

**Opslag van duurzaam opgewekte warmte in een waterbuffer
voor vier door garages geschakelde vrijstaande huizen**

ing. A. Kragten

maart 2021
herzien oktoberber 2022

KD 713

Het is toegestaan om dit rapport te kopiëren voor privé gebruik. Het idee van de beschreven warmteopslag is vrij te gebruiken.

Ontwerpbureau Kragten Design
Populierenlaan 51
5492 SG Sint-Oedenrode
Nederland
telefoon: 0413 475770
e-mail: info@kdwindturbines.nl
website: www.kdwindturbines.nl

Bevat	pagina
1 Introductie	3
2 Bepaling van de optimale vorm van de warmtebuffer	4
3 Toepassingen van de warmtebuffer	6
4 Beschrijving van de windmolen	8
5 Bepaling van de warmte-inhoud van het buffervat en de ontladtijd	9
6 Gebruik van de VIRYA-10	11
7 Controle van het rendement van de warmtebuffer	11
8 Referenties	13

1 Introductie

Alle Nederlandse gemeentes moeten voor 2022 op papier zetten hoe zij denken vóór 2050 van het gas af te gaan. Het kan nog wel tien jaar duren voordat de eerste wijken werkelijk worden afgesloten maar het gaat een keer gebeuren. De reden hiervoor is dat Nederland een aanzienlijke reductie van de CO₂ uitstoot moet realiseren en dat het oppompen van aardgas aardbevingen in Groningen veroorzaakt wat grote schade aan gebouwen geeft.

Eén van de manieren waarop dit kan, is om de woning uit te voeren met een warmtepomp en die te voeden met elektrische energie die opgewekt wordt met zon of wind. Het voordeel van een warmtepomp is dat men ongeveer vier keer zo veel warmte krijgt als er aan elektrische energie wordt toegevoegd om de compressor aan te drijven. Een nadeel van zonnepanelen is dat de opbrengst het grootst is in de zomer maar dat de warmtebehoefte het grootst is in de winter. De opbrengst van windmolens loopt wat dat betreft beter in de pas met de warmtebehoefte. Maar ook voor windmolens zijn er in de winter dagen dat er weinig wind is en dat de opbrengst niet hoog genoeg is. Over de opwekking van warmte met een windmolen heb ik recentelijk het Nederlandstalige rapport KD 709 geschreven (ref. 1).

Men doet alsof het net als een buffer gebruikt wordt maar dit is maar schijn. Elke kWh die op een bepaald ogenblik gebruikt wordt moet op dat ogenblik opgewekt worden. De grote toevoer van elektriciteit aan het net in de zomer door zonnepanelen maakt alleen dat de centrales op fossiele brandstof 's zomers minder hard hoeven te werken. Men spaart dus brandstof uit maar de meeste centrales moeten gewoon stand by staan en het net moet ook gewoon beschikbaar zijn. De waarde van de toegevoerde energie in de zomer is daardoor veel lager dan de waarde van de afgenomen energie in de winter. Daarbij komt ook nog dat het net sterk verzwakt zal moeten worden voor de extra energie die 's zomers opgewekt wordt. De benodigde energie voor het grote aantal toekomstige warmtepompen moet dan in de winter op een andere manier opgewekt worden en ik vrees dat dat niet duurzaam zal zijn.

Door de salderingsregeling die momenteel nog geldt, krijgt iemand net zo veel terug voor de energie die hij 's zomers levert als hij moet betalen voor de energie die hij 's winters afneemt (als in één jaar niet meer energie geleverd wordt dan afgenomen wordt) maar dit is een vorm van subsidie. De salderingsregeling zal vanaf 2025 afgebouwd worden. Het zal zo ver komen dat je voor een kWh die je 's zomers aan het net levert misschien maar 10 eurocent ontvangt terwijl je voor een kWh die je 's winters afneemt misschien wel 60 eurocent moet gaan betalen. Dit zal erin resulteren dat de terugverdientijd van zonnepanelen veel langer wordt dan hij nu is.

Het probleem van de fluctuerende opbrengst van zon en wind kan opgelost worden met een warmtebuffer als die voldoende groot is en goed genoeg geïsoleerd is en als het huis dat op de warmtebuffer is aangesloten ook goed genoeg geïsoleerd is. Momenteel loopt er een proefproject in Boekel waarbij de CESAR warmtebuffer gebruikt wordt. Bij deze warmtebuffer wordt de warmte opgeslagen in basalt waarbij men tot een temperatuur van 450 °C gaat. Dit vereist een extreem goede isolatie en men moet absoluut voorkomen dat er water bij het hete basalt kan komen omdat de zaak dan kan exploderen. Door het basalt lopen stalen buizen. De buizen dienen als stroomgeleider waar de warmte in wordt opgewekt. De warmte wordt afgevoerd met hete lucht die door de buizen stroomt. De energie in de hete lucht wordt in een warmtewisselaar omgezet naar heet water. Ik neem aan dat men de juiste berekeningen gemaakt heeft waaruit blijkt dat dit systeem zou kunnen werken maar ik ben niet gelukkig met de zeer hoge temperatuur die in het basalt kan optreden. Ik denk dat warmteopslag in een watervat ook mogelijk is en dat dit minder kans geeft op calamiteiten.

Het voordeel van water is dat men in een bepaald volume ongeveer een factor twee meer energie kan opslaan per graad temperatuurstijging dan in basalt. Het nadeel van water is dat men niet hoger kan gaan dan ongeveer 90 °C. Als men in basalt tot een temperatuur van 450 °C gaat, dan kan men bij deze temperatuur in een bepaald volume toch ongeveer een factor 3,5 meer energie opslaan dan in water met een temperatuur van 90 °C, er vanuit gaande dat de energie gebruikt wordt voor vloerverwarming met een watertemperatuur van 30 °C.

2 Bepaling van de optimale vorm van de warmtebuffer

Voor een warmtebuffer geldt een eenvoudige schaalwet. Als de afmetingen toenemen met een factor twee dan neemt de inhoud toe met een factor acht en het oppervlak met een factor vier. De warmtecapaciteit voor een bepaald materiaal per °C is evenredig met de inhoud maar het warmteverlies bij een bepaald temperatuurverschil en een bepaalde isolatie is evenredig met het oppervlak. Daardoor is het steeds gemakkelijker om de warmteverliezen te beperken naarmate de inhoud van de warmtebuffer groter is. Het is daardoor lastig om een effectieve warmtebuffer te maken voor één enkel huis. Ik heb daarom gekozen voor één warmtebuffer voor twee blokken van twee huizen, dus voor totaal vier huizen, waarbij de posities van de huizen zo gekozen zijn dat de achtertuinen van de twee huizen in één straat grenzen aan de achtertuinen van de twee huizen in een andere straat. De warmtebuffer ligt dan precies op het snijpunt van de perceelgrenzen en de lengte van de leidingen waardoor het water naar de huizen wordt toe- en afgevoerd, is daardoor maar beperkt.

De theoretisch optimale vorm van een warmtebuffer is een bol omdat daarvoor het oppervlak voor een bepaalde inhoud het kleinst is. Maar een bol is lastig te maken en daarom ga ik uit van een rechtop staande cilinder. Het water dat in de cilinder zit, zal op de cilinderwand een druk uitoefenen die toeneemt met de diepte en een cilinder heeft dan als voordeel dat daarin alleen trekspanningen voorkomen. De boven- en de onderkant van de cilinder worden afgedekt door een cirkelvormige plaat. Om daarin geen grote buigspanningen te krijgen, worden deze platen daarom voor normale tanks ook gewelfd. Maar de berekening van de inhoud is lastig voor gewelfde platen en daarom wordt voorlopig uitgegaan van vlakke schijven. De vraag is nu wat de optimale verhouding is tussen de diameter D en de hoogte H waarbij het oppervlak het geringst is voor een bepaalde inhoud. Ik verwacht dat dit het geval is voor $D = H$ maar het is goed om te weten hoe het oppervlak varieert bij andere verhoudingen van D/H . De inhoud I van een cilinder wordt gegeven door:

$$I = \pi/4 D^2 * H \quad (\text{m}^3) \quad (1)$$

Het oppervlak A van een cilinder met cirkelvormige zijvlakken wordt gegeven door:

$$A = \pi (0,5 D^2 + D * H) \quad (\text{m}^2) \quad (2)$$

Als de hoogte H gelijk is aan de diameter D dan geldt voor de inhoud I dat:

$$I = \pi/4 D^3 \quad (\text{m}^3) \quad (3)$$

Als de hoogte H gelijk is aan de diameter D dan geldt voor het oppervlak A dat:

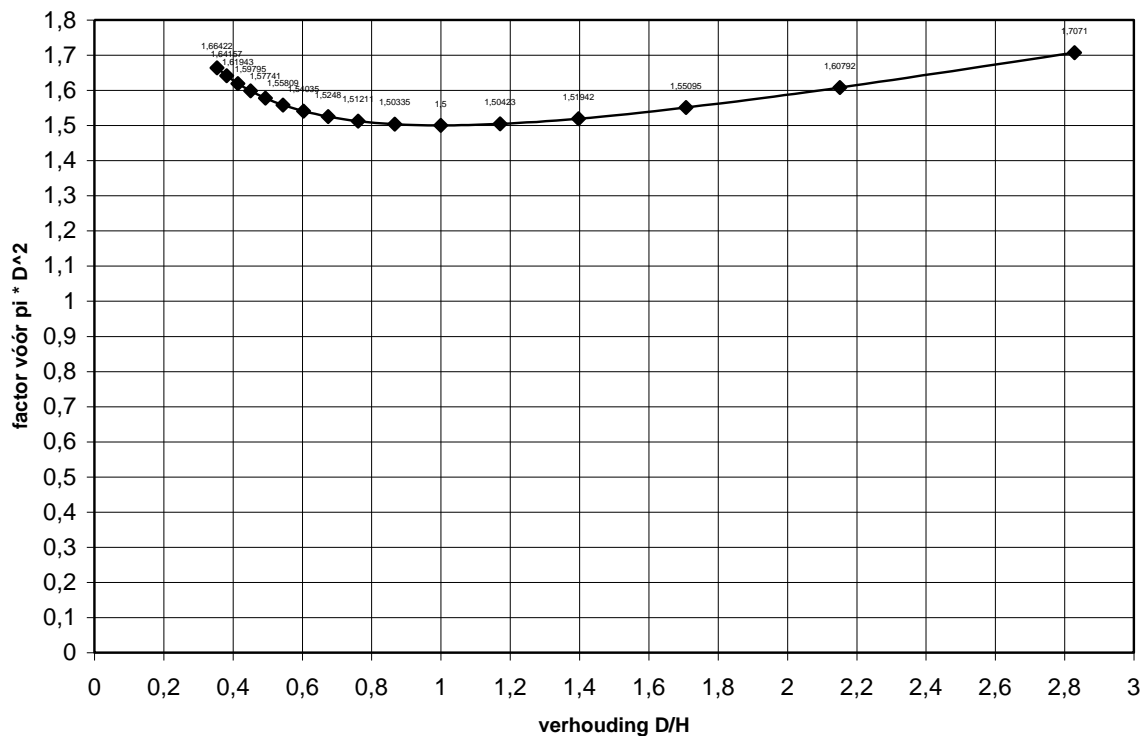
$$A = 1,5 \pi D^2 \quad (\text{m}^2) \quad (4)$$

H en D worden nu zodanig veranderd dat I gelijk blijft aan het volume van een cilinder waarvoor geldt dat $H = D$. Als H met een factor x vergroot wordt dan betekent dit dat D met een factor \sqrt{x} verkleind moet worden. A werd met formule 2 berekend voor een aantal waarden van H oplopend met $0,1 D$. Het resultaat van de berekening staat in tabel 1.

In de laatste kolom van tabel 1 is te zien dat $\pi * D^2$ vermenigvuldigd wordt met een factor die het kleinst is voor $H = D$ en die daarvoor $1,5$ is. Deze factor werd in figuur 1 uitgezet tegen de verhouding D/H . Te zien is dat deze factor sneller toeneemt bij verkleining van de factor D/H dan bij vergroting van de factor D/H . Zelfs bij een factor $D/H = 2,82842$ is de factor nog maar $1,70710$. Dit betekent dat het oppervlak voor een factor $D/H = 2,82842$ maar een factor $1,70710 / 1,5 = 1,13807$ groter is dan voor een vat met gelijke inhoud waarvoor geldt dat $D/H = 1$.

H (m)	D (m)	D/H (-)	I (m ³)	A (m ²)
0,5 D	1,41421 D	2,82842	$\pi/4 * D^3$	$1,70710 * \pi * D^2$
0,6 D	1,29099 D	2,15165	$\pi/4 * D^3$	$1,60792 * \pi * D^2$
0,7 D	1,19523 D	1,70745	$\pi/4 * D^3$	$1,55095 * \pi * D^2$
0,8 D	1,11803 D	1,39754	$\pi/4 * D^3$	$1,51942 * \pi * D^2$
0,9 D	1,05409 D	1,17121	$\pi/4 * D^3$	$1,50423 * \pi * D^2$
D	D	1	$\pi/4 * D^3$	$1,5 * \pi * D^2$
1,1 D	0,95346 D	0,86678	$\pi/4 * D^3$	$1,50335 * \pi * D^2$
1,2 D	0,91287 D	0,76073	$\pi/4 * D^3$	$1,51211 * \pi * D^2$
1,3 D	0,87706 D	0,67446	$\pi/4 * D^3$	$1,52480 * \pi * D^2$
1,4 D	0,84515 D	0,60368	$\pi/4 * D^3$	$1,54035 * \pi * D^2$
1,5 D	0,81650 D	0,54433	$\pi/4 * D^3$	$1,55809 * \pi * D^2$
1,6 D	0,79057 D	0,49411	$\pi/4 * D^3$	$1,57741 * \pi * D^2$
1,7 D	0,76696 D	0,45115	$\pi/4 * D^3$	$1,59795 * \pi * D^2$
1,8 D	0,74536 D	0,41409	$\pi/4 * D^3$	$1,61943 * \pi * D^2$
1,9 D	0,72548 D	0,38183	$\pi/4 * D^3$	$1,64159 * \pi * D^2$
2 D	0,70711 D	0,35356	$\pi/4 * D^3$	$1,66422 * \pi * D^2$

Tabel 1 Variatie van A voor verschillende verhoudingen van D/H



Figuur 1 Factor waarmee de term $\pi * D^2$ in formule 2 voor het oppervlak A vermenigvuldigd wordt voor diverse waarden van de verhouding D/H

In figuur 1 is te zien dat de factor waarmee $\pi * D^2$ vermenigvuldigd wordt maar zeer beperkt toeneemt als de verhouding D / H wat kleiner of wat groter is dan 1. Een vat waarvan de diameter D gelijk is aan de hoogte H heeft het geringste oppervlak bij een bepaalde inhoud. Men mag echter best behoorlijk van de optimale verhouding afwijken zonder dat bij gelijke inhoud het oppervlak sterk toeneemt. Dit is gunstig omdat men bij een optimaal materiaalverbruik van het vat vast niet precies op een verhouding D/H = 1 zal uitkomen.

3 Toepassingen van de warmtebuffer

Op 6-3-2021 heb ik de niet openbare notitie “Ideeën over realisatie van vierendertig bouwpercelen aan de Populierenlaan in Boskant” geschreven. Punt 4 van deze notitie is getiteld “Ideeën over een warmtebuffer met water”. Deze notitie is wel openbaar en te vinden op mijn website onder het menu “No wind energy” (ref. 2). In deze notitie wordt ook uitgegaan van twee blokken van twee huizen die met de achtertuinen aan elkaar grenzen en waarbij een warmtebuffer met water wordt aangebracht op het snijpunt van de perceelgrenzen. In deze notitie wordt er echter vanuit gegaan dat alle warmte opgewekt wordt met zonnepanelen. Daardoor is een erg grote warmtebuffer nodig. Ik heb geschat dat één buffer met een diameter van 7 m en een hoogte van 5 m nodig is voor vier zeer goed geïsoleerde huizen.

In KD 709 (ref. 1) wordt uitgegaan van een windmolen met een rotordiameter van 5 m voor één enkel huis in het buitengebied. Deze VIRYA-5B3 windmolen wordt beschreven in rapport KD 710 (ref. 3). Het idee is nu om een molen met een rotordiameter van 10 m voor vier huizen te gebruiken en die in het midden bovenop de warmtebuffer te zetten en de warmtebuffer te gebruiken als fundering voor de windmolen. De warmtebuffer en de windmolen bevinden zich dus beiden op het snijpunt van de perceelgrenzen van de vier huizen. Deze VIRYA-10 windmolen wordt beschreven in rapport KD 715 (ref. 4).

De zuidkant van het dak van elk huis heeft een oppervlak van 42 m². Op dit dak worden twintig zonnepanelen gelegd van 99 * 165 cm met elk 300 W piek. De sectie A bestaat uit veertien panelen die aan het net gekoppeld zijn met een inverter en de opgewekte energie wordt of zelf gebruikt of teruggeleverd aan het net als er meer opgewekt wordt dan er gebruikt wordt. De sectie B bestaat uit zes panelen die de opgewekte energie rechtstreeks aan de warmtebuffer leveren middels een weerstand die in het water hangt. Alleen als de watertemperatuur hoger zou worden dan 90 °C, dan wordt sectie B ontkoppeld. Ik heb berekend dat zes panelen genoeg zou moeten zijn (de berekeningsmethode wordt gegeven in hoofdstuk 7). Omdat alle huizen dezelfde zonnepanelen hebben en dezelfde stand t.o.v. de zon draagt elk huis dus in gelijke mate bij aan de verwarming van de warmtebuffer.

De windmolen heeft een permanent magneet (PM) generator met een 3-fasenwikkeling die gelijkgericht wordt. Gelijkrichting van een 3-fasen wisselstroom wordt uitgelegd in mijn rapport KD 340 (ref. 5). De gelijkgerichte stroom wordt gevoed naar vier inverters die zo afgesteld zijn dat ieder huis een kwart van de door de windmolen opgewekte energie ontvangt. De energie wordt primair gebruikt voor de aandrijving van de compressor van de warmtepomp die elk huis heeft. Alleen een eventueel overschot wordt aan het net geleverd.

De drie fasen van de generator kunnen in ster of in delta gelijkgericht worden. Het voordeel van ster-schakeling is dat de generator een wat hoger rendement zal hebben omdat er geen hogere harmonische stromen kunnen rondlopen. Het voordeel van delta-schakeling is dat het koppelniveau bij kortsluiting hoger is en dat de generator bij delta-schakeling dus beter als rem gebruikt kan worden om de rotor stil te zetten. Kortsluiting in ster is hetzelfde als kortsluiting in delta wanneer het sterpunt ook kortgesloten wordt maar dit vereist een extra kabel van het sterpunt naar de kortsluitschakelaar, die het best bij de torenvoet kan worden aangebracht.

Zonnepanelen wekken gelijkstroom op maar het is geen probleem om met gelijkstroom een weerstand te belasten. Wel zal de weerstandswaarde zo gekozen moeten worden dat het zonnepaneel voor diverse instralingen van de zonne-energie een zo hoog mogelijke hoeveelheid energie produceert. Wanneer een zonnepaneel aan het net gekoppeld wordt met een inverter, dan bevindt zich in deze inverter een zogenaamde “maximum power point tracker” die er voor zorgt dat de ingangsspanning zodanig gekozen wordt dat het product van spanning en stroom maximaal is.

Bij gebruik van één vaste weerstand als belasting neemt de stroom evenredig toe met de spanning. Men kan dus niet anders optimaliseren dan de weerstand zodanig te kiezen dat bij de gemiddelde warmte-instraling het product van stroom en spanning maximaal is. Maar bij een lagere of een hogere warmte-instraling zal niet precies het maximum te winnen vermogen opgewekt worden.

Ik heb ook overwogen om voor de verwarming van de warmtebuffer geen zonnepanelen met zonnecellen maar zonnecollectoren te gebruiken die direct water verwarmen. Zonnecollectoren hebben een rendement dat ongeveer een factor vier hoger ligt dan dat van zonnecellen maar kunnen bevriezen als zij gewoon water bevatten. Ook kan de warmtebuffer alleen verwarmd worden als de temperatuur van het water in de zonnecollectoren hoger is dan de temperatuur van het water in de warmtebuffer. Daarbij vereisen zonnecollectoren een pomp om het water naar de warmtebuffer te pompen en deze pomp verbruikt elektrische energie. Als het project met het opslaan van warmte zou mislukken dan kan paneel B ook gewoon aan het net gekoppeld worden. Ik heb daarom toch voor zonnepanelen met zonnecellen gekozen.

Als de warmtebuffer als fundering voor de windmolen gebruikt wordt dan moet hij wel zodanig ontworpen worden dat de krachten die de toren daar op uitoefent overgedragen kunnen worden. De windmolen heeft een ongetuide buismast en het is daarom logisch dat zich in het hart van de warmtebuffer een pijp bevindt waar de toren van de molen op bevestigd kan worden. Deze pijp loopt dwars door de warmtebuffer en verbindt de onderkant met de bovenkant. Ik schat dat deze pijp een buitendiameter van ongeveer 35 cm moet hebben. De buis is 6 m lang en steekt 0,3 m boven de bovenkant van het vat uit. De buis is voorzien van gaten en aan de binnenkant van de buis zit dus ook water. Wel is het zo dat er door deze buis wat warmteverlies zal optreden omdat het mij niet mogelijk lijkt om de toren geïsoleerd aan deze buis te bevestigen.

In de notitie over de warmtebuffer van 6-3-2021 (ref. 2) wordt ervan uitgegaan dat het gehele watervat ingegraven wordt in de grond zodat er geen tuinoppervlak verloren gaat. Het is echter de vraag of dit kan. Het is mogelijk dat het grondwater erg hoog staat als het lang achter elkaar geregend heeft. De grond wordt dan een soort drijfzand en de gemiddelde dichtheid van de grond plus het water kan wel hoger zijn dan $2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. Dit houdt in dat het watervat gaat drijven in het drijfzand. Hoe diep het komt te liggen hangt af van het gewicht van het vat en van de molen die er bovenop staat. Een ander nadeel van een diep gat is dat het lastig is om het te maken als het grondwater hoog staat en dat het gat daarom leeggepompt moet worden totdat het watervat geplaatst is.

Voorlopig ga ik ervan uit dat het vat gemaakt wordt van gelaste staalplaat. Het vat moet dan over de weg getransporteerd kunnen worden en dit geeft een maximum voor de diameter of voor de hoogte. Als de hoogte wat groter gekozen wordt dan de diameter dan is de diameter dus bepalend wanneer het vat in de lengterichting op een vrachtwagen vervoerd wordt. Stel we gaan uit van een diameter $D = 4 \text{ m}$ en een hoogte $H = 5,7 \text{ m}$. Dit geeft een volume van ongeveer 72 m^3 . Dit komt neer op ongeveer 18 m^3 per huis.

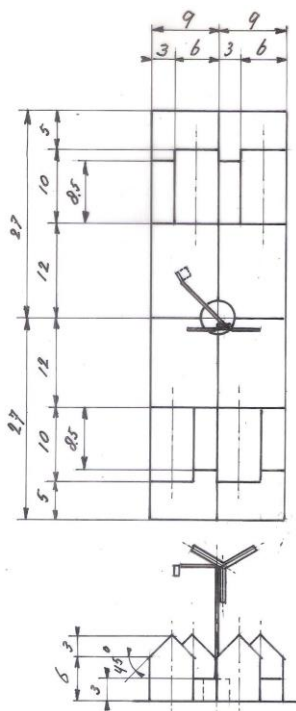
Tot nu toe heb ik het nog niet over de benodigde isolatie gehad. Ik neem aan dat de isolatie 0,3 m dik is en al in de fabriek om het vat wordt aangebracht. Het moet wel een isolatie zijn met een behoorlijke stijfheid omdat er vanwege de windmolen toch behoorlijke krachten op uitgeoefend worden. Het vat krijgt een totale diameter van 4,6 m en een totale hoogte van 6,3 m. Ik neem aan dat een dergelijk vat nog als speciaal transport over de weg getransporteerd kan worden. Omdat de pijp waar de windmolen op komt te staan 0,3 m boven de bovenkant van het vat uitsteekt valt een 0,3 m dikke isolatie dus samen met de bovenkant van de pijp. Stel nu eens dat het vat 3,3 m ingegraven wordt. Het steekt dan 3 m boven de grond uit en de vier huizen hebben dan in de achtertuin een pilaar staan met een diameter van 4,6 m en een hoogte van 3 m waar de windmolen bovenop staat. Dit lijkt me nog wel acceptabel.

4 Beschrijving van de windmolen

Stel dat de windmolen een toren heeft met een hoogte van 15 m. Inclusief de hoogte van het vat ligt het hart van de rotor dan op een hoogte van ongeveer 18 m. Bij een rotordiameter van 10 m komt de rotor op het hoogste punt op een hoogte van 23 m en op het laagste punt op een hoogte van 13 m. De huizen hebben een nokhoogte van 9 m en de onderkant van de rotor ligt dan 4 m boven de bovenkant van de huizen. Ik denk dat dit genoeg is om geen last te hebben van wervels die van de nok van de huizen afkomen. Men zal er wel voor moeten zorgen dat er in de directe omgeving geen bomen of ander gebouwen staan die hoger zijn dan 9 m. Als de achtertuin 12 m lang is dan bevindt de onderkant van de wiektip zich op een afstand van ongeveer 17 m vanaf de achterdeur. Op deze afstand zal een goed ontworpen rotor die juist belast wordt maar weinig geluid produceren.

De molen heeft een 3-bladige rotor met houten bladen en een ontwerpsnellopendheid van 6 waardoor de geluidsproductie gering is. Omdat het rotoroppervlak vier maal zo groot is als dat van de VIRYA-5B3 geldt de P_{el} -V kromme van de VIRYA-5B3 ongeveer voor de opbrengst van de VIRYA-10 voor één huis. De VIRYA-10 wordt beschreven in rapport KD 715 (ref. 4). De molen zou dezelfde beproefde kantelbare zijvaan beveiliging kunnen hebben als toegepast wordt in al mijn andere VIRYA windmolens maar er werd uiteindelijk gekozen voor het “pendulum safety system with a torsion spring” zoals beschreven wordt in rapport KD 439 (ref. 6). Dit laatste systeem geeft een strakkere begrenzing van het maximale toerental dan de kantelbare zijvaan beveiliging.

Er wordt een direct drive axial flux generator van Hefei Top Grand type TGET770-H-10KW-100R toegepast. De generator karakteristieken worden afgeleid in KD 715 (ref. 4). Ik ga de molen niet helemaal uittekenen en een prototype bouwen en daar zal dus een andere partij voor gevonden moeten worden. Een schets van de vier door garages geschakelde vrijstaande huizen, de warmtebuffer en de windmolen wordt gegeven in figuur 2. In deze schets wordt nog de kantelbare zijvaan beveiliging toegepast en met het pendulum safety system ziet de molen er dus anders uit omdat de rotor niet excentrisch is opgesteld en een dubbele vaan gebruikt wordt.



Figuur 2 Schets van de vier huizen, de warmtebuffer en de windmolen

5 Bepaling van de warmte-inhoud van het buffervat en de ontladtijd

Water heeft een soortelijke warmte van ongeveer $4200 \text{ kJ/m}^3\text{°C}$. Voorlopig wordt er vanuit gegaan dat de maximale watertemperatuur 90 °C is en dat het water gebruikt wordt voor een vloerverwarming met een vloertemperatuur van 30 °C . Wanneer elk huis van het watervat 18 m^3 gebruikt, dan heeft dit volume een warmte-inhoud van $18 * 60 * 4200 = 4536000 \text{ kJ}$. Hoewel de warmtebuffer zelf zeer goed geïsoleerd is verliest hij zelf echter ook warmte. Voorlopig wordt aangenomen dat het rendement 90% is gedurende de drie wintermaanden en dat dus een hoeveelheid energie van $0,9 * 4536000 = 4082400 \text{ kJ}$ per huis beschikbaar is.

Hoe lang men aan de warmtebuffer energie kan onttrekken totdat de temperatuur gedaald is van 90 °C tot 30 °C hangt af van het warmteverlies van het huis en dit hangt weer af van het temperatuursverschil tussen binnen en buiten, van het koude oppervlak van het huis en van de mate waarin het huis geïsoleerd is. Het zal duidelijk zijn dat de buffer sneller uitgeput is als er alleen maar energie aan onttrokken wordt dan wanneer er ook telkens energie aan toegevoerd wordt door de zonnepanelen en de windmolen. Het is niet zo moeilijk om te bepalen hoe lang het duurt voordat een vol buffervat leeg is als er tussentijds geen energie aan toegevoegd wordt. Hiervoor moeten wel aannames gedaan worden voor de huizen die toegepast worden.

De percelen zijn 9 m breed en 27 m lang. Het stuk grond dat nodig is voor vier huizen is dus 18 m breed en 54 m lang. De huizen zijn 6 m breed en 10 m diep. De huizen zijn aan elkaar geschakeld met garages die 3 m breed en $8,5 \text{ m}$ diep zijn. De achterkant van de garage valt samen met de achterkant van het huis. De voortuin is 5 m diep en de achtertuin is daardoor 9 m breed en 12 m diep wat toch niet onaardig is voor een nieuwbouwhuis.

De zijmuren zijn 6 m hoog en de garage is 3 m hoog. Het dak heeft een dakhoeck van 45° met de horizon en de totale hoogte van het huis is daardoor 9 m . Het oppervlak van de voor- en de achtergevel samen is $2 (6 * 6 + 1/4 * 6 * 6) = 90 \text{ m}^2$. Het oppervlak van de twee zijmuren is $2 * 6 * 10 = 120 \text{ m}^2$. Voor de middelste huizen uit een rij zitten er echter aan weerskanten garages met een oppervlak van $8,5 * 3 = 25,5 \text{ m}^2$. De garages zijn ook goed geïsoleerd en de temperatuur zal daardoor veel hoger zijn dan de buitentemperatuur. De buitenste huizen uit een rij hebben maar een garage aan één kant. Stel nu dat de garages een verlaging van het oppervlak van de zijmuren geven van 120 m^2 naar 100 m^2 . Eén zijde van het dak heeft een schuine breedte van $3 * \sqrt{2} = 4,2 \text{ m}$. Beide kanten van het dak hebben dan samen een oppervlak van $2 * 4,2 * 10 = 84 \text{ m}^2$. Voor het totale koude oppervlak van het huis A geldt dan dat $A = 90 + 120 + 84 = 294 \text{ m}^2$.

De warmtestroom Q_w (W) van het huis kan berekend worden m.b.v. formules die in Wikipedia gegeven worden onder de kop "U-waarde". Er geldt dat:

$$Q_w = A * \Delta T / R_w \quad (\text{W}) \quad (5)$$

ΔT is het temperatuurverschil tussen binnen en buiten in $^\circ\text{C}$ of $^\circ\text{K}$. R_w is de warmteweerstand in $\text{m}^2 \cdot \text{°K/W}$. De warmteweerstand is de som van de warmteweerstanden van de delen waar de muur uit bestaat vermeerderd met een kleine waarde voor de grenslaag aan de binnen en de buitenkant van de muur. Aangenomen wordt dat het huis voorzien wordt van driedubbele beglazing en dat een gemiddelde warmteweerstand voor alle buitenvlakken van 4 gehaald wordt. Het huis heeft een warmtepomp en alleen vloerverwarming op de begane grond en aangenomen wordt dat de kamertemperatuur beneden 20 °C is. Aangenomen wordt dat de kamertemperatuur op de 1^e verdieping 18 °C is en op de zolder 16 °C is. De gemiddelde binnentemperatuur is dan 18 °C . Aangenomen wordt dat de gemiddelde buitentemperatuur in de winter 0 °C is. Het temperatuurverschil ΔT is dan 18 °C . Invulling van deze waarden in formule 5 geeft dan dat $Q_w = 294 * 18 / 4 = 1323 \text{ W}$.

Er zal ook warmteverlies door de vloer optreden. De vloer is voorzien van een kruipruimte en zeer goede isolatie onder de vloerverwarming met een R_w van 4 .

Aangenomen wordt dat de temperatuur van de vloer 28°C is en dat de temperatuur van de lucht in de kruipruimte 13°C is. Dus $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$. Het oppervlak van de vloer is $6 * 10 = 60\text{ m}^2$. Invulling van deze waarden in formule 5 geeft dat $Q_w = 60 * 15 / 4 = 225\text{ W}$. De totale warmtestroom is dus $1323 + 225 = 1548\text{ W}$.

Aangenomen wordt dat het huis voorzien is van geforceerde ventilatie met terugwinning van de retourwarmte en dat hier ook nog eens 252 W verloren gaat. Het totale warmteverlies is dan ongeveer 1800 W . Dit geeft per dag een warmteverlies van $1800 * 3600 * 24 = 155520000\text{ J} = 155520\text{ kJ}$.

Eerder werd berekend dat de nuttige warmte-inhoud van de warmtebuffer per huis 4082400 kJ is. Er kan dus continu 1800 W aan deze warmtebuffer onttrokken worden gedurende $4082400 / 155520 = 26,25$ dagen of te wel wat minder dan een maand als er gedurende die tijd helemaal geen energie aan de warmtebuffer wordt toegevoegd. Dit is helemaal niet gek.

De windmolen en het zonnepaneel A zullen samen energie opwekken die voor het grootste deel gebruikt zal worden voor de warmtepomp. Als de warmtepomp een COP van 4 heeft, dan zal bij een warmteverlies van het huis van 1800 W maar een elektrisch vermogen van 450 W nodig zijn. De windmolen zal dit vermogen bij een matige wind al gemakkelijk alleen kunnen leveren waardoor er vaak energie over zal zijn die teruggeleverd wordt aan het net. Maar als er geen wind en geen zon is dan moet de energie aan de warmtebuffer onttrokken worden.

De temperatuur van de warmtebuffer hangt af van de hoeveelheid energie die hij bevat en varieert tussen de 90°C en de 30°C . Voor een kamertemperatuur van 20°C van de benedenverdieping zal de temperatuur van de vloer tussen ongeveer 25°C en 30°C liggen afhankelijk van de buitentemperatuur. Als de kamertemperatuur te laag dreigt te worden en er geen zon of wind is dan moet de warmtebuffer ingeschakeld worden. Hiervoor is een warmtewisselaar met pomp nodig tussen het water dat vanaf de warmtebuffer komt en het water dat door de vloerverwarming stroomt. De snelheid waarmee het water stroomt dat van de warmtebuffer komt en het tijdsinterval waarin het water stroomt, bepalen hoeveel warmte er overgedragen wordt. Ik denk dat dit kan werken als het goed gedimensioneerd is maar dit is mijn vak niet en iemand anders moet dit aspect eens goed bekijken. Ook is het nodig dat een deskundige controleert of paneel B groot genoeg is om de warmtebuffer aan het begin van de winter vol te krijgen. Zo nodig, kan de verhouding tussen paneel A en B veranderd worden.

De windsnelheden worden normaal gemeten op een hoogte van 10 m maar zijn op een hoogte van 18 m aanzienlijk hoger. Windsnelheden worden normaal ook gemiddeld over een heel jaar en door de lage windsnelheden in de zomer wordt het gemiddelde behoorlijk gedrukt. Men moet eigenlijk gebruik maken van de gemiddelde windsnelheid over december, januari en februari. Stel nu eens dat de gemiddelde windsnelheid in een bepaald gebied op 10 m hoogte in de winter 4 m/s is. Het lijkt dan zeker toegestaan om voor een hoogte van 18 m , de P_e -V kromme af te lezen bij 5 m/s .

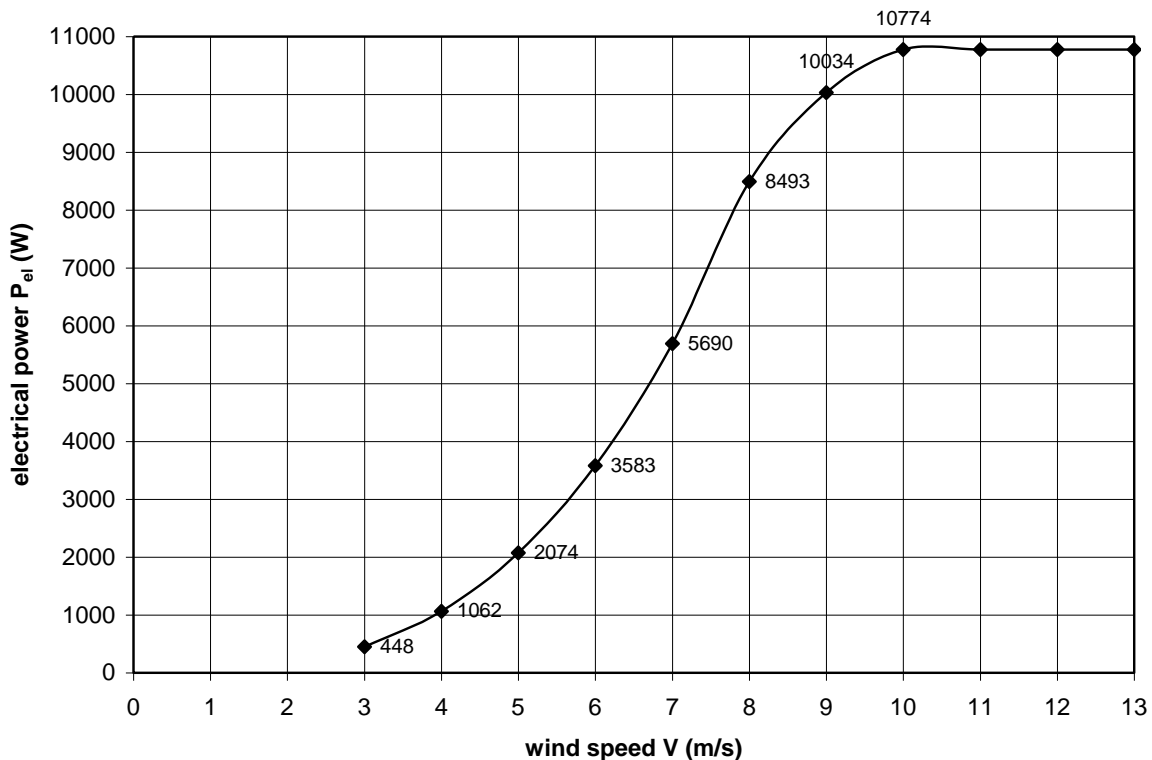
De door mij uitgevoerde berekeningen van de energieopbrengst en het warmteverlies zijn erg grof en het lijkt nodig om de aannames te verifiëren en nauwkeurigere berekeningen uit te voeren. Dat zal iemand anders moeten doen maar ik denk dat ik aardig in de buurt zit. Uiteindelijk zal het nodig zijn om een proefopstelling te bouwen met vier goed geïsoleerde huizen met voldoende grote zonnepanelen, één warmtebuffer en één windmolen om aan te tonen dat het idee ook werkelijk werkt en dat de benodigde investeringen acceptabel zijn. Een eerste prototype is altijd veel duurder dan seriefabricage en daar zal dus subsidie voor nodig zijn. Maar grootschalige toepassing is alleen zinnig als de investering ook zonder subsidie binnen een jaar of zes is terugverdiend.

Men zou voor een prototype zelfs kunnen overwegen om maar één huis te bouwen met een warmtebuffer van 18 m^3 en een wat dikkere isolatie toe te passen om het relatief grotere warmteverlies te compenseren. In dit geval kan bij dit huis de VIRYA-5B3 windmolen geplaatst worden omdat de opbrengst daarvan ongeveer een kwart is van de VIRYA-10.

6 Gebruik van de VIRYA 10

In rapport KD 715 (ref. 6) wordt de 3-bladige VIRYA-10 rotor beschreven die uitgevoerd is met het pendulum beveiligingssysteem met een trosieveer. Deze beveiliging wordt aangestuurd door de rotothrust en de kop draait uit de wind om een horizontale as. Dit mechanisme wordt beschreven in KD 439 (ref. 5). De rotor wordt in de wind gericht met een dubbele vaan.

In figuur 7 van KD 715 wordt de P_{el} -V kromme van de VIRYA-10 gegeven. Deze figuur werd gekopieerd als figuur 3.



Figuur 3 P_{el} -V kromme van de VIRYA-10 voor een inverterbelasting zodanig dat de optimale derdemachtskromme gevolgd wordt voor $3 \text{ m/s} < V < 10 \text{ m/s}$ en voor hogere windsnelheden het vermogen constant blijft.

Aangenomen wordt dat de gemiddelde windsnelheid op 10 m hoogte in de winter 4 m/s is en dat de P_{el} -V kromme i.v.m. de fluctuatie van de windsnelheid en i.v.m. een torenhoogte van 18 m afgelezen mag worden voor een windsnelheid van 5 m/s. Afgelezen kan dan worden dat $P_{el} = 2074 \text{ W}$. Dit vermogen moet dan met vier huizen gedeeld worden wat inhoudt dat elk huis ongeveer 520 W ontvangt. Dit is al 70 W meer dan het gemiddelde verbruik van de warmtepomp, wat aangeeft dat er bij een matige wind maar een beperkt beroep gedaan wordt op de warmtebuffer zelfs als het zonnepaneel A helemaal niets bijdraagt aan het net.

7 Controle van het rendement van de warmtebuffer

Tot nu toe werd aangenomen dat het rendement van de warmtebuffer ongeveer 80 % is voor de negen zomermaanden en dat dit gerealiseerd kan worden met een 0,3 m dikke isolatielaag. Het is goed om na te gaan of dit een redelijke aanname is.

In hoofdstuk 5 werd berekend dat de warmte-inhoud voor een kwart van het vat $4,536 \cdot 10^6 \text{ kJ}$ is. Voor het gehele vat is het dus $4 \cdot 4,536 \cdot 10^6 = 1,814 \cdot 10^7 \text{ kJ}$. Het vat heeft een diameter $D = 4 \text{ m}$ en een hoogte $H = 5,7 \text{ m}$. Invulling van deze waarden in formule 2 geeft dat $A = 97 \text{ m}^2$.

Aangenomen wordt dat gedurende de negen maanden maart t/m november de gemiddelde temperatuur van de omgeving $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ is. Aangenomen wordt dat de temperatuur van het water in het vat $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ is aan het begin van de negen maanden en $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ is aan het eind van de negen maanden. Het temperatuurverschil ΔT is dan $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ aan het begin van de negen maanden en $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ aan het eind van de negen maanden. Het warmteverlies Q_w is evenredig met ΔT (zie formule 5) en het zal dus toenemen naarmate de zomer vordert. Stel dat we mogen rekenen met een gemiddelde ΔT van $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Q_w is omgekeerd evenredig met de warmte weerstand R_w die gegeven wordt door:

$$R_w = d / \lambda \quad (6)$$

Hierin is d de dikte van de isolatielaag in m en λ de thermische geleidbaarheid van de isolatie in $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{K}$. Stel we kiezen $d = 0,3\text{ m}$. Stel we kiezen voor polystyreen met een λ van ongeveer $0,04$. Invulling van deze waarden in formule 6 geeft dat $R_w = 7,5$. Invulling van $A = 97\text{ m}^2$, $\Delta T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $R_w = 7,5$ in formule 5 geeft dat $Q_w = 776\text{ W}$. Dit is nogal wat.

De hoeveelheid energie E die over negen maanden verloren gaat is dan:

$$E = 3600 * 24 * \frac{3}{4} * 365 * 776 = 1,8354 * 10^{10}\text{ J} = 1,8354 * 10^7\text{ kJ}$$

Dit is van dezelfde orde grootte als de energie-inhoud van het vat en het vat kan met deze aannames dus nooit een rendement van 80% hebben! Als men de dubbele hoeveelheid warmte zou toevoeren als de energie-inhoud, dan heeft het vat nog maar een rendement van 50% maar dan is het wel vol aan het begin van de winter. Als een rendement van 50% geaccepteerd zou worden, dan moet dus veel meer warmte worden toegevoerd dan oorspronkelijk werd aangenomen. Daarvoor moet de sectie B uit minstens 10 zonnepanelen bestaan als de warmtebuffer aan het begin van de winter vol moet zijn. Men kan er eventueel voor kiezen om de windmolen ook te laten bijdragen aan het opwarmen van de warmtebuffer door het vermogen boven een bepaalde waarde af te tappen. Maar dit vereist een speciale regelaar en een extra verwarmingselement in de warmtebuffer.

Om een hoger rendement te krijgen moet of de isolatielaag dikker worden of moet een isolatiemateriaal gebruikt worden met een veel lagere λ maar ik betwijfel of die bestaat en als hij zou bestaan of hij dan voldoende stijf is. Eigenlijk wordt door het lage rendement het hele idee om 's zomerse zonne-energie met een warmtebuffer op te slaan voor de winter toch minder aantrekkelijk.

Men zou ook de bijdrage van zonnepanelen aan de verwarming van het reservoir in de zomer helemaal kunnen schrappen en alle 20 zonnepanelen dus rechtstreeks aan het net kunnen koppelen. De verwarming van het reservoir wordt dan geheel door de windmolen verzorgd. De windmolen is wel netgekoppeld maar er wordt niet teruggeleverd aan het net zolang de watertemperatuur in het reservoir onder een bepaalde waarde ligt. Omdat de opbrengst van een windmolen veel beter in de pas loopt met de warmtebehoefte in de winter, wordt het reservoir dan niet gebruikt om energie voor ongeveer een half jaar op te slaan maar alleen om 's winters de sterke energiefluctuaties van de windmolen en de zonnepanelen op te vangen. Het reservoir kan dan een stuk kleiner zijn waardoor het veel sneller op temperatuur is en het warmteverlies over een paar dagen ook veel kleiner is.

Er zijn diverse manieren mogelijk om de vloerverwarming die bij een dergelijk systeem hoort uit te voeren. Als de windmolen en de zonnepanelen beiden netgekoppeld zijn dan wordt het water in het reservoir alleen verwarmd als de watertemperatuur in het reservoir onder een bepaalde waarde komt. Teruglevering aan het net gaat dus voor. Maar het kan zijn dat niet teruggeleverd mag worden omdat de netspanning te hoog is. In dit geval wordt het reservoir verwarmd en gaat er dus toch geen energie verloren. Bij een dergelijk systeem moet er dus wel een dubbele verwarming zijn. Er is vloerverwarming met water dat door de warmtepomp geleverd wordt maar ook een aparte vloerverwarming met water dat uit het reservoir komt. De watersnelheid van het water uit het reservoir moet zodanig geregeld worden dat voor elke watertemperatuur toch de juiste hoeveelheid warmte afgegeven wordt.

Men kan er ook voor kiezen om al het warme water dat door de warmtepomp geleverd wordt eerst op te slaan in het reservoir en voor de vloerverwarming alleen water uit het reservoir te gebruiken. Men kan er voor kiezen om dit alleen te doen wanneer de terugleververgoeding erg laag is of wanneer er wegens een te hoge netspanning helemaal niet teruggeleverd mag worden.

Men kan er ook voor kiezen om de windmolen niet netgekoppeld te maken en de opgewekte elektrische energie direct in het reservoir om te zetten in warmte. Het nadeel hiervan is dat men geen vermenigvuldiging met ongeveer een factor vier krijgt vanwege de COP van de warmtepomp. Het voordeel is dat het systeem nu onafhankelijk van het net kan functioneren en dat de verwarming niet uit valt als het net uitvalt (tenminste, als het net niet nodig is voor de regeling van de pompen die het water door de vloerverwarming sturen). Als het reservoir vooral gebruikt wordt om de energiefunctuaties van de windmolen in de winter op te vangen is een veel kleiner reservoir nodig dan bij 's zomers opgewekte zonne-energie. Er zijn wel nieuwe berekeningen nodig van het volume en de isolatie van het reservoir.

In rapport KD 738 (ref. 7) wordt de 3-bladige VIRYA-6 windmolen beschreven. Deze molen is net als de VIRYA-10, voorzien van het "pendulum safety system with a torsion spring". Deze molen lijkt groot genoeg om de woonkamer van een enkel huis in het buitengebied te verwarmen met drie weerstanden in een waterreservoir.

8 Referenties

- 1 Kragten A. Opwekking van warmte met een windmolen in het buitengebied, januari 2021, herzien september 2022, gratis openbaar rapport KD 709, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 2 Kragten A. Ideeën over een warmtebuffer met water, 6-3-2021. Deze notitie is te vinden onder het menu "No wind energy" op mijn website.
- 3 Kragten A. Calculations executed for the 3-bladed rotor of the VIRYA-5B3 windmill ($\lambda_d = 6$) meant for connection to the axial flux generator of Hefei Top Grand type TGET450-5KW-300R for grid connection, januari 2021, herzien oktober 2021, gratis openbaar rapport KD 710, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 4 Kragten A. Calculations executed for the 3-bladed rotor of the VIRYA-10 windmill ($\lambda_d = 6$) with the pendulum safety system with a torsion spring connected to the generator type TGET770-H-10KW-100R for grid connection, april 2021, herzien september 2022, openbaar rapport KD 715, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 5 Kragten A. Rectification of 3-phase VIRYA windmill generators, mei 2007, herzien januari 2022, gratis openbaar rapport KD 340, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 6 Kragten A. Development of a pendulum safety system with a torsion spring and $e = 0.2 R$, maart 2010, herzien juni 2021, gratis openbaar rapport KD 439, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.
- 7 Kragten A. Calculations executed for the 3-bladed rotor of the VIRYA-6 windmill ($\lambda_d = 6$) with the pendulum safety system with a torsion spring connected to the generator type TGET620-5KW-200R for grid connection or heat generation, oktober 2022, gratis openbaar rapport KD 738, ontwerpbureau Kragten Design, Populierenlaan 51, 5492 SG Sint-Oedenrode, Nederland.