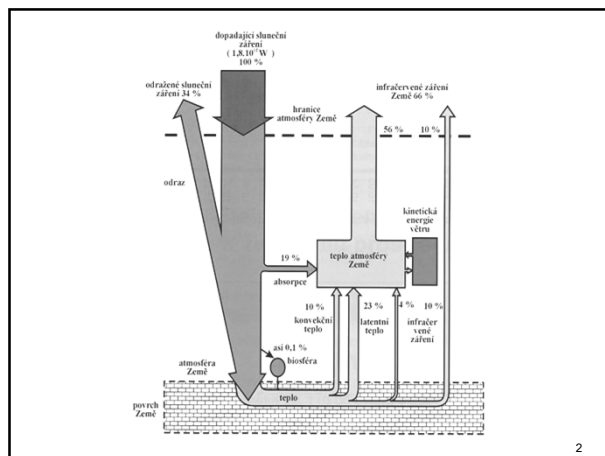


Sluneční energie

Z celkového výkonu vyzařovaného Sluncem dopadají na naši Zemi jen přibližně dvě miliardy, tj. asi $7,7 \cdot 10^{17}$ kW

- 34 % se odrazí zpět do vesmíru od mraků, částec prachu a zemského povrchu
- 19 % se pohltí v atmosféře
- 47 % energie je pohlceno zemským povrchem - mění se v teplo, z této části
 - 14 % je vyzařováno z povrchu Země jako infračervené záření a pohlcováno v atmosféře víceatomovými plyny (skleníkový efekt)
 - 23 % se spotřebovává na vypařování vody
 - 10 % je odvedeno konvekci do vzduchu

1



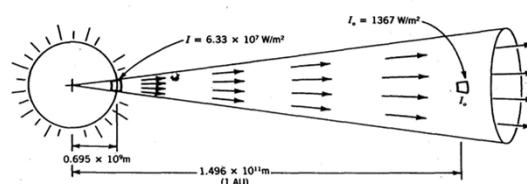
2

Solární konstanta, záření přímé a difúzní

- Solární konstanta I_o je energie od Slunce, za jednotku času, dopadající na jednotku plochy kolmou ke směru šíření záření, při průměrné vzdálenosti Slunce od Země, mimo zemskou atmosféru. $I_o = 1367 \text{ W/m}^2$
- Sluneční záření dopadající na určitou plochu lze rozdělit na dvě složky:
 - přímé sluneční záření G_p : sluneční záření dopadající na plochu bez jakéhokoliv rozptylu v atmosféře,
 - difúzní sluneční záření G_d : sluneční záření dopadající na plochu po změně směru záření vlivem rozptylu v atmosféře.

3

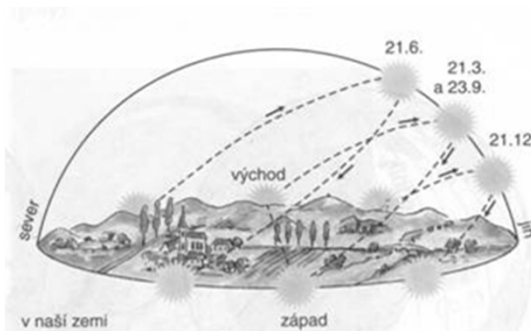
Solární konstanta, záření přímé a difúzní



- Solární konstanta mimo zemskou atmosféru
 - $I_o = 1367 \text{ W/m}^2$
- Maximální energie dopadající na povrch Země
 - $I_{max} = 1100 \text{ W/m}^2$

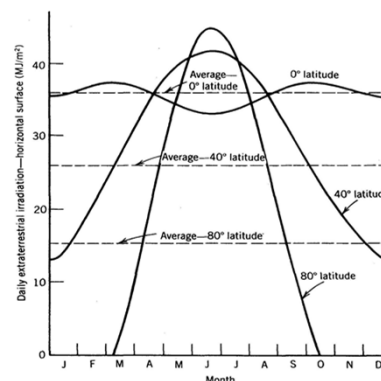
4

Relativní pohyb Slunce kolem Země



5

Sluneční záření během dne v průběhu roku, podle zeměpisné šířky

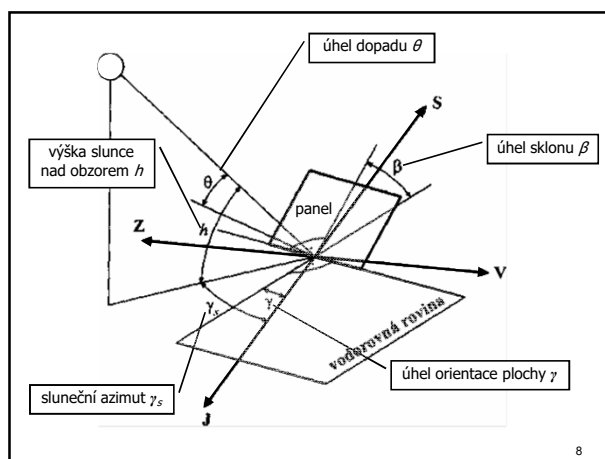


6

Definice pojmů

- hemisférické sluneční záření: sluneční záření na rovinný povrch, přijímané v prostorovém úhlu 2π sr ze shora přilehlého poloprostoru,
 - globální sluneční záření: hemisférické sluneční záření přijímané vodorovnou plochou,
 - ozáření G : hustota zářivé energie dopadající na povrch, t.j. podíl zářivého toku dopadajícího na určitý povrch a velikosti tohoto povrchu (W/m^2),
 - dávka ozáření H : zářivá energie dopadající na jednotku plochy za určitou dobu, která se zjistí integrací ozáření v určitém časovém intervalu, (za hodinu nebo den) (MJ/m^2),
 - exitance záření M : zářivý tok, vycházející z určitého povrchu
 - jeho vlastní emisivitou,
 - odrazem dopadajícího záření
 - propustností
- dělený plochou tohoto prvku

7



8

Statistický výpočet sluneční energie dopadající na libovolně orientovanou plochu

Základní pojmy a definice

- zeměpisná šířka ϕ : úhlové umístění severně (+) nebo jižně (-) od rovníku; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$,
- sluneční deklinace δ : úhel, který svírá spojnice středů Země a Slunce s rovinou zemského rovníku (odchylka od rovníku na sever se značí znaménkem +); $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$,
- úhel sklonu β : úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou sledovaného povrchu; $-180^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$, ($\beta > 90^\circ$ znamená, že sledovaný povrch směřuje dolů),
- úhel orientace plochy γ (azimut plochy): úhlová odchylka průmětu normály plochy do horizontální roviny od lokálního poledníku, přičemž 0° odpovídá orientaci na jih, (-) východ, (+) západ; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$,
- sluneční časový úhel ω (azimut Slunce): úhel mezi průmětem spojnice pozorovatele a Slunce v určitém čase na rovinu proloženou zemským rovníkem a mezi průmětem této spojnice při slunečním polední. Sluneční časový úhel se mění přibližně o 360° za 24 hodin (přibližně 15° za hodinu). Tento úhel je záporný dopoledne a kladný odpoledne, t.j. (ve stupních) $\omega \sim 15 (H - 12)$, kde H je sluneční čas v hodinách,

9

Statistický výpočet sluneční energie dopadající na libovolně orientovanou plochu

- úhel dopadu θ : (jen pro přímé sluneční záření) úhel mezi spojnicí středu Slunce a ozářené plochy a vnější kolmicí vztčenou nad ozářenou plochou,
- úhel slunečního zenitu θ_z : úhel sevřený spojnici pozorovatele a Slunce a svislicí nad pozorovatelem (také úhel dopadu přímého slunečního záření na vodorovnou plochu),
- výška slunce nad obzorem h : doplňkový úhel slunečního zenitu $h = 90^\circ - \theta_z$,
- sluneční azimut γ_s : úhel, který svírá svislý průmět spojnice místa pozorovatele a momentální polohy Slunce do vodorovné roviny v místě pozorovatele s přímkou směřující od místa pozorovatele k jihu (na severní polokouli) nebo k severu (na jižní polokouli).
 - měří se ve směru chodu hodinových ručiček na severní polokouli a proti směru na jižní polokouli.
 - je negativní dopoledne (Slunce je na východ od jihu), 0° nebo 180° v poledne (záleží na poměrné hodnotě sluneční deklinace a na místní zeměpisné šířce) a kladný je odpoledne (západní polohy Slunce) na celé zeměkouli.
 - odlišuje se od zeměpisného azimutu, který se měří od severu ve směru hodinových ručiček na celé zeměkouli.

10

Statistický výpočet sluneční energie dopadající na libovolně orientovanou plochu

- Směr dopadu slunečních paprsků je dán vzájemnou polohou Slunce nad obzorem a osluněné plochy.
 - u osluněné plochy se zpravidla jedná o stálou polohu danou její orientací ke světovým stranám a úhlem sklonu (kromě systémů s rotací za sluncem)
 - poloha Slunce se mění v závislosti na denní a roční době.
- Poloha Slunce je dána jeho výškou nad obzorem h a jeho azimutem γ_s . Pro tyto dva úhly platí vztahy

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega \quad \sin \gamma_s = \frac{\cos \delta}{\cos h} \cdot \sin \omega$$

11

Statistický výpočet sluneční energie dopadající na libovolně orientovanou plochu

- Sluneční deklinace se během roku mění, pro každý den má jinou hodnotu.
- Sluneční deklinace δ pro libovolný den v roce se vypočítá ze vztahu

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin(0,98^\circ \cdot D + 29,7^\circ \cdot M - 109^\circ)$$

kde

D je pořadí dne v měsíci,

M pořadí měsíce v roce

nebo

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right)$$

Měsíc	n pro i-ty den v roce	pro průměrný den datum	dokladná deklinace podle (a)	podle (b)
leden	1	17	-20,8	-20,9
únor	31 + j	16	-13,1	-12,9
březen	59 + j	16	-1,7	-2,4
duben	90 + j	15	9,7	9,4
květen	120 + j	15	19	18,8
červen	151 + j	11	23,1	23
červenec	181 + j	17	21,2	21,1
srpen	212 + j	16	13,7	13,4
září	243 + j	15	2,9	2,2
říjen	273 + j	15	-8	-9,6
listopad	304 + j	14	-18,3	-18,9
prosinec	334 + j	10	-22,9	-23

12

Statistický výpočet sluneční energie dopadající na libovolně orientovanou plochu

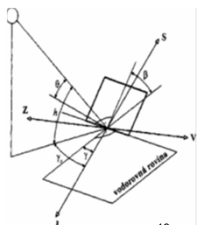
- úhel dopadu slunečních paprsků θ = úhel, který svírá normála osluněné plochy se směrem paprsků
- úhel dopadu slunečních paprsků θ na obecně orientovanou a skloněnou plochu

$$\cos \theta = \sin h \cos \beta + \cos h \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma)$$

$$= \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma)$$

kde

- h je výška slunce nad obzorem
- γ_s azimut slunce
- θ_z úhel slunečního zenitu
- β úhel sklonu



13

Přímé a difúzní sluneční záření

- Intenzita slunečního záření na plochu kolmou ke směru paprsků

$$G_{bn} = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{Z}{\varepsilon}\right)$$

kde

I_0 je sluneční konstanta

Z je souč. znečištění atmosféry

ε je souč. závislý na výšce

Slunce nad obzorem a
na nadmořské výšce místa

Měsíc	Průměrné měsíční hodnoty součinitele Z pro oblasti s rozdílnou čistotou ovzduší	venkov	města	průmyslové oblasti
I.	1,5	2,1	3,1	4,1
II.	1,6	2,2	3,2	4,3
III.	1,8	2,5	3,5	4,7
IV.	1,9	2,9	4	5,3
V.	2	3,2	4,2	5,5
VI.	2,3	3,4	4,3	5,7
VII.	2,3	3,5	4,4	5,8
VIII.	2,3	3,3	4,3	5,7
IX.	2,1	2,9	4	5,3
X.	1,8	2,6	3,6	4,9
XI.	1,6	2,3	3,3	4,5
XII.	1,5	2,2	3,1	4,2
roční $\bar{Z}$	1,9	2,75	3,75	5

14

Přímé a difúzní sluneční záření

Intenzita přímého záření na obecně položenou plochu

$$G_{dT} = G_{bn} \cdot \cos \theta \quad (\text{W/m}^2)$$

Intenzitu difúzního záření lze přibližně vypočítat

$$G_{dT} = 0,5 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot G_d + 0,5 \cdot r \cdot (1 - \cos \beta) \cdot (G_b + G_d)$$

kde

β je úhel sklonu osluněné plochy od vodorovné roviny,

r je reflexní schopnost okolních ploch pro sluneční paprsky (nejčastěji $r = 0,20$),

G_b je intenzita přímého slunečního záření na vodorovnou plochu

G_d je intenzita difúzního slunečního záření na vodorovnou plochu.

Přímé a difúzní sluneční záření dopadající na vodorovnou plochu

$$G_b = G_{bn} \cdot \sin h \quad G_d = 0,33 \cdot (I_0 - G_{bn}) \cdot \sin h \quad (\text{W/m}^2)$$

Intenzita celkového slunečního záření dopadající na obecnou plochu

$$G_T = G_{dT} + G_{dT} \quad (\text{W/m}^2)$$

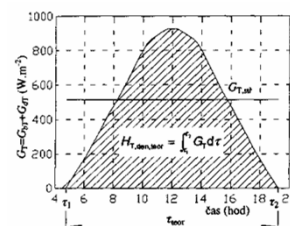
15

Energetický potenciál sluneční energie

Teoreticky možnou denní dávku ozáření

(množství dopadající energie) $H_{T,den,teor}$ je možné zjistit integrací intenzity slunečního záření G_T

$$H_{T,den,teor} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} G_T d\tau$$

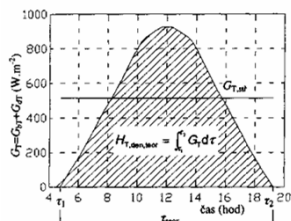


16

Energetický potenciál sluneční energie

Hodnota τ_{teor} je dána dvěma krajními hodnotami τ_1 a τ_2 pro které je v daný den výška Slunce nad obzorem $h = 0$ (východ a západ slunce)

$$\cos \tau_{1,2} = -\tan \delta \cdot \tan \phi$$



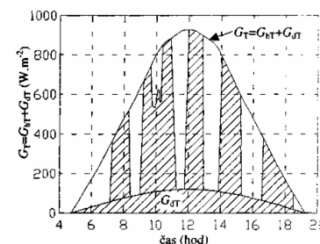
17

Energetický potenciál sluneční energie

- Během dne se však střídá jasná obloha s oblohou zataženou mraky, kdy dopadá jen difúzní záření.

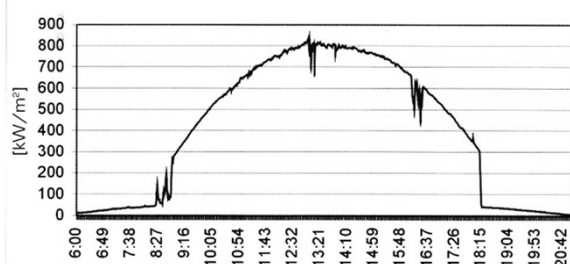
- poměrnou dobu slunečního svitu

$$\tau_r = \tau_{skut} / \tau_{teor}$$



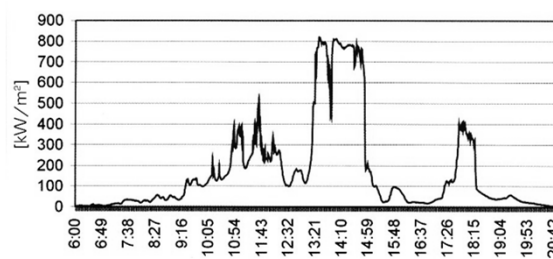
18

Intenzita slunečního záření během bezoblačného dne



19

Intenzita slunečního záření za dne s oblačností



20

Energetický potenciál sluneční energie

- střední intenzita slunečního záření

$$G_{T, \text{stf}} = \frac{1}{\tau_{\text{teor}}} \int_{\tau_1}^{\tau_2} G_T d\tau = \frac{H_{T, \text{den, teor}}}{\tau_{\text{teor}}}$$

- je důležitou veličinou ve výpočtech energetických zisků kolektorů slunečního záření.
- skutečná dávka ozáření dopadající na osluněnou plochu

$$H_{\text{den}} = \tau_r \cdot H_{\text{den, teor}} + (1 - \tau_r) \cdot H_{\text{den, dlf}} \quad (\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ den}))$$

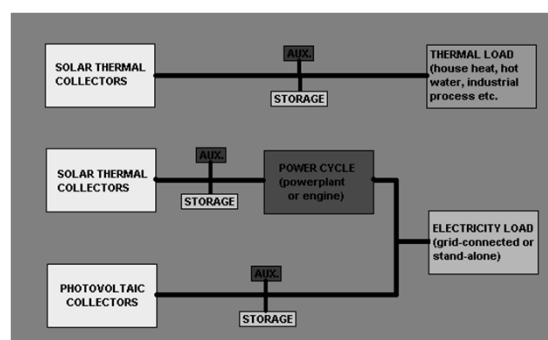
- za měsíc

$$H_{\text{měs}} = n \cdot \tau_r \cdot H_{\text{den, teor}} + n \cdot (1 - \tau_r) \cdot H_{\text{den, dlf}} = n \cdot H_{\text{den}}$$

kde n je počet dnů v měsíci.

21

Možnosti využití energie slunečního záření



22

Fototermální přeměna záření

- nejjednodušší cesta, jak využít sluneční záření a přeměnit jej v tepelnou energii
 - aktivní systémy - tepelná energie je odváděna z povrchu cíleně a transponována teplosnosnou látkou na jiné místo (většinou akumulátor tepla nebo přímo spotřebič),
 - pasivní systémy - tepelná energie je využívána přímo v místě výroby (vzniku) a není aktivně transponována

23

Aktivní systémy fototermální přeměny

Jednotlivé typy kolektorů definovány v ČSN EN ISO 9488.

- Solární kolektor, solární tepelný kolektor: zařízení určené k pohlcení slunečního záření a jeho přeměně na tepelnou energii, která je předávána látce, protékající kolektorem.
- Kapalinový tepelný kolektor: sluneční kolektor, ve kterém je používána kapalina jako teplosnosná látka.

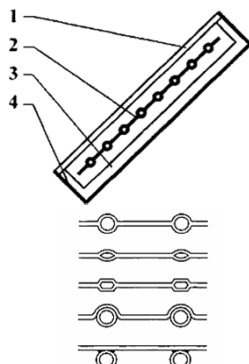
24

Kapalinové tepelné kolektory

- Dopadající energie slunečního záření se zachycuje kolektorem slunečního záření a odvádí teplotonosnou látkou

- 1 zasklení
- 2 absorpční plocha - absorbér
- 3 zadní tepelná izolace
- 4 rám kolektoru

Různé typy absorbérů



25

Kapalinové tepelné kolektory slunečního záření

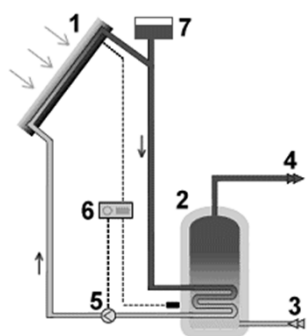
- u nás i ve světě nejběžnější aplikace v solárních systémech pro ohřev vody

■ hlavní typy

- a) vakuové trubkové
- b) vakuové ploché
- c) ploché kolektory pro celoroční využití
- d) ploché kolektory bez transparentního krytu - absorbéry

26

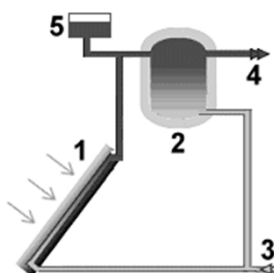
Dvouokruhový kapalinový solární systém pro celoroční přípravu teplé vody



1. solární kolektor
2. tepelný výměník
3. přívod studené vody
4. odběr teplé vody
5. oběhové čerpadlo
6. automatická regulace
7. expanzní nádoba

27

Jednookruhový kapalinový solární systém pro sezónní využití



1. solární kolektor
2. zásobník teplé vody
3. přívod studené vody
4. odběr teplé vody
5. expanzní nádoba

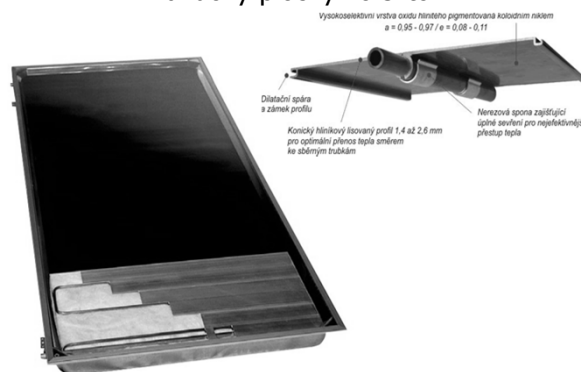
28

Vakuový trubkový kolektor



29

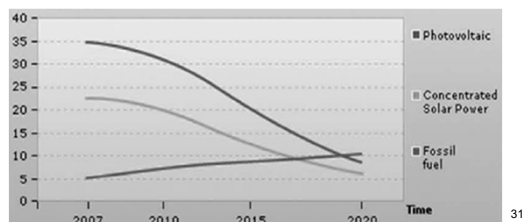
Vakuový plochý kolektor



30

Fototermální elektrárny

- v současnosti extrémní rozvoj
- 3,85 GW v r. 2013, 5,6 GWe ve výstavbě nebo ve fázi příprav
- nejvíce Španělsko (celkem 2,3 GWe + projekty) USA (1,325 + projekty)
- stále snižování ceny za vyrobenou energii (€/kWh):



31

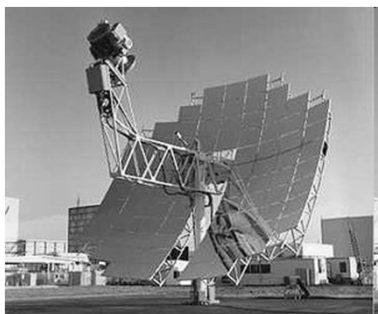
Fototermální elektrárny – typy

- parabolické koncentrační** – parabola směřuje paprsek do jednoho bodu, kde je umístěn vhodný „přijímač“ schopný transformace tepelné energie, nejčastěji Stirlingův motor, ale může být nainstalován i tepelný výměník s výrobou páry
- zrcadlové „power tower“**, také „**heliostat**“ – systém plochých natačivých zrcadel, které odrazí sluneční paprsky na vrchol věžového kolektoru. Výhody: lze dosáhnout vysoké teploty (a lepší účinnost), není nutnost velkých zemních úprav-věž může stát na kopci. Nevýhody: nutnost dvouosého natačení samostatně pro každé zrcadlo.
- parabolický žlab** – v ohnisku je trubka s teplotnosným médiem, které se ohřívá – obvykle termolej, nebo roztavená sůl, popř. i pára. Nátáčení jen v jedné ose, která je společná pro celou řadu („žlab“) parabol
- lineární reflektor s Fresnelovými čočkami (LFR)** – systém podobný žlabové parabole, ale se zrcadlem a koncentrační Fresnelovou čočkou. Výhody – lehčí (a levnější) konstrukce, trubka s teplotnosným médiem může být společná pro víc řad zrcadel. Nevýhody: stínění paprsků sousedními řadami zrcade

32

Parabolické koncentrační fotoelektrárny

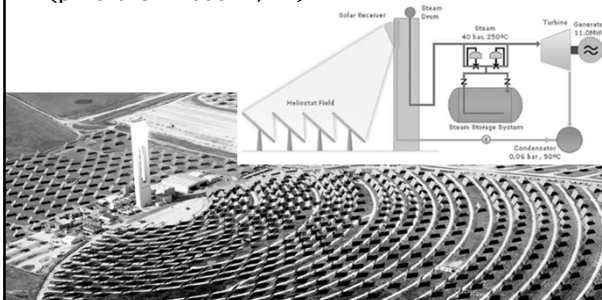
- jižní Kalifornie, USA: Stirlingův motor, 82 zrcadel, plocha celkem 88 m². Při ozáření 1000 W/m² výkon 25 kW, tj. účinnost 28 %.



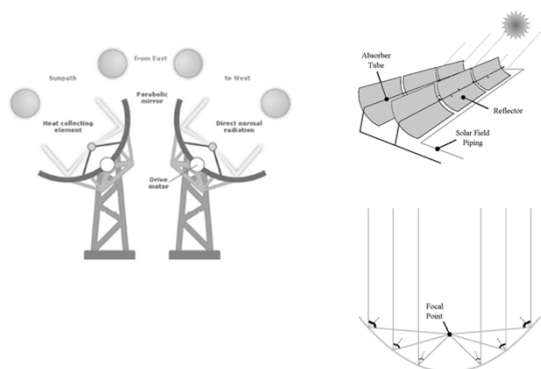
33

Systém „power tower“

- PS10, Sevilla, Španělsko: 624 natačivých zrcadel, každé 120 m²; věž 115 m, pára 50 bar, 285 °C. Elektrický výkon 11 MW, celková účinnost cca 15 % (při ozáření 1000 W/m²)

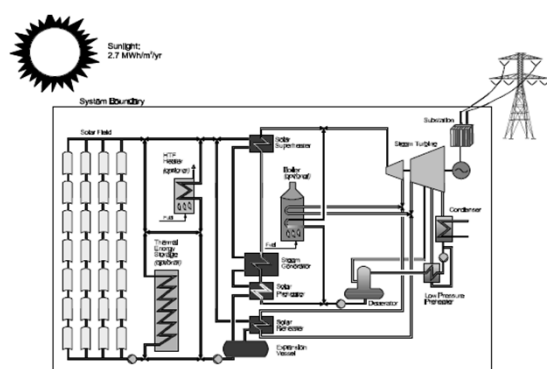


Systém parabolický žlab – „parabolic trough“



35

Systém parabolický žlab – „parabolic trough“



36

Systém parabolický žlab – „parabolic trough“

- SEGS I-IX: Mohavská poušť, USA; instalovaný výkon 354 MW, průměrná celková produkce 75 MWe, tj. časové využití 21%. Parabolická zrcadla s automatickým nastavováním. Primární okruh termoolej 300-400°C, sekundární voda-pára. 340 slunečných dnů v roce.

SEGS plant history and operational data

Plant	Year built	Location	Net turbine capacity (MW)	Field area (m ²)	Oil temperature (°C)	1996 Gross solar production of electricity (MWh)	average 1998-2002
SEGS I	1984	Daggett	14	82,960	307	19,900	16,500
SEGS II	1985	Daggett	30	165,376	316	36,000	32,500
SEGS III	1986	Kramer Jct.	30	230,300	349	64,170	68,555
SEGS IV	1986	Kramer Jct.	30	230,300	349	61,970	68,278
SEGS V	1987	Kramer Jct.	30	233,120	349	71,439	72,879
SEGS VI	1988	Kramer Jct.	30	188,000	391	71,409	67,758
SEGS VII	1988	Kramer Jct.	30	194,280	391	70,138	65,048
SEGS VIII	1989	Harper Lake	80	464,340	391	139,174	137,990
SEGS IX	1990	Harper Lake	80	483,960		141,916	125,036

Sources: Solargenix Energy,^[4] KJC Operating Company,^[5] IEEE,^[6] NREL^[7]

37

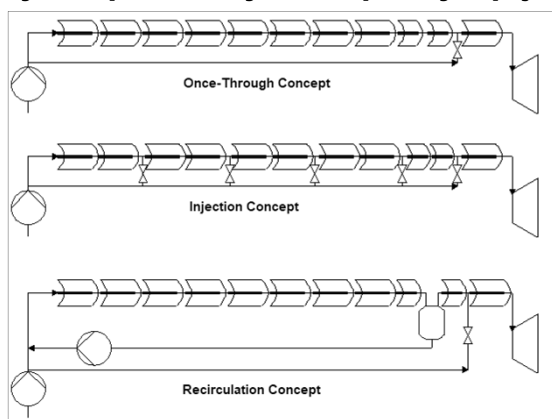
Systém parabolický žlab – „parabolic trough“

- SEGS – celkem 936 384 zrcadel, plocha cca 6,5 km². Foto – bloky III-VI



38

Systém parabolický žlab – způsoby zapojení



Fresnelův reflektor

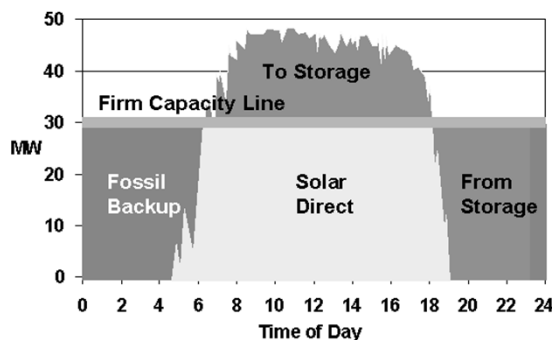
- zatím ve stádiu prototypů, demonstrační projekt ukončen v Belgii (Solarmundo), v provozu New South Wales, Australia. V plánu je výstavba v Kalifornii, předpokládáný instalovaný výkon 177 MW, ve Španělsku (Gottarendura), 10 MW



40

Fototermální elektrárny – řešení

- Hlavním problémem je pokrytí výroby v noci a času bez slunečního záření – kombinace akumulace a hybridních systémů



Fototermální elektrárny v provozu

Capacity (MW)	Technology type	Name	Country	Location	Notes
354	parabolic trough	Solar Energy Generating Systems	USA	Mojave desert California	Collection of 9 units
392	solar power tower	Ivanpah Solar Power Facility	USA	San Bernardino, California	Completed 2/2014
200	parabolic trough	Solaben Solar Power Station	Spain	Lagrosán	Completed 11/2008
150	parabolic trough	Solnova Solar Power Station	Spain	Sanlúcar la Mayor	Completed 9/2010
20	power tower	PS20 solar power tower	Spain	Seville	Completed 4/2009

42