

## Ideën over een 4-bladige windturbine met een rotordiameter van 30 m

### 1 Inleiding

In De Mooi Rooi Krant van 25-5-2022 staat het artikel: “Geen extra windmolens in Meierijstad”. De gemeente Meierijstad heeft door TNO laten onderzoeken of nieuwe grote windmolens door de radartoets zouden komen maar dat blijkt niet het geval te zijn als er drie windmolens bij elkaar komen te staan. In het artikel staat niet waar de molens geplaatst zouden worden, om welk vliegveld het gaat en hoe groot de molens zijn die zouden worden toegepast. In het rapport van de gemeente: “De toekomst van zon en wind in Meierijstad” staat wel waar de molens gepland zijn en dat het om windturbines met een torenhoogte van 120 m en een rotordiameter van 110 m gaat.

In mijn notitie: Commentaar op het rapport: “De toekomst van zon en wind in Meierijstad” wordt aangegeven wat er volgens mij niet klopt aan dit rapport. Mijn grootste bezwaar is dat kleinschalige windenergie voor normale burgers gewoon verboden wordt. Voor boerenbedrijven is windenergie wel toegestaan maar de maximale torenhoogte is gewoon te laag voor Brabant. In mijn notitie: “Wanneer is een radartoets nodig voor windturbines in Meierijstad” werd berekend dat toch behoorlijk grote windturbines mogelijk zijn zonder dat een radartoets nodig is maar dan moet de bovenkant van de rotor wel onder een bepaalde grens blijven.

Onlangs hebben we verkiezingen voor de gemeenteraad gehad en bijna alle politieke partijen zijn tegen windenergie. Zelfs al zou de radartoets wel gehaald worden, dan is er nog een grote kans dat windturbineparken met dergelijke grote windturbines door de gemeenteraad afgestemd worden. Dit komt omdat bijna iedereen geen grote windturbine in zijn achtertuin wil hebben. Dit heeft verschillende redenen die ik hierbij geef in de volgorde waarin ik denk dat die voor de mensen die in de directe omgeving wonen belangrijk zijn.

#### 1.1 Gevaar

Het toerental en de axiale kracht die op de rotor werkt wordt bij grote molens begrensd door bladverstelling. Hierbij zit er in de naaf een meestal hydraulisch aangedreven mechaniek waarmee alle bladen tegelijkertijd verdraaid worden van de normale instelhoek naar de vaanstand. In de vaanstand staat de rotor stil, hoe hard het ook waait. De bladverstelling kan aangestuurd worden door diverse signalen afkomstig van bijvoorbeeld de windsnelheid, het rotortoerental, het vermogen, de generatortemperatuur, de trillingen in de kop of wat dan ook. Hiervoor is een computer nodig die er voor zorgt dat de juiste actie ondernomen wordt als één van de signalen te hoog dreigt te worden. Dit werkt bijna altijd naar bevrediging maar het kan fout gaan als er ergens in de keten een mankement optreedt. Als bij hoge windsnelheden de bladverstelling niet zou werken dan kan de rotor veel te hard gaan draaien en op een gegeven moment bezwijken. Er zijn gevallen bekend waarbij dit ook werkelijk gebeurd is en daarom moeten grote windmolens behoorlijk ver van woningen af staan. Eigenlijk zou de beveiliging “fale safe” moeten zijn wat inhoudt dat de bladen altijd naar de vaanstand gaan als ergens iets in de aansturing of in de hydrauliek uitvalt maar dat is nog niet zo eenvoudig technisch te realiseren, ook omdat voor de bladverstelling energie nodig is.

#### 1.2 Geluidshinder

Het meeste aerodynamische geluid dat de bladen van een windturbine produceren komt van de wicketippen. Dit is zo omdat daar de snelheid van het blad het hoogst is en omdat daar een tipwervel ontstaat die het gevolg is van het drukverschil tussen de voorkant en de achterkant van het blad. De tipsnelheid  $V_{tip}$  hangt af van de windsnelheid en van de zogenaamde snellopendheid  $\lambda$  (lambda) van de rotor.

De  $\lambda$  van een rotor is de verhouding tussen  $V_{\text{tip}}$  en de ongestoorde windsnelheid  $V$  ver voor de rotor. De benodigde koorde  $c$  van het profiel van een blad wordt kleiner naarmate  $\lambda$  hoger gekozen wordt. Bladen van zeer grote windturbines hebben daarom een behoorlijk hoge  $\lambda$  van ongeveer 8 omdat de bladen dan slank zijn en dan niet te zwaar worden. De toerenbegrenzing wordt bij grote windturbines pas geactiveerd bij een rated windsnelheid van ongeveer 12 m/s. Dit houdt in dat de maximale tipsnelheid ongeveer  $8 * 12 = 96$  m/s ofte wel  $3,6 * 96 = 345,6$  km/uur is. Dit is nogal wat en bij deze tipsnelheid zal er een hoop lawaai geproduceerd worden. Moderne bladen hebben vaak  $90^\circ$  omgezette tippen waardoor de tipwervel kleiner wordt en dit geeft een zekere geluidsreductie.

De geluidshinder kan aanmerkelijk gereduceerd worden door de rotor te ontwerpen voor een lagere  $\lambda$  en door de beveiliging al bij een lagere windsnelheid te laten beginnen. Een lagere  $\lambda$  resulteert wel in bredere en dus zwaardere bladen als hetzelfde aantal bladen gebruikt wordt. Een lagere rated windsnelheid resulteert in een veel lager maximum vermogen omdat het vermogen evenredig is met de derde macht van de windsnelheid. Maar het is veel belangrijker dat de molen een goede opbrengst heeft bij lage windsnelheden die vaak voorkomen.

### 1.3 Slagschaduw

Hinderlijke slagschaduw ontstaat als de zon schijnt en wanneer de waarnemer zich bevindt in het schaduwveld van de zon. Hoe groter de windmolenrotor en hoe dichter men zich bij de rotor bevindt, hoe langer men zich in het schaduwveld bevindt. Het is mogelijk om precies te berekenen waar het schaduwveld ligt op een bepaalde dag en op een bepaald uur van die dag en om de rotor stil te zetten als er zich woonhuizen in het schaduwveld bevinden en als tegelijkertijd de zon schijnt. Wanneer de windturbine zich ten noorden van een woonwijk bevindt valt het schaduwveld helemaal niet over de woningen en heeft er dus niemand in de woningen last van.

### 1.4 Vogelslachtoffers

Het is niet te ontkennen dat er soms vogels tegen de bladen van grote windmolens aan vliegen. Dit zijn vooral grote vogels die op grote hoogte vliegen. Er staan op YouTube diverse filmpjes van gevallen waarin te zien is dat een vogel geraakt wordt maar ook als het niet gezien wordt, dan vindt men soms dode vogels aan de voet van de toren. Dit gebeurt vooral als het zicht slecht is vanwege mist of omdat het donker is. Toch zou men zich kunnen afvragen waarom een vogel een draaiende wiek niet kan ontwijken. Bij punt 2 werd al berekend dat de tipsnelheid van grote windturbines bij hoge windsnelheden op bijna 350 km/uur kan liggen en bij deze snelheid is de reactiesnelheid van een vogel meestal te laag om een wiek nog te kunnen ontwijken. Een manier om de kans dat een vogel geraakt wordt te verkleinen is dus om de maximale tipsnelheid te verlagen.

Het is wel zo dat er een selectieve verontwaardiging is als het gaat om het relatief geringe aantal vogelslachtoffers veroorzaakt door windturbines. Het aantal vogels dat jaarlijks gedood wordt door katten loopt in de miljoenen. Ook vanwege het verkeer, de jacht, de hoogspanningskabels en de ramen van huizen worden per jaar miljoenen vogels gedood. En daar komen dan nog eens ongeveer 100 miljoen kippen en ander pluimvee bij.

### 1.5 Horizonvervuiling

Over smaak valt niet te twisten. Of een moderne windturbine mooi of lelijk gevonden wordt hangt af van de visie van de waarnemer. Of een bepaalde windturbine in een bepaald landschap past hangt ook af van de visie van de waarnemer. Klassieke 4-bladige Hollandse windmolens worden door iedereen mooi gevonden en zijn een aanwinst voor het landschap. Maar dat men vindt dat een moderne 3-bladige windturbine met een torenhoogte die hoger is dan die van de dom in Utrecht, niet in het Brabants landschap past, daar is wat voor te zeggen.

## 2 Ideeën over de VIRYA-30

Op het gebied van auto's is er een trend om van oude geliefde modellen een moderne versie uit te brengen. Dit werd bij o.a. gedaan voor de VW kever, de Fiat 500 en de Austin mini. Stel nu eens dat we dit ook zouden doen voor een klassieke Hollandse windmolen. De klassieke Hollandse windmolen is ontworpen in een tijd toen de aerodynamische theorie voor het ontwerpen van rotorbladen nog niet bekend was. Deze theorie werd in 1926 ontwikkeld door Betz en in 1935 verder uitgewerkt door Glauert en wordt gegeven in mijn openbare rapport KD 35: "Rotorontwerp en matching voor horizontale as windturbines" (ook beschikbaar in het Engels) dat voor iedereen gratis van mijn website: [www.kdwindturbines.nl](http://www.kdwindturbines.nl) te kopiëren is onder het menu KD-reports.

Kenmerkend voor klassieke Hollandse windmolens is dat ze vier bladen hebben. Stel nu eens dat we dit handhaven. Voor een hoge vermogenscoëfficiënt  $C_p$  (zie KD 35 formule 4.1) is het echter nodig dat een aerodynamisch profiel gebruikt wordt met een lage weerstandscoëfficiënt (zie KD 35 hoofdstuk 4.3.3). Een bladopbouw met een houten raamwerk en zeilen is daarom niet mogelijk. De grootste klassieke Hollandse molens hebben een vlucht ofte wel een rotordiameter van bijna 30 m. Ik heb al eerder een notitie geschreven over een 4-bladige windturbine met een rotordiameter van 20 m maar bij nader inzien lijkt dit toch wat aan de kleine kant. Stel we kiezen  $D = 30$  m wat inhoudt dat  $R = 15$  m. Voor een moderne windturbine is dit maar klein maar er moet niet onderschat worden welk vermogen hier toch nog mee opgewekt kan worden. De molen wordt de VIRYA-30 genoemd.

De torenhoogte van klassieke Hollandse windmolens is vaak maar iets hoger dan de rotorstraal als de molen in open terrein staat. Maar voor molens die in de stad staan, worden veel hogere torens gebruikt met een stelling ofte wel een rond lopende stellage die wel 10 m boven de grond kan liggen. Stel nu eens dat we een torenhoogte kiezen van 35 m. Dit houdt in dat de bovenkant van de rotor op 50 m ligt zodat er nog maar beperkt sprake is van horizonvervuiling en waarvoor ook geen radartoets nodig is. De onderkant van de rotor ligt dan op 20 m waardoor er ook maar weinig last zal zijn van turbulentie die veroorzaakt wordt door begroeiing en bebouwing.

Om een indruk te geven wat er met deze windturbine gedaan kan worden heb ik daar wat berekeningen aan uitgevoerd. Een dergelijk windturbine is niet op de markt beschikbaar en zal dus nog ontworpen moeten worden. In deze notitie geef ik alleen de basis uitgangspunten.

Het mechanische vermogen  $P$  van de rotor wordt gegeven door formule 4.1 uit KD 35. Het elektrische vermogen  $P_{el}$  dat uit de generator komt wordt gegeven door formule 4.2 uit KD 35. De in deze formule gebruikte rendementen worden niet in procenten gegeven maar zijn een factor van 1. Bij een netgekoppelde windturbine is een inverter nodig die er voor zorgt dat de door de generator geleverde 3-fasen wisselspanning gelijkgericht wordt en omgezet wordt in een 3-fasen wisselspanning met de juiste spanning en frequentie van het net. Deze inverter heeft een rendement  $\eta_{inv}$  en formule 4.2 uit KD 35 verandert dan in:

$$P_{el} = C_p * \eta_{tr} * \eta_{gen} * \eta_{inv} * \frac{1}{2} \rho V^3 * \pi R^2 \quad (W) \quad (1)$$

Hierin is  $P_{el}$  het elektrische vermogen (W),  $C_p$  de vermogenscoëfficiënt van de rotor (-),  $\eta_{tr}$  het transmissierendement (-),  $\eta_{gen}$  het generatorrendement (-),  $\eta_{inv}$  het inverterrendement (-),  $\rho$  de luchtdichtheid ( $\text{kg/m}^3$ ),  $V$  de ongestoorde windsnelheid ver vóór de rotor (m/s) en  $R$  de rotorstraal (m). Door Betz werd aangetoond dat de vermogenscoëfficiënt  $C_p$  nooit groter kan zijn dan  $16/27$  ofte wel 0,59 (zie hoofdstuk 4.2 KD 35). De werkelijke  $C_p$  ligt aanzienlijk lager dan 0,59 vanwege vier oorzaken die gegeven worden in hoofdstuk 4.3 van KD 35. Voorlopig wordt uitgegaan van  $C_p = 0,45$ . Het transmissierendement hangt af van het type overbrenging en van het aantal stappen.

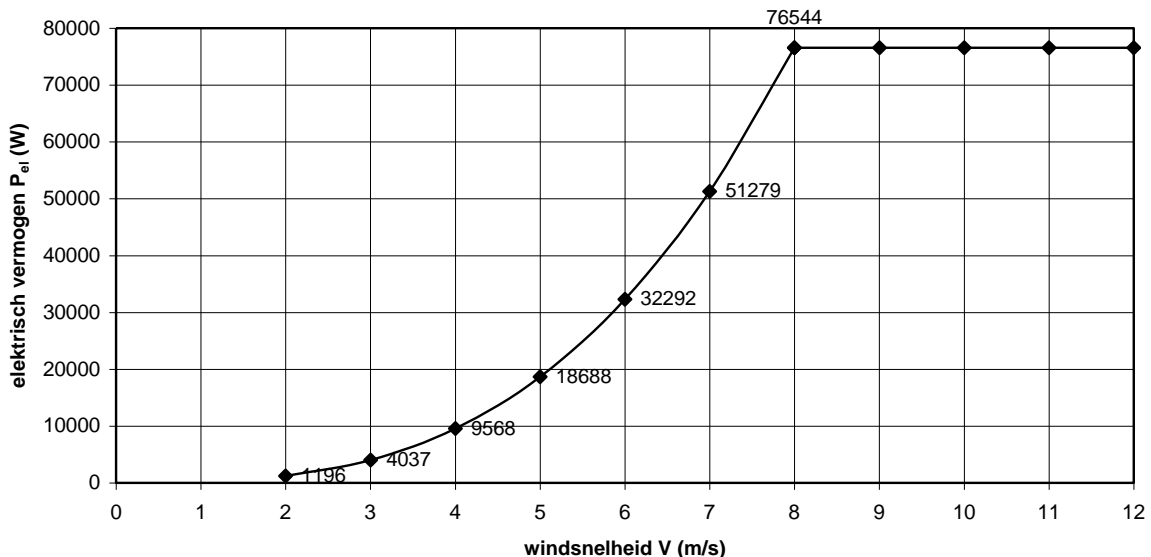
Voorlopig wordt er vanuit gegaan dat een 2-traps tandwieloverbrenging wordt toegepast met  $\eta_{tr} = 0,95$ . Voor de generator wordt uitgegaan van een 3-fasen generator met permanent magneten en dat  $\eta_{gen} = 0,85$ . Moderne inverters hebben een hoog rendement en aangenomen wordt dat  $\eta_{inv} = 0,97$ . De luchtdichtheid  $\rho$  is ongeveer  $1,2 \text{ kg/m}^3$  voor lucht met een temperatuur van  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  op zeeniveau. De rotorstraal  $R$  is de helft van de rotordiameter  $D$  en dit geeft dat  $R = 15 \text{ m}$  voor  $D = 30 \text{ m}$ . Invulling van deze waarden in formule (1) geeft dat:

$$P_{el} = 149,5 * V^3 \quad (\text{W}) \quad (2)$$

De inverter werkt pas bij een bepaalde minimale generatorspanning. Aangenomen wordt dat deze spanning bereikt wordt bij een windsnelheid van  $2 \text{ m/s}$ . De molen moet voorzien zijn van een beveiliging die het vermogen bij hoge windsnelheden beperkt. Aangenomen wordt dat deze beveiliging zodanig werkt dat opgewekte vermogen voor windsnelheden boven  $8 \text{ m/s}$  constant blijft. Het opgewekte vermogen werd nu m.b.v. formule 2 berekend voor windsnelheden tussen  $2 \text{ m/s}$  en  $8 \text{ m/s}$  en weergegeven in de  $P_{el}$ - $V$  kromme van figuur 1.

De  $P_{el}$ - $V$  kromme geeft dus het elektrische vermogen dat aan het net geleverd wordt voor een bepaalde constante ongestoorde windsnelheid  $V$  op ashoogte. Het vermogen dat bij een bepaalde gemiddelde windsnelheid geleverd wordt is hoger dan het vermogen bij dezelfde constante windsnelheid omdat het vermogen toeneemt met de derde macht van de windsnelheid. Hoeveel hoger hangt af van de fluctuatie van de windsnelheid en van de periode waarover gemiddeld wordt. Dit effect is eenvoudig aan te tonen.

Stel dat we een constante windsnelheid hebben van  $5 \text{ m/s}$ . In figuur 1 is dan af te lezen dat  $P_{el} = 18688 \text{ W}$ . Stel nu dat we een uur lang een windsnelheid hebben van  $3 \text{ m/s}$  en een uur lang een windsnelheid hebben van  $7 \text{ m/s}$ . Dit geeft een gemiddelde windsnelheid van  $5 \text{ m/s}$ . Het vermogen bij  $3 \text{ m/s}$  is  $4037 \text{ W}$  en bij  $7 \text{ m/s}$  is  $51279 \text{ W}$ . Het gemiddelde vermogen is dus  $(4037 + 51279) / 2 = 27658 \text{ W}$ . Dit  $8970 \text{ W}$  hoger dan bij een constante windsnelheid van  $5 \text{ m/s}$  ofte wel een factor  $27658 / 18688 = 1,48$  hoger.



Figuur 1 Geschatte  $P_{el}$ - $V$  kromme voor een windturbine met een rotordiameter  $D = 30 \text{ m}$

Om een indruk te krijgen wat een dergelijke molen opbrengt in Meerijstad moet het windregime bekend zijn. Op de windkaart van Nederland is af te lezen dat de gemiddelde jaarlijkse windsnelheid in Meerijstad ongeveer  $4 \text{ m/s}$  is op  $10 \text{ m}$  hoogte in open terrein. De gemiddelde windsnelheid gedurende de drie wintermaanden is hoger, stel  $5 \text{ m/s}$  op  $10 \text{ m}$  hoogte in open terrein. Maar op  $35 \text{ m}$  hoogte in bebouwd terrein zal hij nog hoger zijn. Stel  $V = 5,5 \text{ m/s}$ . De  $P_{el}$ - $V$  kromme geldt voor constante windsnelheden.

Maar de opbrengst voor een bepaalde gemiddelde windsnelheid is hoger dan voor dezelfde constante windsnelheid. Stel dat de  $P_{el}$ -V kromme voor de wintermaanden afgelezen mag worden voor een windsnelheid van 6 m/s. In figuur 1 is dan af te lezen dan  $P_{el} = 32292$  W.

Stel nu eens dat er één molen gebruikt wordt voor een nieuwe woonwijk met 60 goed geïsoleerde vrijstaande huizen. Op mijn website: [www.kdwindturbines.nl](http://www.kdwindturbines.nl) staat onder het menu "No wind energy" de notitie: "Ideeën over een levensloopbestendig vrijstaand huis geschikt voor driedubbele bewoning". Stel nu eens dat dit huistype wordt toegepast voor alle huizen. In hoofdstuk 5 van deze notitie wordt berekend dat het warmteverlies ongeveer 2200 W is en dat voor een warmtepomp met een COP van 4 dan 550 W nodig is.

Het dak van het huis is voorzien van 44 zonnepanelen van 300 W piek. Eén 300 W zonnepaneel heeft een jaaropbrengst van ongeveer 260 kWh. 44 zonnepanelen hebben dus ongeveer een jaaropbrengst van  $44 * 260 = 11440$  kWh. Van deze jaaropbrengst wordt echter maar ongeveer 2 % geleverd in de maand december. De opbrengst in december is dus ongeveer  $0.02 * 11440 = 228,8$  kWh. December heeft 31 dagen en dus  $31 * 24 = 744$  uur. Het in december opgewekte gemiddelde vermogen is dus  $228,8 / 744 = 0.308$  kW = 308 W. Zelfs het gebruik van 44 zonnepanelen geeft dus in december lang niet genoeg opbrengst voor de warmtepomp.

Behalve voor de warmtepomp is er ook elektrische energie nodig voor andere elektrische apparatuur. Het gemiddeld Nederlands verbruik ligt ongeveer op 3500 kWh per jaar. Met een bewuster omgaan met energie moet dit zeker te halveren zijn en ongeveer 1750 kWh per jaar worden. Een jaar heeft  $24 * 365 = 8760$  uur en het gemiddelde vermogen is dan  $1750 / 8760 = 0,2$  kWh = 200 W. Samen met het verbruik van de warmtepomp is dan ongeveer 750 W nodig.

Toepassing van één VIRYA-30 windmolen geeft in december een extra opbrengst van 32292 W en dus  $32292 / 60 = 538$  W per huis als er 60 huizen toegepast worden. Alleen de windmolen wekt dus al bijna genoeg op voor de warmtepompen van alle 60 huizen! De windmolen plus de zonnepanelen wekken samen in december dus ongeveer  $538 + 308 = 846$  W op wat ruim meer is dan de berekende 750 W. Deze berekening toont aan dat het wel degelijk zinnig is om voor een nieuwe woonwijk de toepassing van een middelgrote windturbine te overwegen en dat niet alleen maar naar megawatt turbines gekeken moet worden.

Het is niet zo dat elk huis werkelijk met de windturbine verbonden is maar er moet een contract gesloten worden zodanig dat de momentaan geleverde energie verrekend mag worden met de momentaan gebruikte energie van de huizen. De huizen moeten zeer goed geïsoleerd zijn. Indien vloerverwarming wordt toegepast, heeft het huis een grote warmtecapaciteit waardoor de dagelijkse fluctuaties in de toevoer aan wind- en zonne-energie opgenomen kunnen worden zonder dat dit tot grote temperatuursvariëaties leidt.

Momenteel geldt de salderingsregeling nog waardoor men evenveel voor geleverde energie terugkrijgt als men voor afgenomen energie moet betalen. Maar waarschijnlijk wordt deze regeling vanaf 2025 afgebouwd en in 2030 zal men voor afgenomen energie veel meer moeten betalen dan men voor geleverde energie terugkrijgt. Een windturbine heeft juist de hoogste opbrengst gedurende de wintermaanden en sluit dus veel beter aan op het hoge energieverbruik in de winter wanneer er verwarmd wordt met een warmtepomp.

Hoe de molen er precies uit komt te zien is nog niet bekend omdat de molen nog ontworpen moet worden. Essentieel is dat de molen veilig is, weinig geluid maakt en er acceptabel uitziet. In mijn openbare rapport KD 727 wordt de VIRYA-12 beschreven (zie website menu KD-reports). Deze molen heeft een 4-bladige houten rotor met een rotordiameter van 12 m en een lage ontwerpsnellopendheid van 5 waardoor de geluidsproductie maar gering is. Een plaatje van de rotor wordt gegeven in figuur 1 van KD 727. Deze rotor kan opgeschaald worden naar een rotordiameter van 30 m.

Voor de 3-bladige VIRYA-10 (zie KD 715), de 3-bladige VIRYA-14 (zie KD 732) en de 4-bladige VIRYA-12 (zie KD 727) wordt een beveiliging toegepast waarbij de hele rotor bij hoge windsnelheden om een horizontale as uit de wind draait. Deze beveiliging heeft een bijna ideale regelkarakteristiek en wordt beschreven in rapport KD 439. Het grote voordeel is dat een rotor met vaste bladen gebruikt kan worden. Als dit type beveiliging ook voor de VIRYA-30 zou worden toegepast, dan wijkt de aanblik van de molen bij hoge windsnelheden wel erg af van een klassieke Hollandse windmolen. Maar het ontwikkelen van een goed werkend bladverstelmechanisme voor een 4-bladige rotor is een enorme klus. Ik ga er daarom voorlopig vanuit dat toch de beveiliging gebruikt wordt die in KD 439 beschreven wordt. Een voordeel van deze beveiliging is ook dat de rotor bij zeer hoge windsnelheden in de zogenaamde helikopterpositie gezet kan worden waarin de rotor maar heel weinig wind vangt.

Voor de VIRYA-10 en de VIRYA-12 wordt een dubbele vaan gebruikt om de rotor op de wind te richten. Voor de VIRYA-30 zouden dan toch wel zeer lange vaanbuizen nodig zijn omdat de beide vaanbladen links en rechts buiten de rotor uitsteken. Voorlopig wordt er daarom vanuit gegaan dat de kop door een elektromotor op de wind gericht wordt. Maar het is ook mogelijk om een windservo te gebruiken. Een windservo is een kleine veelbladige rotor met een lage snelheid en een hoge startkoppelcoëfficiënt die haaks op de hoofdrotor staat. Onderzoek aan een 8-bladige windservo met vierkante vlakke bladen wordt beschreven in rapport KD 671.

In eerste instantie wordt er vanuit gegaan dat een versnellende 2-traps tandwielkast wordt toegepast. Dit geeft een redelijk hoog generatortoerental waardoor de generator licht een relatief goedkoop zal zijn. Het is ook mogelijk om een direct drive generator te ontwikkelen, waarbij er dus geen tandwielkast is die gesmeerd moet worden en die geluid kan maken, maar dat is een kostbare en veel tijd vergende activiteit. Ik wil wel meedenken over het ontwerp van de molen maar de uitwerking van het ontwerp, de fabricage en de verkoop zullen door een professioneel bedrijf uitgevoerd moeten worden.