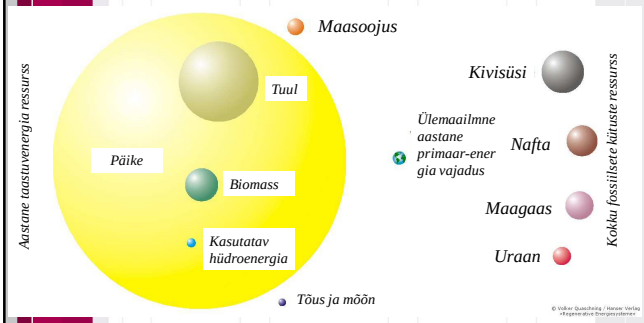
Päikeseenergeetika, põhialused

Argo Rosin, D.Sc.Eng
Energeetikateaduskond
Tallinna Tehnikaülikool

Energiapall. Aastane päikesekiirgus ületab energiatarbe ja –reservid ühekordselt [1]



Päikesekiirgus

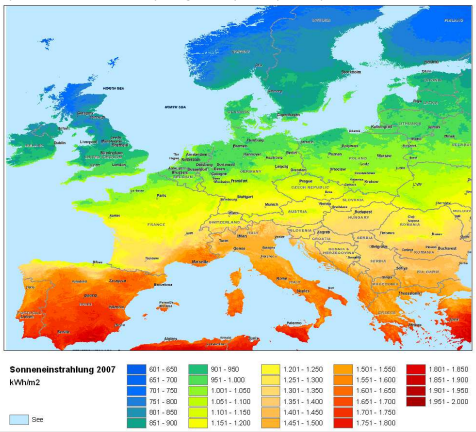
- Sahhara kõrbes on keskmine aastane kiirgus 2350 kWh/m^2, so üle 2 korra rohkem kui Saksamaal.
- Summaarne kiirgus 8,7 milj. km^2 Sahhara kõrbe kohta ületab 200 korda maakera primaarenergiavajaduse.
- Seega teoreetiliselt 48 500 km^2 suurune maaala saab päikeselt sama suure energiakoguse kui täna maailmas inimkond energiat tarbib.

Päikese kõrgus ja selle mõju kiirgusnäitajatele

Päikese kõrgus, kraadides	Õhu massi kordaja	Kiirguse vähenemine, %
90	1	17,3…38,5
60	1,15	19,4…42,8
30	2	28,8…59,1
10	5,76	51,8…85,4
5	11,5	65,1…93,8

Päikesekiirguse kaart

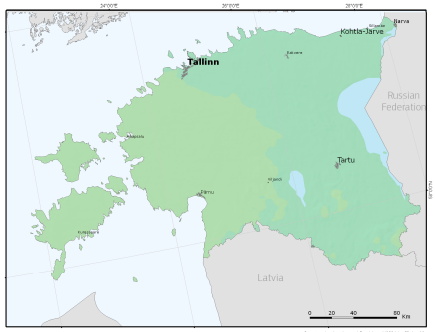
http://www.focussolar.de/Maps/RegionalMaps/Europe/Europe



Global irradiation and solar electricity potential

Optimally-inclined photovoltaic modules

ESTONIA / EESTI



Yearly sum of global irradiation [kWh/m²] 1100 1200

825 900

Yearly sum of solar electricity generated by 1kWp system with performance ratio 0.75 [kWh/kWp]

Urban area

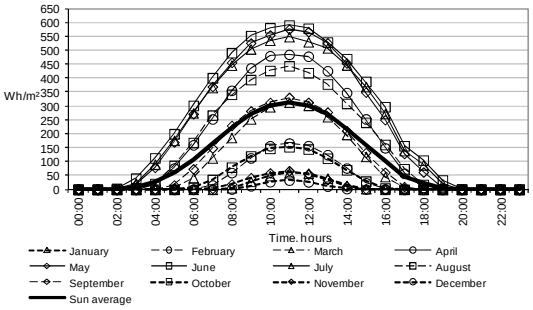
Water body

Projection: Lambert Azimuthal Equal Area, WGS84, lat 52° lon 10°

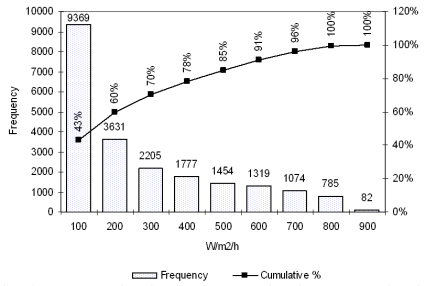
Source of ancillary data: CORINE Land Cover
DTM SRTM-30
Global Lakes and Wetlands Database
Geonames
Natural Earth

http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_cmsaf_opt/G_opt_EE.png

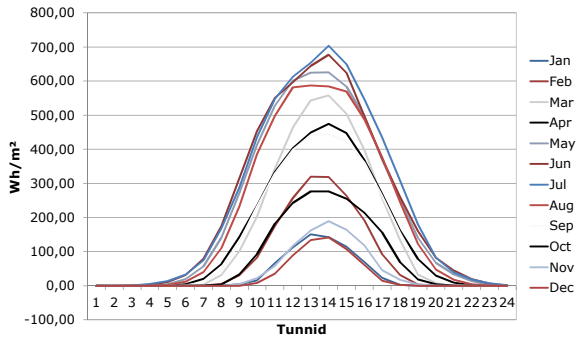
Keskmine päevane kiirgus kuus horisontaalpinnale (Harku 2005-2009) [3]



Päikesekiirguse esinemissagedus (Harku 2005-2009) [3]



Keskmine päevane kiirgus kuus 45 kraadisele pinnale (Harku 2005-2009)



Kiirgused hoone tasapindadele

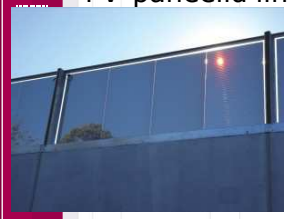
Hoone tasapinna suund ja kalle	Peegel-dunud kiirgus aastas	Hajus-kiirgus aastas	Otsene kiirgus aastas	**Sum. kiirgus arvutatud näidisaasta põhjal**	**Sum. kiirgus arvutatud PVGIS andmete põhjal**	**Erinevus**
kraadides	kWh/m²	kWh/m²	kWh/m²	**kWh/m²**	**kWh/m²**	**%**
E 90°	94,39	273,02	229,82	**597,23**	**632**	**5,82%**
S 90°	94,39	353,99	423,01	**871,39**	**837**	**-3,95%**
W 90°	94,39	316,72	282,56	**693,67**	**631**	**-9,03%**
S 0°	0,00	513,84	429,79	**943,63**	**957**	**1,42%**
S 45°	28	531	592	**1151**	**1140**	**-0,96%**
N 90°	94,39	217,89	34,31	**346,59**	**280**	**-19,21%**

PV-paneelid

PV-paneelide eelised ja puudused

- Tootmine langeb kokku büroohoonete, turismitalude jm sarnase tarbimismustriga hoonete tarbimisega
- PV-süsteem silub tarbimise tipud
- Talvel ja suvel energia tootlikkuses sõltuvalt kaldenurgast ja päikese järgitavusest 20…50 kordne vahe
- Suvine soojus suurendab ja talvine jahedus vähendab kadusid,
- Väikese kaldenurgaga paneelidel talvine hoolduskulu suurem ja energiatootlikkus väikesem
- Eestis hajutatud kiirguse osakaal suur – järgivajamite tasuvus küsitav
- Kasutegurid vahemikus 5…20%

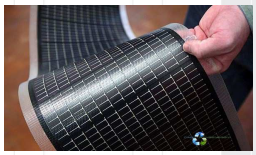
PV-paneelid linnas



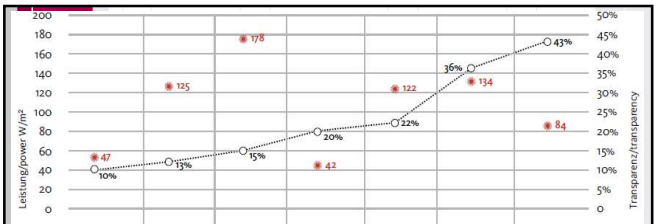
http://www.solardaily.com/reports/SolarWorld_Taps_Polycrystalline_Tech_To_Expand_US_Output_Of_Solar_Panels_999.html

http://www.polysolar.co.uk/product.php

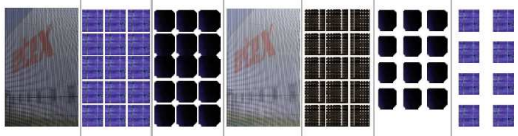
http://www.horizonrenewables.co.uk/solar-photovoltaics/solar-pv-technology.html



http://www.caretransenergy.com/product/thin-films-solar-pv-panels/



http://ertex-solar.at/cms/images/stories/ertexfile/Transparenz.pdf



aSi Dünnschicht aSi thin film THRU®	Polykristallin Polycrystalline	Monokristallin hoch effizient Monocrystalline high efficient	aSi Dünnschicht aSi thin film THRU®	Monokristallin semi-transparent Monocrystalline semi transparent	Monokristallin hoch effizient Monocrystalline high efficient	Polykristallin Polycrystalline
10 % Transparenz 10 % transparency	5 mm Abstand 5 mm Distance	3 mm Abstand 3 mm Distance	20 % Transparenz 20 % transparency	5 mm Abstand 5 mm Distance	25 mm Abstand 25 mm Distance	50 mm Abstand 50 mm Distance

PV-paneelide kasutegur [1]

Elemendi / Moodulitüüp	Element, labor η_{max}, %	Element, sari η_{max}, %	Moodul, sari η_{max}, %	Moodul, sari FF (bulk factor, füllfaktor)
Mono-Si	24,7	22,0	19,3	0,80
Poly-Si	20,3	17,4	15,2	0,75
SR-Si	17,8	15,0	13,0	0,73
EFG-Si	18,2	14,4	12,8	0,72
HIT	22,3	19,3	17,2	0,75
µc-Si / a-Si	11,0	9,0	8,5	0,66
a-Si	12,1	6,8	6,6	0,57
CdS / CdTe	16,5	12,0	11,1	0,69
CIS / CIGS	20,0	11,6	11,0	0,73
Kontsentraator (triple)	41,1	36,5	27,0	0,77

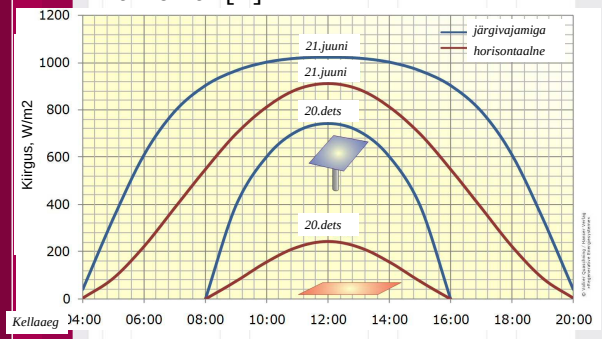
Päikesepaneelide võrdlemine

Tootja		SOLAR-WORLD	SCHOTT	Würth **WS 11007/80**	Avancis	Schott
Seadme tüüp		Mono-Si	Poly-Si	CIS	CIS	a-Si
MPP Võimsus	Wp	235	235	80	120	100
Avatud ahela pinge U_{OC}	V	37,5	37,1	45,5	59,7	23,8
Pinge U_{MPP}	V	30,3	30,2	36	43,1	17,5
Lühsvool I_{SC}	A	8,19	8,42	2,5	3,18	6,79
Vool I_{MPP}	A	7,77	7,78	2,22	2,79	5,71
MPP-võimsus ruutmeetri kohta	**Wp/ m²**	**140,16**	**140,45**	**109,74**	**109,99**	**69,00**
Kasutegur	**%**	**14,02**	**14,04**	**10,97**	**11,00**	**6,90**
Maksimaalne süsteemi pinge SC II	V	1000	600	-	1000	1000
Maksimaalne vastuvool	A	16	15	-	5	15
Lumekoormus IEC61215	kg/m²	540	366[2]	240	551	245
Võimsuse temp. koef.α_P	%/°C	0,45	0,44	0,36	0,5	0,2
NOCT	°C	47	45,5	47	39,3	-
Töötemperatuur	°C	-	-40...+85	-40...+85	-	-40...+85
PV-elementide arv mooduli kohta		60	60	-	-	58
Möödavirk (bypass) dioodide arv		3	3	-	-	-
Pindala	m²	1,677	1,673	0,729	1,091	1,449
Garantii	a	25	25	-	20	20
Kaal	kg	21,2	23	12,7	19,6	18
Hind	€	436	342	287	182	108

Päikese järgimisest ja paneelide kaldest saadav võit

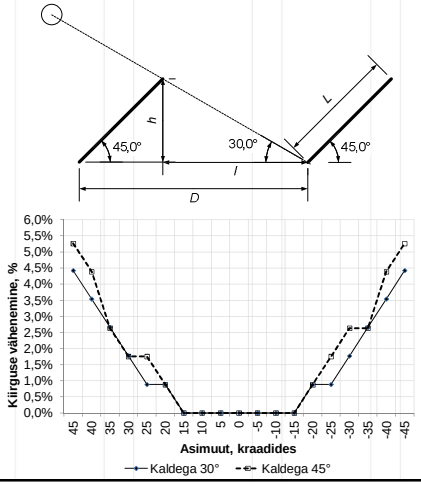
- Suvel kuni 50% ja talvel kuni 300%. Absoluutväärtustes on suvine võit suurem
- Kesk-Euroopa laiuskraadidel on PV-paneelidel kaheteljelise järgivajamiga saadav võit kuni 30% ning üheteljelise järgivajamiga 20%
- Kesk-Euroopa laiuskraadidel on terve aasta kasutatavatel statsionaarsete PV-paneelide kalle 30° suunaga lõunasse. Suvel 10°...20°, talvel 60°...70°. Lähtudes tootlikkusest on soovituslik kalle Eestis ca 40°.
- Optimaalseim pinnaühiku kasutus oleks siis kui paneelid paigaldatakse kaldega 30°.
- Suurema kiirgusega regioonides on paneelide kallutamise mõju oluliselt väiksem kui väiksema kiirgusega regioonides

Kiirgustugevuse erinevus horisontaalsete ja järgivajamiga paneelide puhul 50 laiuskraadil pilvitu ilma korral [1]



Paneelide kalde ja asimuudi mõju tootlikkusele

- Tootlikkus võrreldes 40 kraadise kaldega paneelidega väheneb ligikaudu 1%, kuid kasutatav pind suureneb 5 % võrra, mistõttu suurema arvu paneelide installeerimisest tulenev summaarne aastane tootlikkus suureneb teoreetiliselt 10%.
- Paneelide paigaldusel kaldega 30º tuleb arvestada mustumisest tingitud kadudega 2...10%, väiksema kaldega paigaldamisel suurenevad mustumisest tingitud kaod märgatavalt
- Päikesekiirgus pinnaühikule ei muutu kui PV-paneele pöörata lääne või ida suunal 15 kraadi.
- Kui paneelid on pööratud lõuna suhtes 15...25 kraadi, siis toob see kaasa ca 1% päikesekiirguse languse pinnaühikule sh ka samaväärse tootlikkuse languse.



Maaala efektiivne kasutamine

- Tihti aetakse segamini maaala täituvuse hindamine ja efektiivne kasutamine
- Esimesel juhul hinnatakse kui suur osa maaalast jääb päikesepaneelide alla ehk lihtsustatult (D-l)/D
- teisel juhul hinnatakse päikesepaneelide pindala ja maaala suuruse suhet ehk lihtsustatult L/D

Maaala efektiivne kasutamine

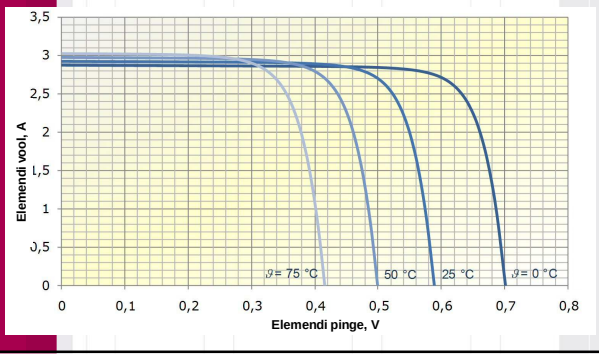
Päikese kõrgus	Paneeli kaldenurk									
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
10 (dets)	51%	41%	35%	30%	27%	25%	23%	21%	20%	19%
15	61%	52%	45%	40%	37%	34%	32%	30%	29%	28%
20	68%	60%	53%	48%	45%	42%	39%	38%	36%	35%
25	74%	66%	60%	55%	52%	49%	47%	45%	44%	43%
30 (sept)	78%	71%	65%	61%	**58%**	55%	53%	**52%**	51%	50%
35	81%	75%	70%	66%	63%	61%	59%	58%	58%	57%
40	84%	78%	74%	71%	68%	67%	65%	65%	64%	65%
45	86%	82%	78%	75%	73%	72%	71%	71%	71%	72%
50	88%	85%	82%	79%	78%	77%	77%	77%	78%	79%
55 (juuni)	90%	87%	85%	83%	82%	82%	82%	83%	85%	87%

Mustumine ja varjamine

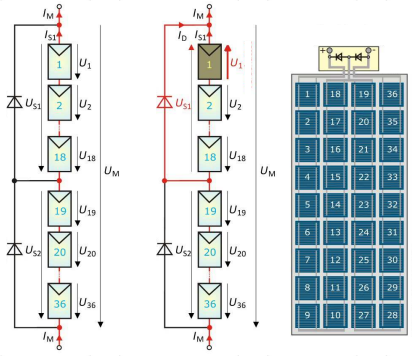
- PV-paneelide ebaühtlane mustumine mõjutab oluliselt paneelide väljundvõimsust ja selle üksikelementide eluiga. Sellest tulenevalt tuleb paneelide valikul eelistada PV-paneele, milledel on suuremal arvul möödaviik (*bypass*) dioodi. Möödaviik dioodidele peavad olema tagatud head jahutustingimused.
- PV-paneeli pinna 2% kinnikatmine või varjamine võib vähendada tootmisvõimsust kuni 70%. 18 elemendi ja 2 möödaviikdioodiga moodulil ühe elemendi 50% varjamine vähendab mooduli võimsust 50%.
- Projekteerimisel tuleb silmas pidada, et otsese päikesekiirguse mõjul võib PV-paneelide temperatuur olla 20 kuni 40 kraadi kõrgem ümbritsevast temperatuurist. Selline temperatuuri tõus põhjustab PV-paneelidel täiendavaid võimsuskadusid, mida saab vältida paremate jahutustingimuste tagamise abil.

U-I tunnusjoone sõltuvus temperatuurist [1]

- Iseloomustavaks suuruseks on temperatuuri koefitsient, mis iseloomustab võimsuskadu, pingelangu või voolu vähenemist temperatuuri ühekraadise muutuse kohta

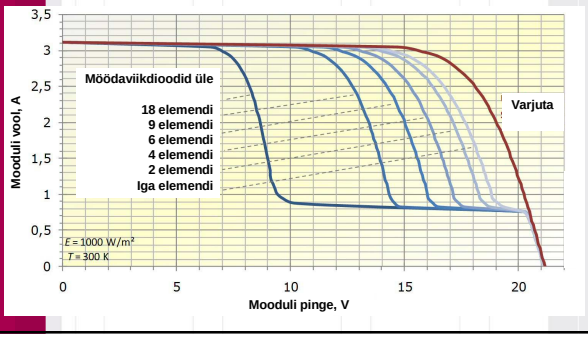


- Ühe elemendi varjamise tõttu võimsuskaod temas suurenevad ja elemendi temperatuur tõuseb.
- Termilise riknemise eest aitavad kaitsta möödaviikdioodid [1]



Sõltuvus möödaviikdioodidest ja mustumisest/varjudest [1]

- U-I tunnusjoon erineva arvu möödaviikdioodide korral kui üks mooduli element on 75% ulatuses varjatud



Varju arvutamine

$$l_{shw} = l_{obj} \cdot \frac{\sin(90 - \alpha_{aas})}{\sin(\alpha_{aas})}$$

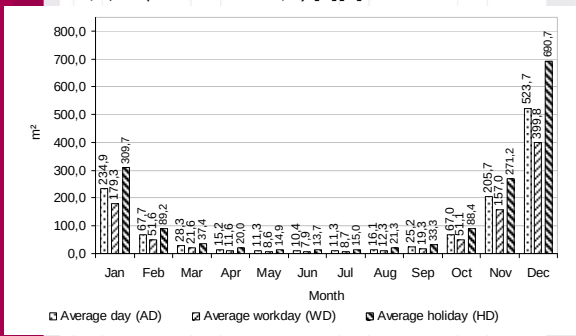
l_{shw} – varju pikkus;
l_{obj} – varjava objekti kõrgus maapinnast;
α_{aas} – päikese kõrgus horisondist

PV-paneelide pindala ideaalis

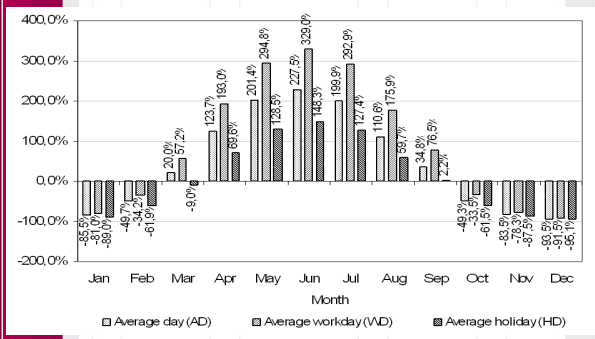
$$A_{pv,ideal} = \frac{E_c}{E_{pv}} = \frac{1}{\eta_{pv}} \cdot \frac{E_c}{E_s}$$

A_{pv} – PV-süsteemi pindala;
E_c – Energiatarve vaadeldaval perioodil;
E_{pv} – PV-süsteemi energiatoodang;
E_s – päikese summaarne kiirgus Wh/m2;
η_{pv} – PV-süsteemi kasutegur

Horisontaalselt paigaldatud PV paneelide (kasuteguriga 20%) pindala keskmisele, puhkepäeva ja tööpäeva tarbimisele. (Kodu tarbimine: keskmine - 0.5 kWh/h, puhkepäev - 0.66 kWh/h, tööpäev - 0.38 kWh/h) [2][3]

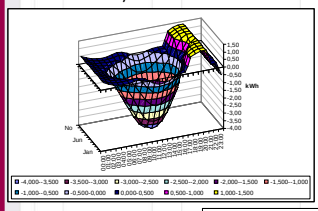


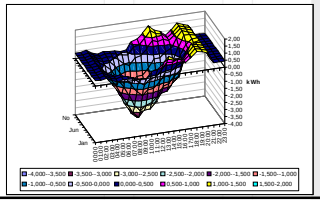
Üle-/alatootmine kui kodutarbimine konstantne [3]



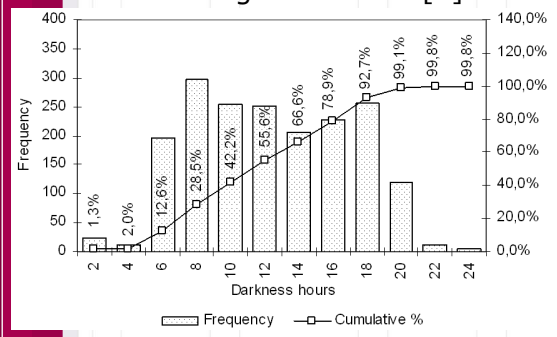
Kodutarbimise katmine PV-ga töö- ja puhkepäeval [3]

PV – 34m², 20%. TARBIJA – 10kWh/p

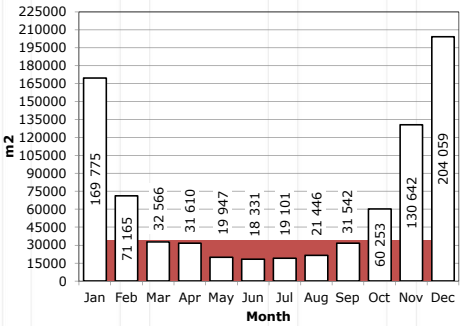




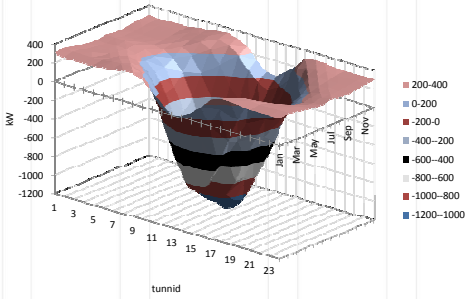
Nulltootmisega tundide esinemissagedus aastas [3]



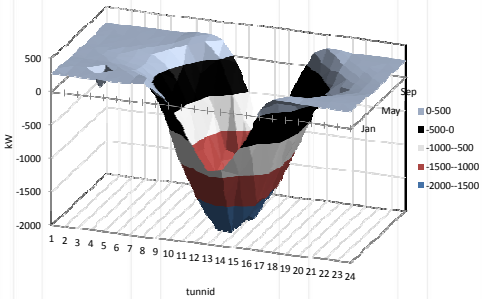
45-kraadise nurga all paigaldatud PV paneelide (kasuteguriga 15%) pindala keskmisele tarbimisele (295 kWh/h)



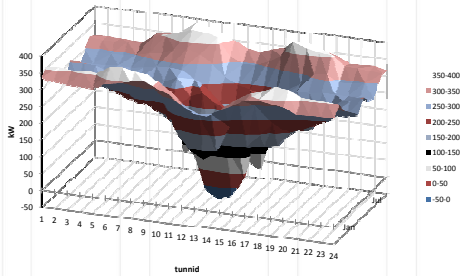
Kontorihoone – keskmine balanss



Kontorihoone – max tootlikkus



Kontorihoone – min tootlikkus



PV-süsteemides tootmise- ja tarbimise kokkulangevus

- Kui süsteem on rajatud põhimõttel, et kogu aastane toodang on võrdne aastase tarbimisega, siis
  - Kodumajapidamistes on võimalik otse tarbida 15-25% toodetud energiast
  - Kontorihoonetes on võimalik otse tarbida 40-60% toodetud energiast
- Alati võib süsteemi dimensioneerida nii, et
  - toodanguga kaetakse vaid võimsustipud ehk kogu toodetu tarbitakse otse ja võrku ei müüda midagi.
  - kogu toodang salvestatakse ja tarbitakse ära (viimane pole majanduslikult otstarbekas

PV, tuuliku ja nende kombinatsiooni võrdlus tootmise ja kodumajapidamistes tarbimise kokkulangevuse osas

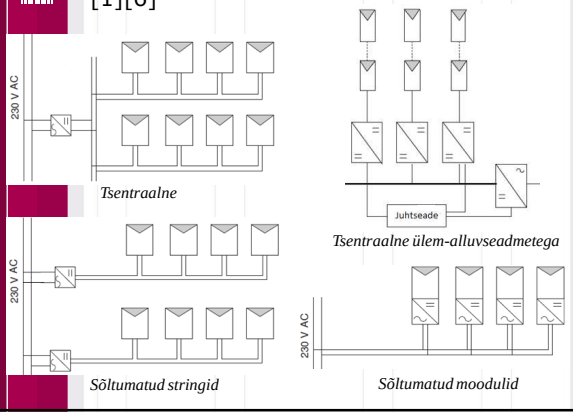
	WT+PV (5kW +3,6kWp)	Tuul (WT) 10 kW	Päike (PV) 6,8 kWp
Tööpäeval toodetust otse tarbitud	31%	37%	24%
Puhkepäeval toodetust otse tarbitud	61%	71%	57%
Tööpäeval otse tarbitu osakaal kogutarbest	53%	68%	27%
Puhkepäeval otse tarbitu osakaal kogutarbest	64%	74%	40%

PV ja tuuliku võrdlus tootmise ja kontorihoonetes tarbimise kokkulangevuse osas

	Tuul (WT) 2x 1MW	Päike (PV) 2,6 MWp
Toodetust otse tarbitud	~50%	~40%
Toodang/tarbimine	~85%	~95%
Otse tarbitu osakaal kogutarbest	>40%	<40%

PV-süsteemid

PV-süsteemide inverterite plokkskeemid [1][6]



Tsentraalne topoloogia

- Tsentraalne süsteem
  - moodulid ühendatakse jadamisi stringina, suurte võimsuste puhul paralleelselt mitu stringi ühe muunduri külge.
  - Puuduseks on stringi dioodide töökindlus ja kaod neis.
- Tsentraalne ülem-alluvseadmetega süsteem
  - Eelisteks on lihtne laiendatavus kui soovitakse võimsust tõsta
- Peamiseks puuduseks on suured kaod osalise varjutamise või moodulite korral mille väljundvõimsus on oluliselt madalam

Sõltumatud stringid

- Suureks eeliseks, et alalisvoolujuhtmete arvu on oluliselt väikesem
- Sobib hästi kasutamiseks kohtadesse kus on oht varjude tekkimisele, kasutatakse samaaegselt erituubilisi paneele sh mooduleid saab grupeerida ja stringe erinevalt häälestada

Sõltumatud moodulid

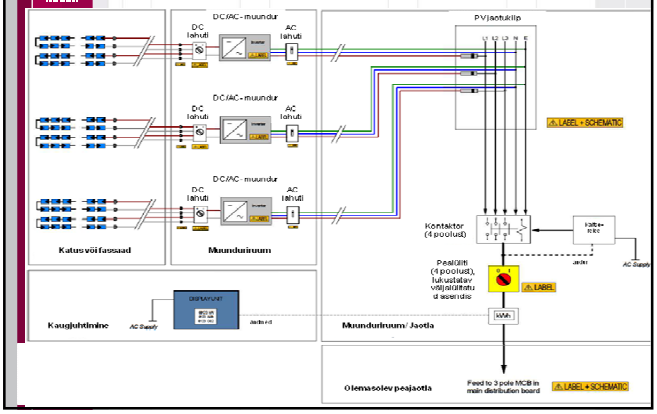
- Optimaalne lahendus varjude korral
- Kaabeldus, laiendatavuskõige lihtsam
- Kallim ja madalam kasutegur
- Iga moodulit saab eraldi seadistada ja häälestada

Võrku ühendatud PV-süsteem

- Et sagedast osakoormusel töötamist vältida peab muunduri nimivõimsus olema võrdne PV-mooduliga.
- Kui muundur on valitud, tuleb valida optimaalne moodulite arv.
- Muunduri maksimaalne DC-pinge peab olema suurem kui PV-paneelide poolt genereeritav.
- PV-paneelide maksimaalne pinge on maksimaalsel kiirgusel ja madalaimal temperatuuril töötavate järjestikku ühendatud PV-moodulite tühijooksupingete summa. Saksamaal on vastavad parameetrid 1000W/m2 ja -10°C.
- Lõpuks määratakse paralleelsete ahelate arv, et tagada nõutud vool ja võimsus.

PV-süsteemi elektripaigaldis hoones

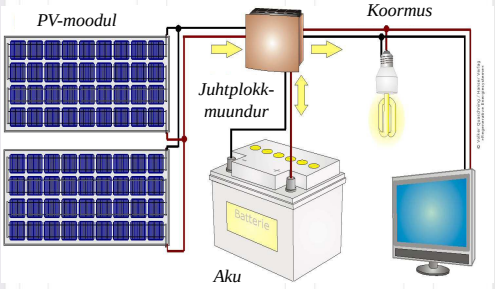
http://www.bre.co.uk/filelibrary/pdf/rpts/Guide_to_the_installation_of_PV_systems_2nd_Edition.pdf



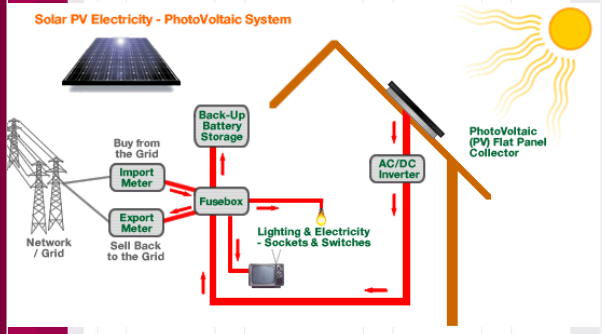
PV võrgust eraldi

- PV-seade parameetrid tuleb valida nii, et tagada kuu päikese kiirgusega ka kuu elektrienergiavajadus.
- Salvesti parameetrid tuleb valida nii, et salvesti katab reservpäevade jooksul ettenähtud tarbe ja seejuures tühjeneb kuni poole peale. Saksamaal loetakse talvel reservpäevadeks ca 4-5päeva. Eesti oludes on mõistlik selleks valida 5-7 päeva
- Akusid tuleb kaitsta ülelaadimise ja –tühjenemise eest. 30%-lisele jääkmahtuvusele vastab pinge 11.4V, mis on alumine piir takistamaks pliiakus pliisulfaatkristallide teket.
- Laadides vahemikus 13,8...14,4 tekivad aurud, mistõttu kontrollitakse vedeliku taset akus. Suurel hulgal aurude tekkimine võib rikkuda aku. Seega on eelkirjeldatud vahemikus soovitav laadimine välja lülitada.

Tüüpiline OFF-grid süsteem [1]

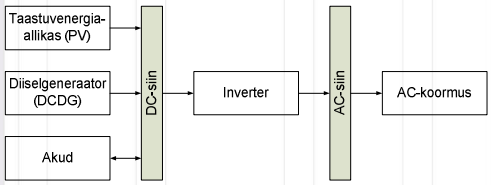


http://www.wwelecltd.com/id14.html



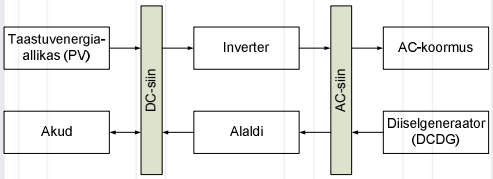
Jadaühendusega ON/OFF-grid süsteem

Jadaühendusega süsteemi iseloomustab: madal süsteemi efektiivsus, suur inverteri võimsus ja salvesti maht, diiselgeneraatori ja taastuvenergiaallikate optimeerimise võimaluste piiratus.



Paralleelühendusega ON/OFF-grid süsteem

Paralleelühendusega süsteemi seevastu iseloomustab diiselkütuse tõhusam kasutamine, diiselgeneraatori hooldusvajaduse vähenemine, koormuste toite optimaalne tagamine.

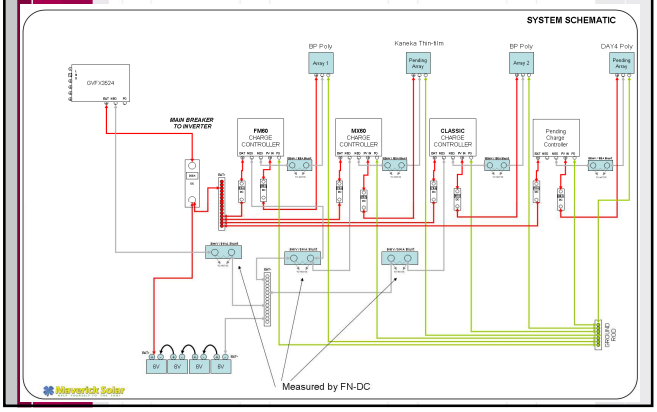


PV-süsteemide akud

- PV-süsteemide salvestitena kasutatakse peamiselt elektrokeemilisi akusid, nagu VRLA-akud.
- VRLA-akud (*valve-regulated lead–acid battery*) jagunevad AGM- ja geel-akudeks. Need akud ei vaja pidevat hooldust nagu tavalised pliiakud.
- PV-süsteemi akude eluiga kõigub sõltuvalt laadimis- ja tühjendamistsüklite arvust, tühjendamistsüklite sügavusest ja temperatuurist vahemikus 3...5 aastat.
- Tüüpiline isetühjenemine pliiakudel temperatuuril 25°C on 10% kuus. VRLA akude korduvlaadimise kestus on pikem kui tavalistel pliiakudel.
- VRLA-akud on tundlikumad ülelaadimisele ja neil on mõnevõrra lühem eluiga.
- PV-süsteemides kasutatakse harva NiCd or NiMH akusid, kuna on kallid ja madalama kasuteguriga

PV-süsteemi paigaldis akudega

http://www.mavericksolar.net/midnite/classic/Maverick_Schematic_2010-06-01.png



Pliiakude pingepiirkonnad PV-süsteemis ja juhtimisalgoritm

Pingepiirkond, V	Laadimisolek
> 14,4	Laadimine katkestatud, aku täis
13,5...14,1	Normaalne laadimine tarbijata
12,0...14,1	Normaalne laadimine tarbijaga
11,5...12,7	Normaalne tühjenemisel
11,4	Tarbija väljalülitus, laadimise käivitus

- **Tüüpiline tühjenemine pliiakudel temperatuuril 25°C on 10% kuus.**
- **Akusid tuleb kaitsta ülelaadimise ja –tühjendamise eest 30%-lisele jääkmahtuvusele vastab pinge 11.4V, mis on alumine piir takistamaks pliisulfaatkristallide teket.**
- **Laadides vahemikus 13,8...14,4 tekivad aurud, mistõttu kontrollitakse vedeliku taset akus. Suurel hulgal aurude tekkimine võib rikkuda aku. Seega on eelkirjeldatud vahemikus soovitav laadimine välja lülitada.**

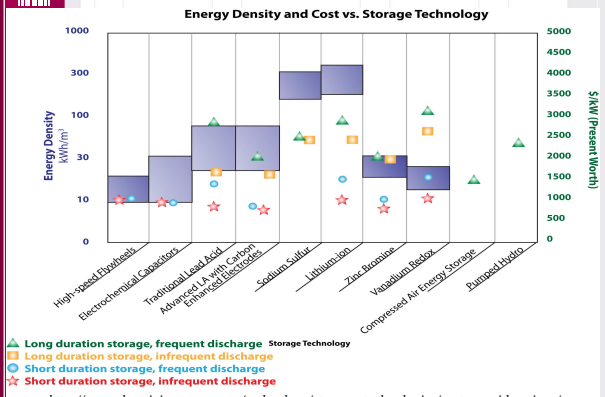
Salvesti mahutavuse arvutus

- Salvesti parameetrid tuleb valida nii, et salvesti katab reservpäevade jooksul ettenähtud tarbe ja seejuures tühjeneb kuni poole peale.
- Saksamaal loetakse talvel reservpäevadeks ca 4-5päeva. Eesti oludes on mõistlik reservpäevadeks valida 5-7 päeva

$$C = \frac{2 \cdot E_{tarve,K}}{U_{bat}} \cdot \frac{d_R}{31}$$

d_R – *reservpäevad*
U_{bat} – *akupinge*
$E_{tarve,K}$ – *tarbimine kõige väiksema päikese kiirgusenergiaga kuul*

Salvestustehnoloogiate energiatiheduse ja hinna võrdlus

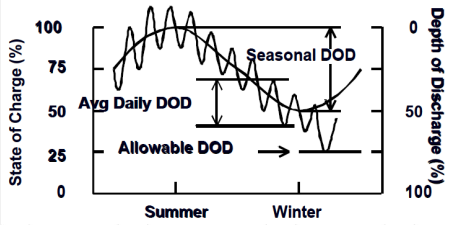


http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/cost_considerations/

Akude mahutavuse määramisel on eriti oluline arvestada aastaaegadest tingitud tarbimise ja tootmise kõikumist.

Eriti oluline on see OFF-grid lahenduste puhul, kus tuleb pöörata erilist tähelepanu akude laetusele sh vältima ülelaadimist, ning tühjendamissügavusele.

Mõlemast parameetrist sõltub otseselt akude eluiga.



http://www.localenergy.org/pdfs/Document%20Library/Fundamentals%20of%20batteries%20and%20charge%20control.pdf

Salvestite maksumused ja käidukulud

Energiasalvestite maksumusi ja käidukulusid on põhjalikult kirjeldatud Sandia National Laboratories aruannetes ja väljaannetes :

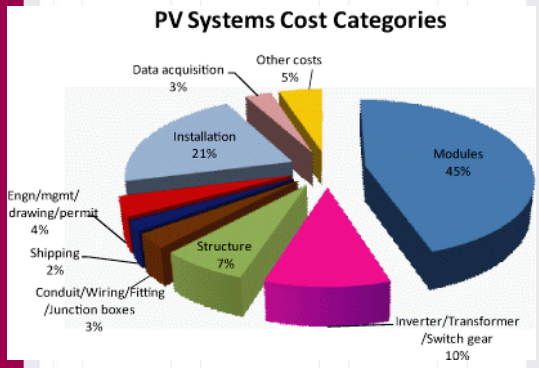
1. *Susan M. Schoenung, Jim Eyer. Benefit/Cost Framework for Evaluating Modular Energy Storage. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia National Laboratories. February 2008.* *http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2008/080978.pdf*
2. *Susan Schoenung, Ph.D. Energy Storage Systems Cost Update. A Study for the DOE Energy Storage Systems Program. Sandia National Laboratories. April 2011.* *http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/112730.pdf*
3. *Electric Power Industry Needs for Grid-Scale Storage Applications. Sandia National Laboratories. December 2010.*

Investeeringud PV-süsteemidesse

	Võimsus (kWp)	Investeering (€/Wp)
OFF-grid	0,1...0,5	10...15
	1...4	8...12 (arenenud riikides)
		15...30 (hajaasustusega aladel ja arenguriikides)
ON-grid	1...4	3,5...5
	10...50	3,5...5
	>50	3,5...5
	>200	2...4

www.pvresources.com

http://www.solarchoice.net/System_Cost.htm



Tasuvus

- Lähtudes kontorihoone juurde kuuluvast maaalast on võimalik rajada 30...45-kraadise nurga all paiknevate ja 15% kasuteguriga paneelide korral 2,6...3 MWp päikeseelektrijaam (45-kraadise nurga puhul ligikaudu 2,66 MWp). Sedalaadi elektrijaama tasuvusaeg on ligikaudu 56 aastat eeldusel, et kasutatakse
  - 15% kasuteguriga PV-paneele mis paigaldatakse maaalale 34100 m² efektiivse kasutamisega 52%
  - terviksüsteemi kaod ei ületa 20%, käidukulud on 0%, marginaal on 0, maamaksumus on 0, Igaastane taastuvenergiatoetus on 0
  - investeerimiskulud on 2,6 €/Wp [5]
  - toodetud elekter müüakse avatud elektriturul sh tootlikkuse ennustamise täpsus jääb vahemikku ±10%
- Taastuvenergiatasu arvestamisel 53,7 €/MWh, lüheneb ülalloetletud tingimustel jaama tasuvusaeg ligikaudu 27 aasta peale.
- Et elektrijaam muutuks taastuvenergiatoetuseta tema eluea so 25 aasta lõpuks tasuvaks, peab investeerimiskulu langema (alla 1,16 €/Wp) või keskmine elektrihind tõusma vähemalt 2,25 korda.
- Taastuvenergiatoetuseta investeerimiskulude 1 €/Wp korral tasub elektrijaam ennast ligikaudu 21,5 aastaga.

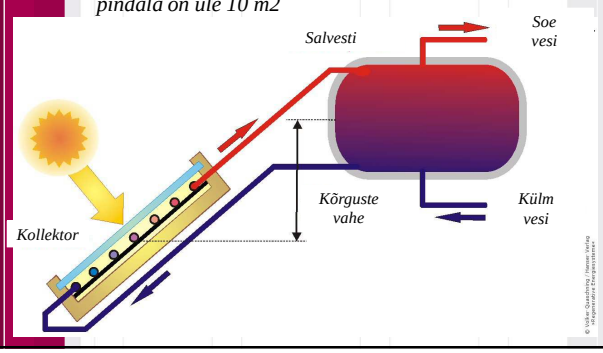
Päikesekollektorid

Kollektorite kasutusvaldkonnad

- Ujulate soojendus
  - 177 ujulat 294 basseiniga (2010, Terviseamet)
- Joogivee soojendus
- Ruumide soojendus

Termosifoonseadme tööprintsiip [1]

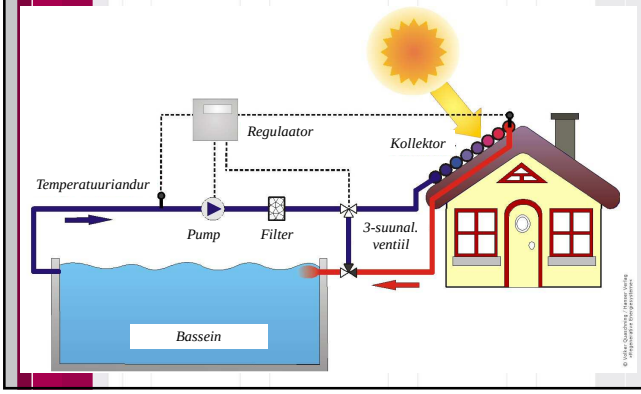
Sobib suvilates kasutamiseks või maades kus aastaringi on temperatuur üle külmumispiiri
Reeglina ei sobi kasutamiseks kui kollektorite pindala on üle 10 m2



Ujulad ja basseinid

- Tüüpiline energiavajadus basseinides jääb vahemikku 150 kWh kuni 450 kWh iga basseini ava ruutmeetri kohta
- Saksamaal piisab vee soojendamiseks kuni 23 kraadini täielikult päikeseenergiast
- 2000 ruutmeetrise basseini puhul on võimalik kokku hoida kuni 75000 liitrit kütteõli ja vähendada CO2 eraldamist kuni 150000 kg (katla kasutegur 80%)
- Kollektori absorberi pindala peab moodustama 50…80% basseini ava pindalast
- Hinnad sellise süsteemi kohta olid 2009 aastal ligi 100€/m2
- Kõrgema vee temperatuuri saavutamiseks võib lahendus osutuda suurema kollektorite pinna tõttu mitte tasuvaks

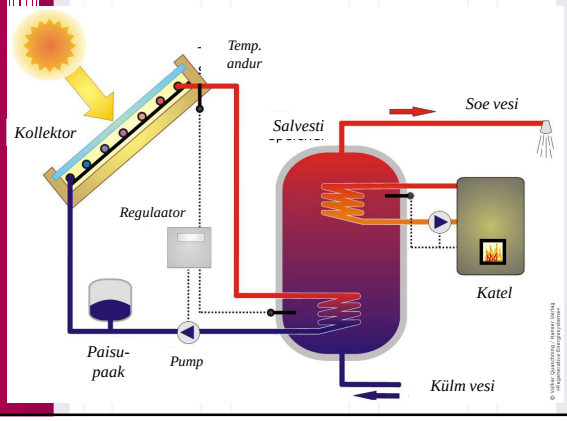
Ujulate vee soojendus [1]



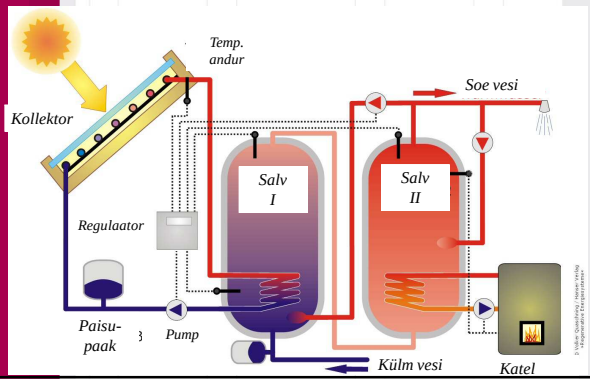
Tsirkulatsioonipumbaga lahendus

- Temperatuuri hüsterees valitakse reeglina 5-10 kraadi etteandeväärtusest
- Pump arvutatakse põhimõttel 1 m2 paneel = 30-50 l/h
- Ujulate puhul valitakse suurem jõudlusega pump

Tsirkulatsioonipumbaga lahendus [1]



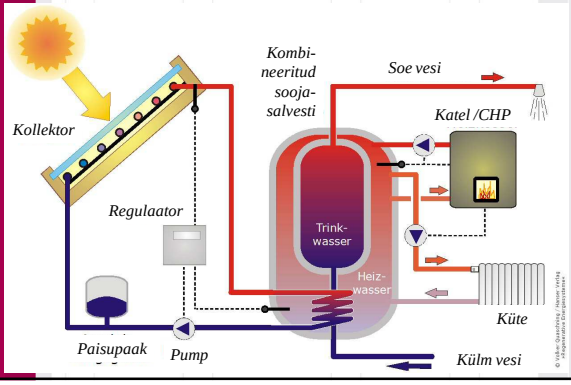
Kahe salvestiga päikesepaneelidega joogivee soojendus [1]



Tsirkulatsioonpumbaga kombineeritud kütte toetamise süsteem

- Sooja joogivee ja küttesüsteemi salvestite kombineerimine võimaldab soojuskadusid vähendada
- Kasutatakse kollektoreid toetava küttena, mis võimaldab kevadel ja sügisel katta peaaegu kogu soojusenergiavajaduse
- Kollektori ja salvesti suurus peab olema õigest dimensioneeritud, enamasti katab 3 kuni 5 päeva energiavajaduse
- Sõltuvalt tarbimismustrist võimaldab katta 20 kuni 70 % kogu soojusenergia vajadusest

Tsirkulatsioonpumbaga kütte toetamise süsteem [1]



Päikesekollektoritega kohalik soojavarustus ühise salvestiga

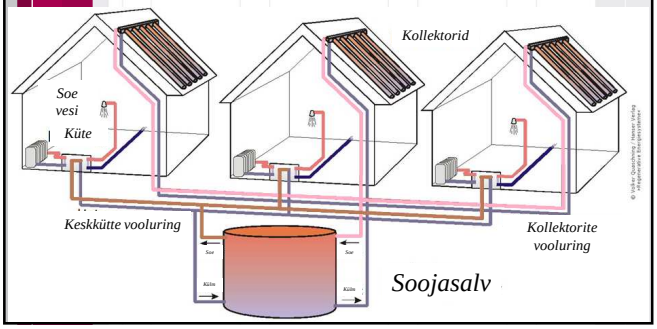
Eelis

- Suurem salvesti tähendab väiksemaid salvestuskadusid ja võimaldab sooja pikemalt salvestada

Puudus

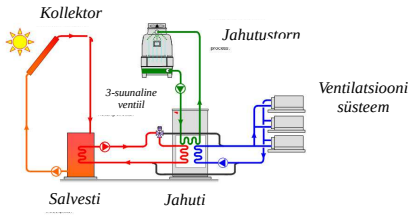
- Pikem torustik tähendab suuremaid investeerimiskulusid ja kadusid torustikes

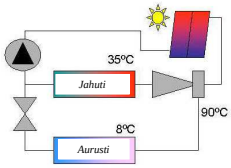
Päikesekollektoritega keskküttesüsteem



Kollektoritel põhinev jahutussüsteem

http://www.solar-green-wind.com/archives/tag/solar-absorption-cooling

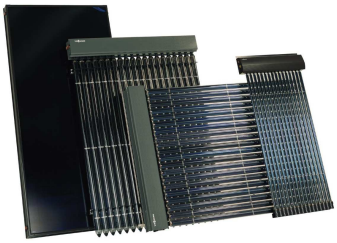




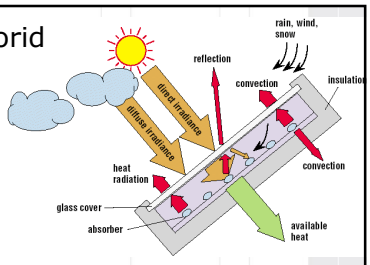
http://cleangreenenergyzone.com/solar-energy/solar-thermal-systems/

Päikesekollektorid

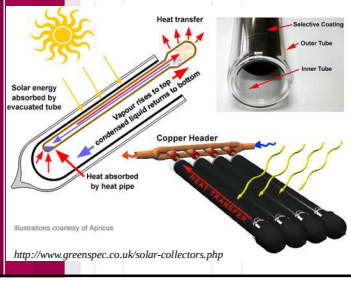
- Vaakumtorudega päikesekollektorite kasutegur sõltub kõige vähem ümbritsevast temperatuurist
- Vajab suvekuudel soojussalvestite kasutamist



Lamekollektorid

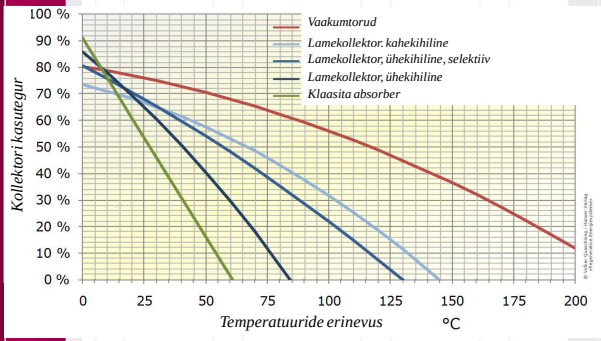


Vaakumkollektorid



http://www.greenspec.co.uk/solar-collectors.php

Päikesekollektorite kasutegurid [1]



Kollektorid tarbevee soojendamiseks

Rusikareegel

- Kollektori suurus: 1...1,5 m^2 inimese kohta
- Salvesti suurus: 80...100 l inimese kohta
- Vaakumtorudega kollektorite puhul võib kollektori pindala vähendada ca 30%
- Alla 3...4 m^2 kollektorite puhul kadude osakaal torudes kõrge

Kuidas arvutada päikesekollektori pindala

$$A_K \approx \frac{SD}{\eta_{KN}} \cdot \frac{Q_N}{H_{Solar}}$$

SD – katvustegur (tarbevee soojendamisel on see ca 50...60%). Seda väärtust suurendades 60%-lt 75%-le on vaja kollektori pindala kahekordistada, mis pole majanduslikult otstarbekas.
SD sõltub järgmistest kadudest: salvestuskaod, tsirkulatsioonikaod kollektoriahelas, torustiku soojendamiskaod, kasulik ehk kasutatav soojus, kollektori tarve. SD näitab kui palju tarbitud veest soojendatakse kollektoriga.

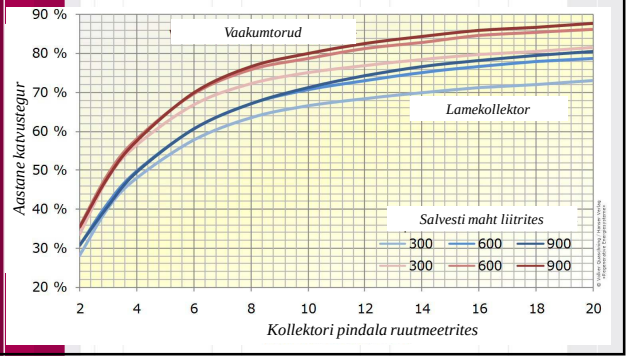
η_{KN} – kollektori kasutustegur, mis praktikas on vahemikus 20...50%

Q_N – aastane energiakulu

H_{Solar} – päikesekiirgus pinnale

Katvustegur [1]

- Suvekuudel või ulatuda kuni 100%
- Talvekuudel 10%



Aastane energiakulu ja salvesti suurus

Aastane soojavajadus on sellest tulenevalt

$$Q_N = 365 \cdot P \cdot Q_p$$

Q_N – aastane energiakulu
Q_p – aastane energiakulu inimese kohta

Salvesti suurus

$$V_S = 2 \cdot P \cdot V_p$$

Vp – inimese päevane vajadus liitrites
P – inimeste arv majapidamises

VDI 82 järgi korterite soojaveevajadus

	Soojavee vajadus, Liitrit päevas inimese kohta		Kasutussoojus, Wh päevas inimese kohta
	ϑ_{ww} = 60°C	ϑ_{ww} = 45°C	
Madal vajadus	10...20	15...30	600...1200
Keskmine vajadus	20...40	30...60	1200...2400
Kõrge vajadus	40...80	60...120	2400...4800

VDI 82 järgi hotellide, pansionaatide ja kodude soojaveevajadus

	Soojavee vajadus, Liitrit päevas inimese kohta		Kasutussoojus, Wh päevas inimese kohta
	ϑ_{ww} = 60°C	ϑ_{ww} = 45°C	
Tuba vanniga	95...138	135...196	5500...8000
Tuba duššiga	50...95	74...135	3000...5500
Tavaline tuba	25...35	37...49	1500...2000
Kodud, pansionaadid	25...50	37...74	1500...3000

Erinevate tarbijate soojaveevajadus

	Tarvidus	Temperatuur	Energia
Nõudepesumasin inimese kohta	12...15 l/päev	50°C	550...700 Wh/päev
Kätepesu	3...5 l	37°C	95...160 Wh
Vann	150 l	40°C	5200 Wh
Dušš	30...45 l	37°C	940...1400 Wh
Peapesu	10...15 l	37°C	310...470 Wh

Rusikareeglid kollektorite kasutamisel kütte toetamiseks [1]

- Variant 1: hea tasuvusega väikesed süsteemid
  - 0,8 m² lamekollektoreid 10 m² elamispinna kohta
  - 0,6 m² vaakumkollektoreid 10 m² elamispinna kohta
  - Salvesti 50 liitrit 1 m² kollektoripinna kohta
- Variant 2: keskmise suurusega ja kõrge katvusteguriga süsteemid
  - 1,6 m² lamekollektoreid 10 m² elamispinna kohta
  - 1,2 m² vaakumkollektoreid 10 m² elamispinna kohta
  - Salvesti 100 liitrit 1 m² kollektoripinna kohta

Variantide 1 ja 2 katvusteguri võrdlus

30-kraadise kaldega lamekollektoritega kütmise toetamise süsteem eluruumile pindalaga 130 m²

	Vana ehitis	Standartne uusehitis	3-liitri maja *)	Pasiiv-maja
Sooja tarbevee vajadus, kWh	2700	2700	2700	2700
Küttevajadus	25000	11500	3900	1950
Katvustegur (variant 1)	13%	22%	40%	51%
Katvustegur (variant 2)	22%	36%	57%	61%

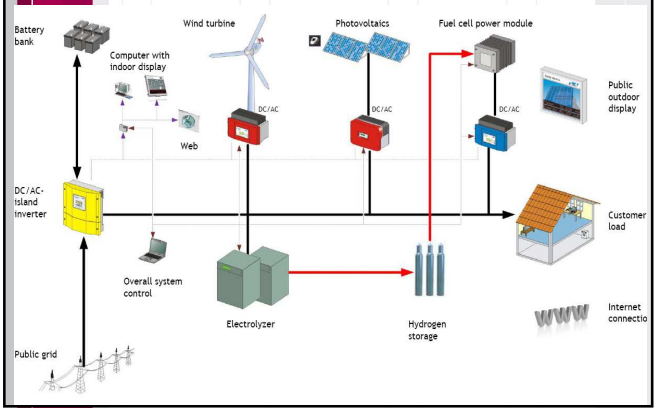
**) aastane primaarenergiatarve on <30 kWh/m². 30 kWh vastab ligikaudu 3 liitrile kütteõlile, seega kulutab aastas kütteõli 3 l /m²*

Fotoelektriliste ja päikesekollektorite tasuvuse võrdlus

- Erinevus on tõhususes. Päikesekollektorid on 2…2,5 korda tõhusamad.
- Investeeringukulud jäävad ligikaudu samasse suurusjärku.
- Kui päikesekollektor muundab kuni 50% päikeseenergiast soojuseks, siis tõhusaimad PV-d muundavad 15…20% elektriks.

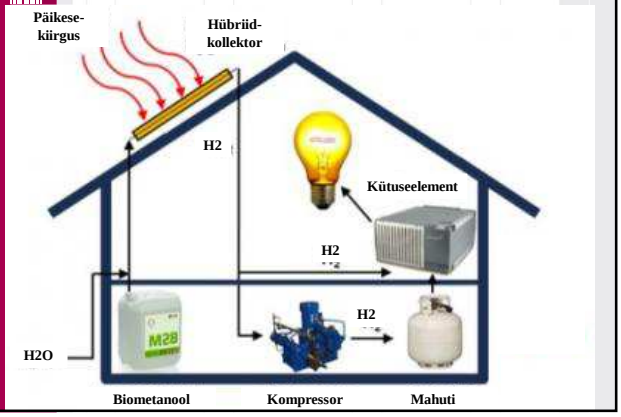
Tüüpiline mikrovõrk I

http://www.heliocentris.com/de.html

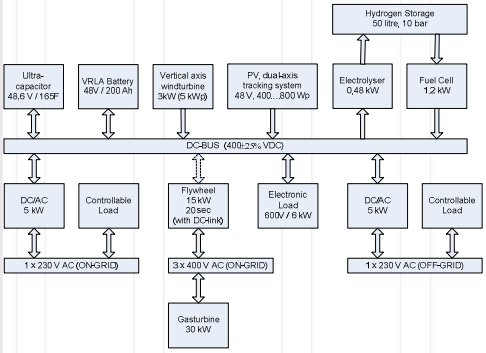


Uudne mikrovõrk

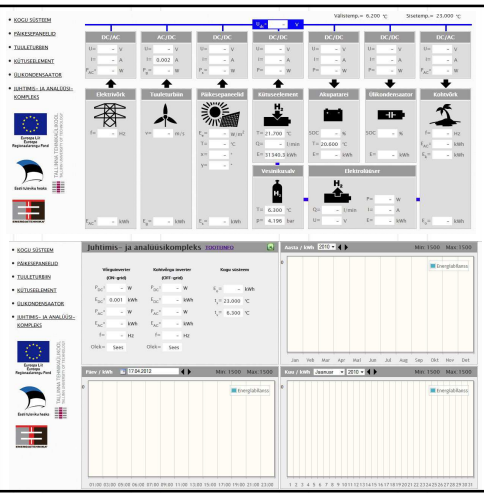
http://spie.org/x57817.xml



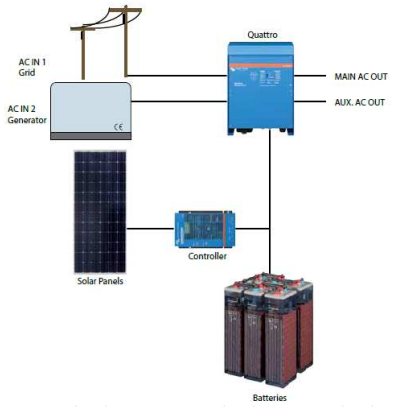
TTÜ energeetikateaduskonna mikrovõrk I



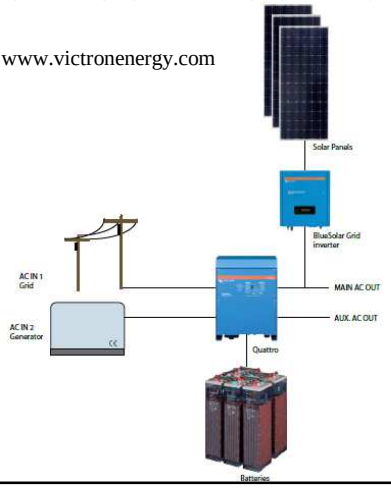
- **Päikesepaneel***:*
  - U/I- ja *P/I-tunnusjooned (curves),*
  - Kasutegur,
  - järgivajami kasutaminel,
  - Spektraaltundlikkus,
  - Toodangu sõltuvus paneelide temperatuurist.
- **Tuulegeneraator***:*
  - U/I- ja *P/I-tunnusjooned*
  - energiatoodang ja selle kõikumine, *sh tuulekiiruse mõju*
  - kasutegur,
  - optimaalsed koormusgraafikud,
  - tuuleenergia salvestamise karakteristikud
  - Päikese- ja tuuleenergiast vesiniku tootmise karakteristikud
- **Komponentide võimalikud konfiguratsioonid***:*
  - talitlusviisid ja –strateegiad,
- **Kütuseelement***:*
  - U/I tunnusjoon *, sõltuvus temperatuurist ja niiskusest,*
  - kasutegur erinevatel koormustel ja voolutihedustel,
  - vesinikutarve, salvesti dimensioneerimine, energiavaru.
- **Ülikondensaator- ja akusalvesti***:*
  - laadimis-tühjenemiskõverate ülesvõtmine, Kasutegur,
  - salvesti omadused*:*
    - salvede eripärad tühjenemisel ja laadimisel,
    - Ohutus ,
    - mahutavuse ja laetuse määramine ,
    - salvesti dimensioneerimine
- **Energiasaare pikaajaline töö jälgimine**
- **Koostöö võrgust sõltuvalt**
- **Tasuvusarvutused.**



TTÜ energeetikateaduskonna mikrovõrk II (www.victronenergy.com)



www.victronenergy.com



Millega arvestada taastuvenergialahenduse planeerimisel

Mida arvesse võtta süsteemide projekteerimisel?!

- ON-grid lahendusel elektrihinna ja tootmise kõverate kokkulangevust
  - Süsteem on enim tasuv kui tootmise-tarbimise ja elektrihinna kõverad langevad kokku nii ööpäevases lõikes kui ka aastases lõikes.
- Ehitus- ja elektrotehnilisi aspekte
  - olemasolevate konstruktsioonide vastupidavus, temperatuuri mõjud tootlikkusele, tootmiskõverad, salvestusvajadused jpm
- Keskkonnaaspekte
  - müra, valgusvärelus, valguse peegeldus, vibratsioon jne
- Ohutusaspekte
  - nt. vastupidavus lumele, tuulele, temperatuurile, niiskusele jne)

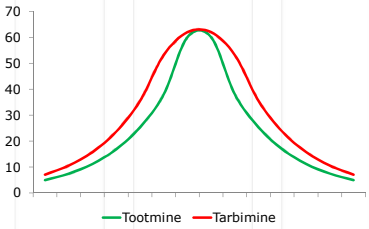
Mida arvesse võtta PV-süsteemide projekteerimisel?!

- Majandusaspekte
  - tulud, kulud, tasuvus, eluiga,
- Esteetilisi aspekte
  - Sobivus keskkonda, disain
- Protsesside võimalikku dünaamikat
  - Siirdeprotsesside eripära sõltuvalt taastuvenergiaallikatest sh
    - Elektrikvaliteedi tagamine
    - Kaitseaparatuur

PV-süsteemi põhjustatud tulekahjud – uus liik tulekahjusid

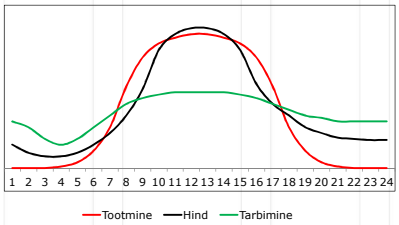
http://www.solar-international.net/article/73454-PV-fire-prevention.php

Elektritarbimise ja –tootmise kõverate kokkulangevus



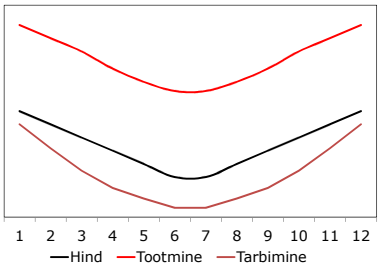
- Mida suurem kokkulangevus, seda väikesem vajadus salvestite või reservtoiteallikate järele

Elektrihinna ja tootmise kõverate ööpäevane kokkulangevus



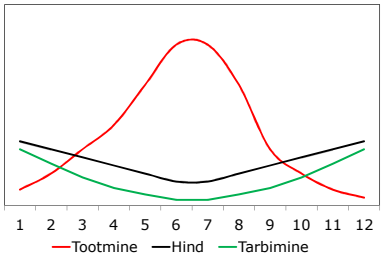
- fotoelektrilise päikeseelektri- ja tuuleelektrijaama ööpäevased elektritootmise kõverad on sünkroonis hinnakõveratega

Elektrihinna ja tootmise kõverate kokkulangevus – tuuleenergia



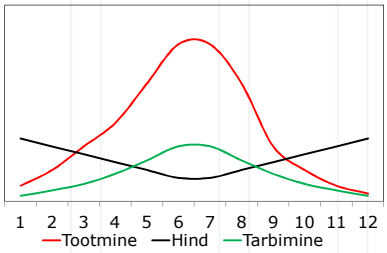
- Tüüpiline kontorihoone, elamu
- Koolid, lasteaiad jm õppeasutused

Elektrihinna ja tootmise kõverate kokkulangevus – päikeseenergeetika



- Tüüpiline kontorihoone, elamu
- Koolid, lasteaiad jm õppeasutused

Elektrihinna ja tootmise kõverate kokkulangevus – päikeseenergeetika



- Konditsioneeridega kontorihoone
- Suvised majutusasutused
- Muuseumid, lõbustuspargid jmt

Kasutatud kirjandus

1. Quaschning, Volker. Regenerative Energiesysteme, Technologie – Berechnung – Simulation. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Hanser Verlag München. 2009. 397 s. ISBN 978-3-446-42151-6.
2. Rosin, A.; Hõimoja, H.; Möller, T.; Lehtla, M.; , "Residential electricity consumption and loads pattern analysis," Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2010 , vol., no., pp.111-116, 16-18 June 2010.
3. Rosin, A.; Rosin, K.; Auväärt, A.; Strzelecki, R. (2012). Dimensioning of household electricity storage for PV-systems and load scheduling based on Nord Pool Spot prices. Przeglad Elektrotechniczny, 88(4b), 294 - 299.
4. Russak, Viivi; Kallis, Ain. Handbook of Estonian Solar Radiation Climate. Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituut. Printed by AS ILOPRINT. Tallinn 2003.
5. International Energy Agency. (2010). *Projected Costs of Generating Electricity - 2010 Edition*. Paris, France: International Energy Agency.
6. Savita Nema, R. K. Nema, and Gayatri Agnihotri. Inverter topologies and control structure in photovoltaic applications: A review. J. Renewable Sustainable Energy **3**, 012701 (2011).

Futuristlikke lahendusi

Tänan tähelepanu eest !