines e.d. Het toerental van de molen regelen we af op max. 170 omw/min. Met een overbrenging van 1:11,8 wordt de generator op 2000 omw/min gebracht. Wanneer de veldstroom goed wordt beheerst kan de molen bijna het gehele jaar stroom leveren. Dikte stroomdraden minstens 5 mm (20^2).

Molenrem

Het prototype is uitgevoerd met een generator voorzien van aangebouwde schijfrem. Deze rem is gemonteerd op de doorlopende as van de generator en kan door de fabriek worden geleverd. De rem werkt op gelijkspanning van 190 volt. Deze gelijkspanning wordt verkregen door 220 volt via een brugschakeling gelijk te richten. Dit is zo uitgevoerd dat de remwerking optreedt wanneer de spanning wordt weggenomen. Het prototype is zodanig ingericht dat de molen slechts kan draaien, wanneer een keten van beveiligings schakelaars wordt doorlopen welke in serie met de remspoel zijn opgenomen. Bij een onderbreking in één van deze schakelaars wordt ook de stroom door de remspoel onderbroken waardoor de molen direkt op de rem komt. De schakelaars zelf komen in aktie wanneer vooraf ingestelde drempels worden overschreden zoals windsterkte (windmeter), overbelasting generator (vermogensmeter), fout in netkoppel procedure, te grote onbalans in de molen door ijzel (meten met kwikkontakt boven in molenmast), te hoge generatorspanning enz. Wanneer de moeite wordt genomen de omschreven voorzieningen aan te brengen dan kan een zorgeloos molenbedrijf worden verkregen. Wanneer de molen wordt voorzien van een rem **vóór** de transmissiekast, dus direkt op de rotoras, dan moet het remkoppel hiervan minstens 26 kgfm bedragen (260 Nm). Deze waarde geldt voor het (maximum toegelaten) molentoerental van 215 omw/min. Het remkoppel **áchter** de transmissiekast komen we te weten door 26 (kgfm) te delen door de overzetverhouding van de transmissiekast. Dus bij een overzet verhouding van 1:10, bedraagt het remkoppel op de generatoras: 26:10 = 2,6 kgfm (kilogramforce-meter) ofwel 26 Nm.



Afb. 39a.



Afb. 39.

MOLENOPBRENGST

In afb. 39 is een stukje registratie weergegeven om een indruk te krijgen omtrent de molenprestaties. Windsnelheid in m/s en vermogen in kW zijn naast elkaar uitgezet. De grafiek is opgenomen van de netgekoppelde 5 meter molen met 4 kilowatt generator. Uit de grafiek in afb. 39a zien we dat bij een windsnelheid van ongeveer 15 m/s de molen zover in overtrek is gekomen dat geen verdere stijging van het vermogen plaatsvindt. Het gemiddeld afgegeven vermogen ligt dan rond 4 kW. (De tijdschaal is hier 6 schaaldelen per uur).

TROUBLE SHOOTING

Nadat de molen is afgebouwd en afgeregeld kunnen zich in de werking een aantal problemen voordoen, waarvan mogelijk de oorzaak niet direkt kan worden vastgesteld. Omdat met het prototype geruime tijd is geëxperimenteerd kon, aan de hand van het molengedrag, een aantal storingen en hun oplossingen konkreet worden omschreven. De in de oplossingen aangegeven létters en númmers (verwijzing naar onderdelen) gelden voor de drie meter molen. De achtergronden van de omschreven storingen gelden natuurlijk ook voor de vijf meter molen doch de betrokken onderdelen moeten worden gezocht in de tekeningen van de drie meter molen. Zie 'AA' wil zeggen: Zie afregeling systeem A.

PROBLEMEN MET MECHANISCHE OORZAAK (Systeem A)

Klacht	Oorzaak/oplossing
Molen loopt niet aan.	Molen loopt te zwaar. Bladen zijn in werkstand blijven staan doordat: **1e** Regeling of scharnieren gaan te stroef, **2e** Aanloopveren **4b** te slap voorgespannen. Zie AA. blz. 36.
Molen loopt aan; de bladen gaan naar de werkstand waarna toerental weer afneemt. Molen loopt weer aan enz.	**1e** Molen loopt te zwaar. **2e** Aanloopveren **4b** te slap voorgespannen: kontroleer veerkracht. Zie AA. blz. 36.
Toerental te laag.	Ring **5r** (tek. 1 blz. 17) iets verder richting **5d** opschuiven. Oppassen: **per mm opschuiven.**
Toerental te hoog.	Ring **5r** iets verder vanaf **5d** schuiven.
Bij sterke wind gaat molen wat langzamer draaien.	Beschouw dit als ekstra beveiliging tegen zware windlast. Zie 'Werkings-principe bladverstelling'.

PROBLEMEN MET MECHANISCHE OORZAAK (Systeem B)

'Zie AB' wil zeggen: zie afregeling systeem B.

Klacht	Oorzaak/oplossing
Molen loopt niet aan.	Molen loopt te zwaar. Bladhoek werkstand te klein, moet 5° zijn. Zie AB. blz. 38
Toerental te laag.	Veer **4c** (tek. 11 blz. 39) meer voorspannen dus ring **5c** naar voren. Zorg dat veer nog voldoende ingedrukt kan worden i.v.m. max. regelbereik. (30°)
Toerental te hoog.	Veer **4c** minder voorspannen.

PROBLEMEN MET MECHANISCHE OORZAAK (Systemen A en B)

Klacht	Oorzaak/oplossing
Bij harde wind af en toe (sterk) brommend geluid.	**1** Bladen hebben last van 'flutter'. **Toerental moet omlaag. Direkt verhelpen!** **2** Windsnelheid te hoog. Molen op rem.
Molen heeft last van 'zwanezang'. (Geluid van overvliegende zwanen).	Dit geluid wordt makkelijk herkend en treedt op tijdens wegvallende wind met daarbij een te grote bladhoek. Kan worden verholpen door wat exp. met bladstand. Kan verder geen kwaad.
Molen maakt te veel geluid.	**1e** Bladtips onvoldoende glad of afgerond. **2e** Toerental te hoog.
Molen staat vaak 'niet goed op de wind'.	**1e** Kruimolen draait te zwaar. **2e** Groot kettingwiel van windservo beter centreren om kruilager.
Kruimolen draait goed doch molen staat steeds achter de mast.	Schoepen van kruimolen staan verkeerd gericht: konstruktie herzien. Zie 'Werking windservo' blz. 11.

AANHANGSEL 1

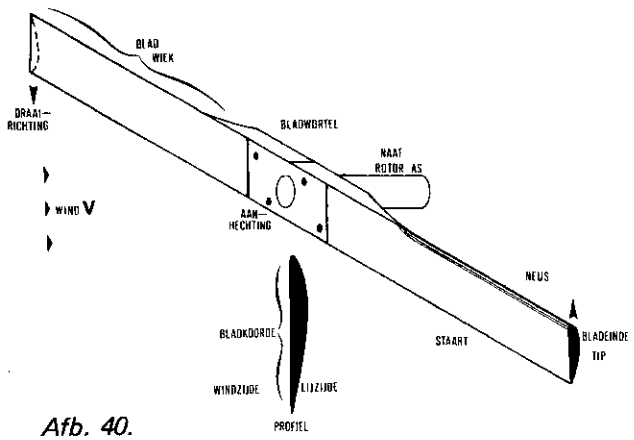
WERKINGSPRINCIPE WINDROTOR

(met medewerking van Gerard van Bussel)

Het uiterlijk van windmolens kan er zeer verschillend uitzien. Voor vrijwel alle modellen geldt echter dat, om maximale energie op te wekken, de weerstand welke de wind van het draaiende wiekstelsel ondervindt zo moet worden gekozen dat slechts 2/3 van de toestromende wind kan worden beïnvloed, 1/3 van de wind ontwijkt dus de molen! Van deze 2/3 hoeveelheid kan vrijwel alle energie (8/9) worden gebruikt, zodat de maximale hoeveelheid energie die kan worden onttrokken $2/3 \times 8/9 = 16/27$ van de aanwezige energie in de wind bedraagt. Deze, ondermeer door Betz bepaalde verhouding heeft een vrij gekompliceerde achtergrond en zal niet verder worden besproken. Er bestaan verschillende manieren om aan deze voorwaarde te voldoen. De twee belangrijkste zijn:

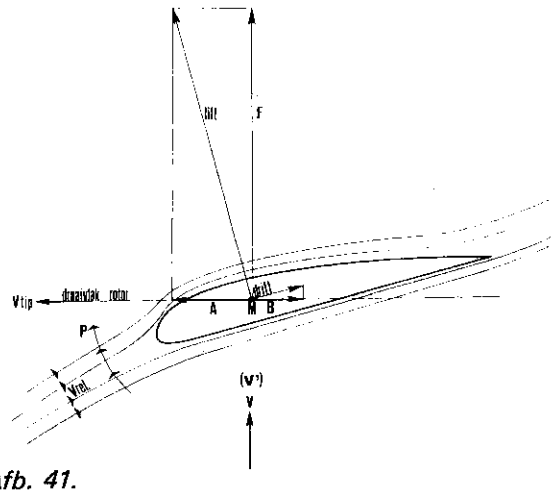
1 De keuze van wiek of bladoppervlak in verhouding tot het bestréken oppervlak van het wiekstelsel. (Bezettings- of volheidsgraad).
2 De snelheid waarmee het wiekstelsel ronddraait.

Algemeen kan worden gesteld dat molens met een naar verhouding groot bladoppervlak in verhouding tot het bestreken oppervlak, langzaam draaien. (Langzaamloper, hoge volheidsgraad, veel bladen). Molens met een naar verhouding klein bladoppervlak in verhouding tot het bestreken oppervlak zullen snel (moeten) draaien. Het laatste type heet snelloper, en de molens in deze bouwbeschrijving vallen onder deze kategorie. In afb. 40 zien we zo'n snelloper afgebeeld met de meest voorkomende benamingen van de diverse rotordelen.



Afb. 40.

We zien in deze afbeelding dat het bladoppervlak zeer klein is t.o.v. het bestreken oppervlak. (Kleine volheidsgraad). Wanneer deze rotor stilstaat wordt vrijwel geen wind ondervangen en zal deze ongehinderd worden doorgelaten. Wanneer de rotor begint te draaien zal de windweerstand toenemen; hoe sneller de rotor draait hoe groter de weerstand is welke de toestromende wind ondervindt. Bij een bepaald toerental zal aan de besproken verhouding van 2/3 worden voldaan. Indien de rotor niet wordt belast zal het toerental nog verder toenemen tot vrijwel geheel geen wind meer wordt doorgelaten. De windweerstand is dan te vergelijken met een geheel dichte ronde schijf. Er zal nu geen lucht meer door de molen stromen; de wind ontwijkt het molenvlak geheel. Een gevolg is dat er ook geen energie uit de wind onttrokken kan worden. De molen draait wel snel maar totaal zonder kracht, d.w.z. met een aandrijfkoppel gelijk aan nul. De snelheid waarmee de bladuiteinden (tips) zich al draaiend verplaatsen zal dan, voor de in dit ontwerp besproken rotor, ongeveer 14 maal zo groot zijn als de snelheid van de toestromende wind. De snellopendheid van de ónbelaste rotor is dan 14. We geven dit aan met λ (Lambda) = 14. Om maximale energie aan de rotor te onttrekken moet de rotor door de rotorbelasting zover worden afgeremd dat weer aan de 2/3 verhouding wordt voldaan. Deze situatie treedt bij de beschreven rotoren op bij een tipsnelheid welke 9 maal groter is dan de windsnelheid ($\lambda = 9$). Bij een windsnelheid van 7 m/s (meter per sec.) is de tipsnelheid van de belaste rotor dus $9 \times 7 = 63$ m/s. Bij deze wind kan een dergelijke tipsnelheid alleen worden verkregen wanneer de bladen zeer goed zijn gestroomlijnd. Globaal kan worden gesteld dat, afgezien van toerenregeling, het belastbare toerental van de rotor 2/3 van het onbelaste toerental bedraagt. Het ligt voor de hand dat de rotor niet zomaar gaat draaien; hiervoor is een drijvende kracht nodig in de draairichting van de rotor. Hoe deze kracht ontstaat zal met afb. 41 worden uitgelegd.



Afb. 41.

Deze afbeelding laat zien wat er zich afspeelt met het bladprofiel wanneer deze in een luchtstroming staat opgesteld. De wind **V** zal in eerste instantie het nog stilstaande profiel naar links opduwen. De rotor begint te draaien langs de streeplijn (draaivlak rotor). Draait de rotor eenmaal, dan gaan de zaken veranderen. Een rotorblad voelt naast de 'gewone' wind, ook nog een 'draaiwind' van opzij. Voor het rotorblad lijkt het alsof de samengestelde wind schuin van voren blaast, zie afb 41. Hier is de samengestelde wind aangegeven door $\mathbf{V}_{rel}$.

Door de profielvorm van het rotorblad ontstaat nu een grote liftkracht loodrecht op de aanstroomrichting van $\mathbf{V_{rel}}$, en een weerstandskracht, soms zeer verwarrend drift genoemd, in de aanstroomrichting van $\mathbf{V_{rel}}$. De grootte van de liftkracht is afhankelijk van de aanstroomsnélheid en van de aanstroomrichting op het profiel. Deze liftkracht heeft een richting die schuin naar achter wijst, en kan worden samengesteld uit een kracht in het draaivlak van de rotor (pijl **A**) en een kracht loodrecht hierop, dus in de windrichting (pijl **F**). De komponent **A** zorgt voor de aandrijfkracht, de komponent **F** levert de al eerder genoemde windweerstand. Door deze windweerstand wordt de windsnelheid vlak voor de rotor kleiner dan de oorspronkelijke snelheid. Men spreekt hier veelal van een gestoorde windsnelheid **V'**. Afbeelding 41 laat de situatie in de buurt van de bladtip zien. De stroming langs de andere delen van het blad is echter niet wezenlijk anders. Laten we eerst eens kijken naar de komponenten van de lift en de profielweerstand (drift) in het draaivlak van de rotor. Komponent **A**, die klein is in verhouding tot de totale lift, drijft de molen aan. Komponent **B**, de komponent van de profielweerstand in het draaivlak, is bijna gelijk aan deze profielweerstand. Zolang **A** groter is dan **B** blijft er een aandrijvende kracht over, die kan worden gebruikt om b.v. een generator te laten draaien. Veronderstel nu dat er geen generator aangekoppeld is, en de molen dus onbelast draait. Dan zal de aandrijvende kracht gebruikt worden om de rotor te versnellen. Dit versnellen zal doorgaan totdat **A** gelijk is geworden aan **B**. Ten opzichte van afb. 41, waarin een optimale werksituatie is getekend, is dan het volgende veranderd:
$\mathbf{V_{tip}}$ is groter geworden (de rotor draait sneller), en hierdoor is de richting van $\mathbf{V_{rel}}$ meer naar het draaivlak verschoven (pijlen **P**). Deze verdraaiing van $\mathbf{V_{rel}}$ is belangrijk, omdat zonder deze richtingsverandering de lift en de profielweerstand in gelijke mate zouden stijgen, en hiermee ook **A** en **B**. Dat zou een steeds sneller draaiende rotor betekenen. Doordat $\mathbf{V_{rel}}$ dus ook van richting verandert, neemt **B** sterker toe dan **A**, zodat op een gegeven moment **A** gelijk aan **B** wordt, en de rotor niet verder versnelt. Het effect wordt nog versterkt doordat met het toenemen van de lift ook de windweerstand toeneemt. Als gevolg hiervan wordt de gestoorde windsnelheid **V'** namelijk nog kleiner, waardoor $\mathbf{V_{rel}}$ extra verdraait. In de optimale situatie, waarin dus het grootste vermogen kan worden onttrokken, geldt ongeveer $\mathbf{V' = 2/3\,V}$
Voor de beschreven rotor geldt dan tevens $\mathbf{V_{tip} = 9 \times V_{wind}}$ $(\lambda = 9)$.

Nog even kort samengevat:
De richting van de toestromende wind **V** is weliswaar aangegeven doch het blijkt dat het bladprofiel zich voornamelijk oriënteert op de relatieve windrichting. Bij een juiste aanstroomhoek op het profiel, welke samenhangt met de juiste tipsnelheid, zal een situatie ontstaan waarbij de optredende lift (meewerkende kracht **A**) in de meest gunstige verhouding is met de aanwezige driftweerstand (tegenwerkende kracht **B**) zodat maximaal vermogen van de rotoras kan worden onttrokken.

Hoewel bij de bespreking van het bladverstel-mechanisme nog wordt ingegaan op een aantal facetten voor wat betreft de instelling van het rotorblad zal van verdere uitleg inzake bladprofielen worden afgezien. Deze materie is ingewikkeld en uitgebreid en leent zich minder goed voor dit, hoofdzakelijk op de praktijk gerichte boekje. Hoofdzaak is dat, door deze min of meer populaire benadering, de nog niet ingewijde molenbouwer ongeveer weet hoe zijn molen aan draaien toekomt.

Wie meer wil weten omtrent de achtergronden van allerlei bladprofielen kan terecht bij de vele publikaties welke over dit onderwerp zijn verschenen. Twee hiervan zijn:

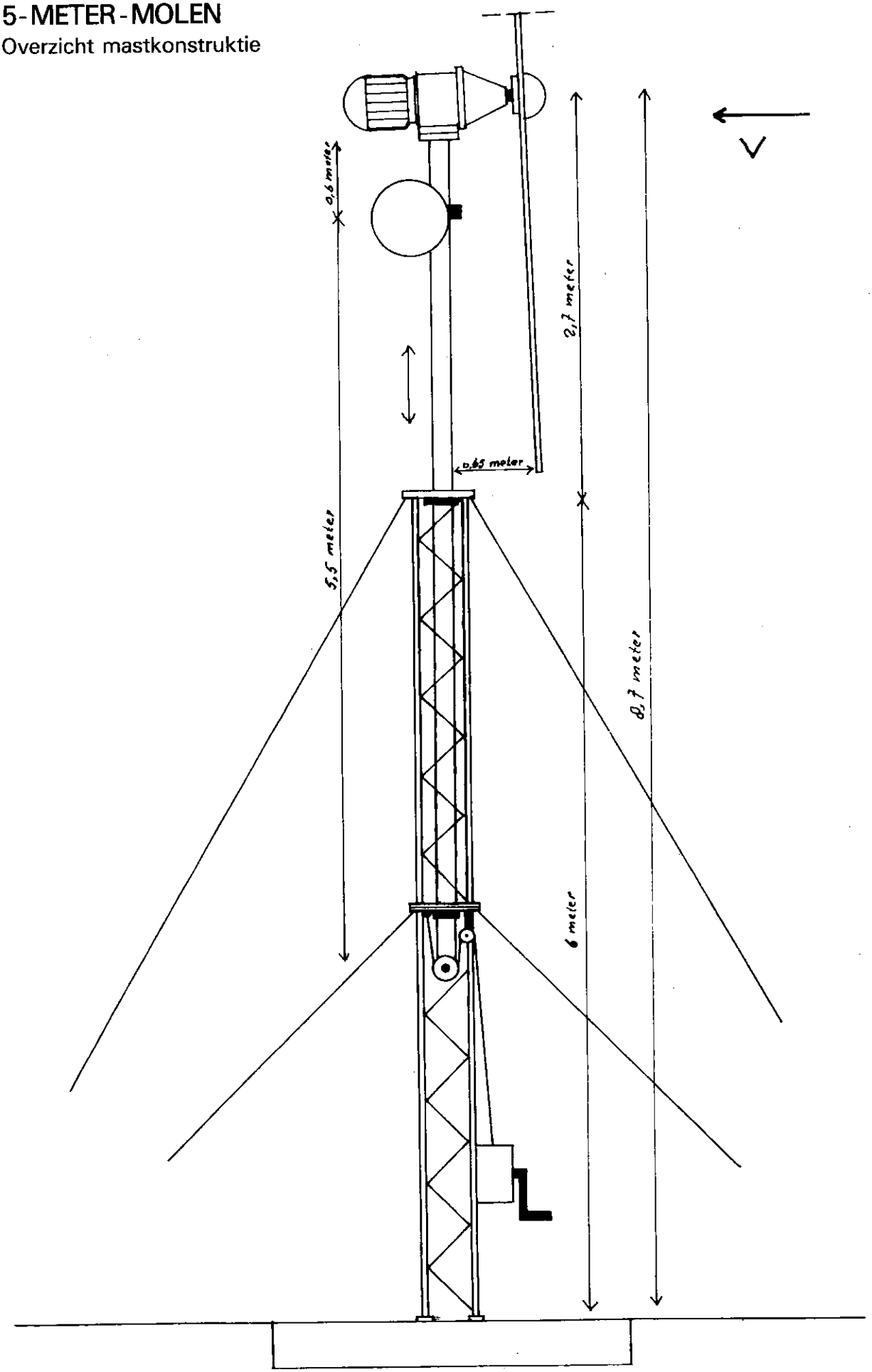
'ROTOR DESIGN FOR HORIZONTAL AXIS WINDMILLS' door W.A.M. Jansen en P.T. Smulders. (mei 1977) publikatie SWD 77-1 D.H.V. Amersfoort. (Deze publikatie zal worden vertaald en binnenkort bij O.D.E. verschijnen.)

'WINDWERKBOEK' door Chris Westra en Herman Tossijn. (aug. 1980) Ekologische Uitgeverij Amsterdam.

AANHANGSEL 2

5-METER-MOLEN

Overzicht mastkonstruktie



Deze handleiding voor de bouw van een windmolen is volledig. Als er niettemin tijdens de bouw problemen rijzen, kun je daarover kontakt opnemen met de windwerkgroep van ODE, die in overleg met de schrijver je vraag zal beantwoorden. Omschrijf je probleem zo duidelijk mogelijk en sluit een gefrankeerde enveloppe met je adres in.
Vragen adresseren aan : ODE- windwerkgroep, Postbus 750, 3500 AT Utrecht.

Nieuwe ideëen en suggesties naar aanleiding van dit boek, maar ook veel voorkomende vragen, komen in het tijdschrift DUURZAME ENERGIE aan de orde.

ODE : de Organisatie voor Duurzame Energie.

Over het toekomstig belang van zon, wind, biomassa en andere vormen van duurzame energie wordt druk gediskussieerd. ODE vindt die diskussie belangrijk, neemt er aan deel, maar vindt, dat er meer kan gebeuren. Vanaf haar oprichting in februari 1979 probeert de vereniging op verschillende manieren praktische, nù te verwezenlijken, toepassingen van duurzame energiesystemen te bevorderen. Ze richt zich daarbij vooral op mensen, die in hun eigen omgeving aan de slag willen.
Binnen ODE zijn er een wind- en een zonnewerkgroep die maandelijks bijeenkomen. ODE is met een informatiestand aanwezig op manifestaties en tentoonstellingen. Zelf organiseerde de vereniging in 1981 de Windwerkdag,waarop pas goed duidelijk werd, hoeveel belangstelling er bestaat voor de mogelijkheden van windmolens.

Uitwisseling van ervaringen en tips is belangrijk op dit nieuwe terrein. Heel direkt gebeurt dat in de regionale ODE-groepen, die al op verschillende plaatsen in het land zijn gevormd. Een andere mogelijkheid om op de hoogte te blijven biedt het blad DUURZAME ENERGIE, dat de vereniging vier maal per jaar uitgeeft.
Ook op het gebied van vergunningenbeleid en belangenbehartiging van de bouwer of gebruiker van duurzame energie-systemen is de vereniging aktief.

Naast dit eerste WINDBOUWWERK (f 17,50 + f 4,- verzendkosten) zijn bij ODE verkrijgbaar :

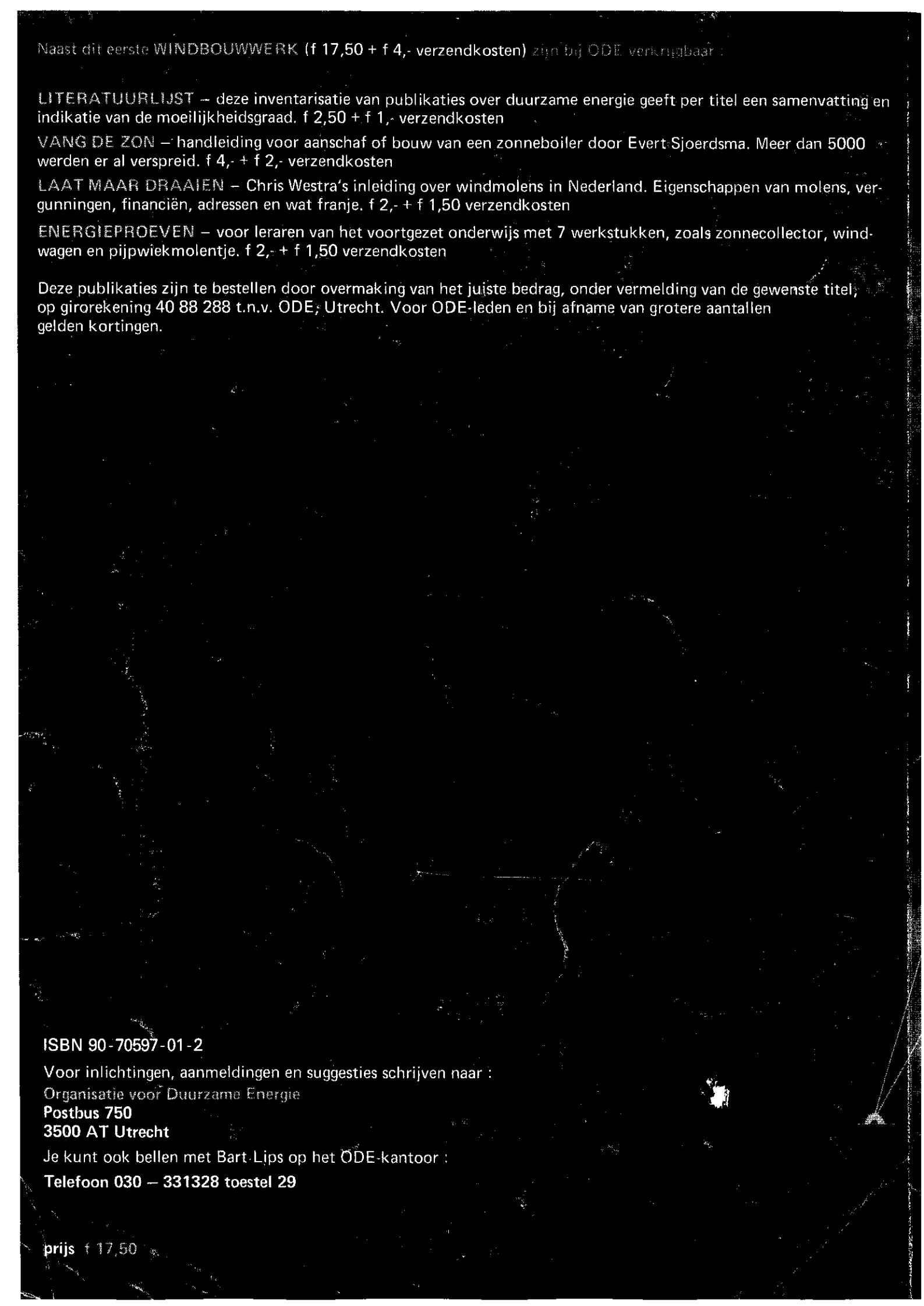
LITERATUURLIJST – deze inventarisatie van publikaties over duurzame energie geeft per titel een samenvatting en indikatie van de moeilijkheidsgraad. f 2,50 + f 1,- verzendkosten

VANG DE ZON – handleiding voor aanschaf of bouw van een zonneboiler door Evert Sjoerdsma. Meer dan 5000 werden er al verspreid. f 4,- + f 2,- verzendkosten

LAAT MAAR DRAAIEN – Chris Westra's inleiding over windmolens in Nederland. Eigenschappen van molens, vergunningen, financiën, adressen en wat franje. f 2,- + f 1,50 verzendkosten

ENERGIEPROEVEN – voor leraren van het voortgezet onderwijs met 7 werkstukken, zoals zonnecollector, windwagen en pijpwiekmolentje. f 2,- + f 1,50 verzendkosten

Deze publikaties zijn te bestellen door overmaking van het juiste bedrag, onder vermelding van de gewenste titel, op girorekening 40 88 288 t.n.v. ODE, Utrecht. Voor ODE-leden en bij afname van grotere aantallen gelden kortingen.



ISBN 90-70597-01-2

Voor inlichtingen, aanmeldingen en suggesties schrijven naar :
Organisatie voor Duurzame Energie
Postbus 750
3500 AT Utrecht
Je kunt ook bellen met Bart Lips op het ODE-kantoor :
Telefoon 030 – 331328 toestel 29

prijs f 17,50