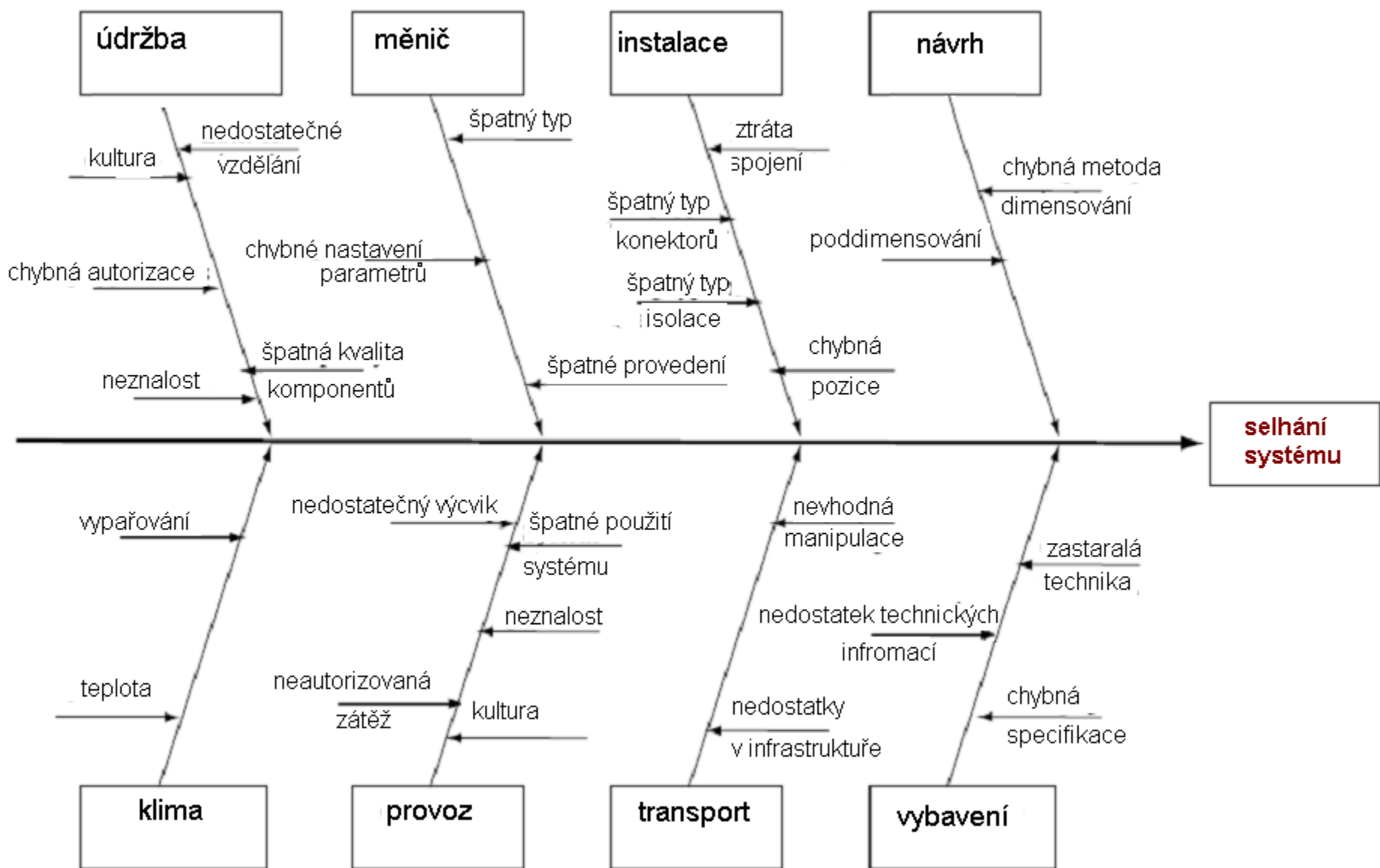
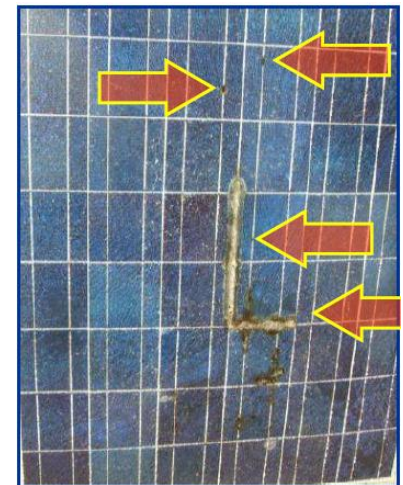
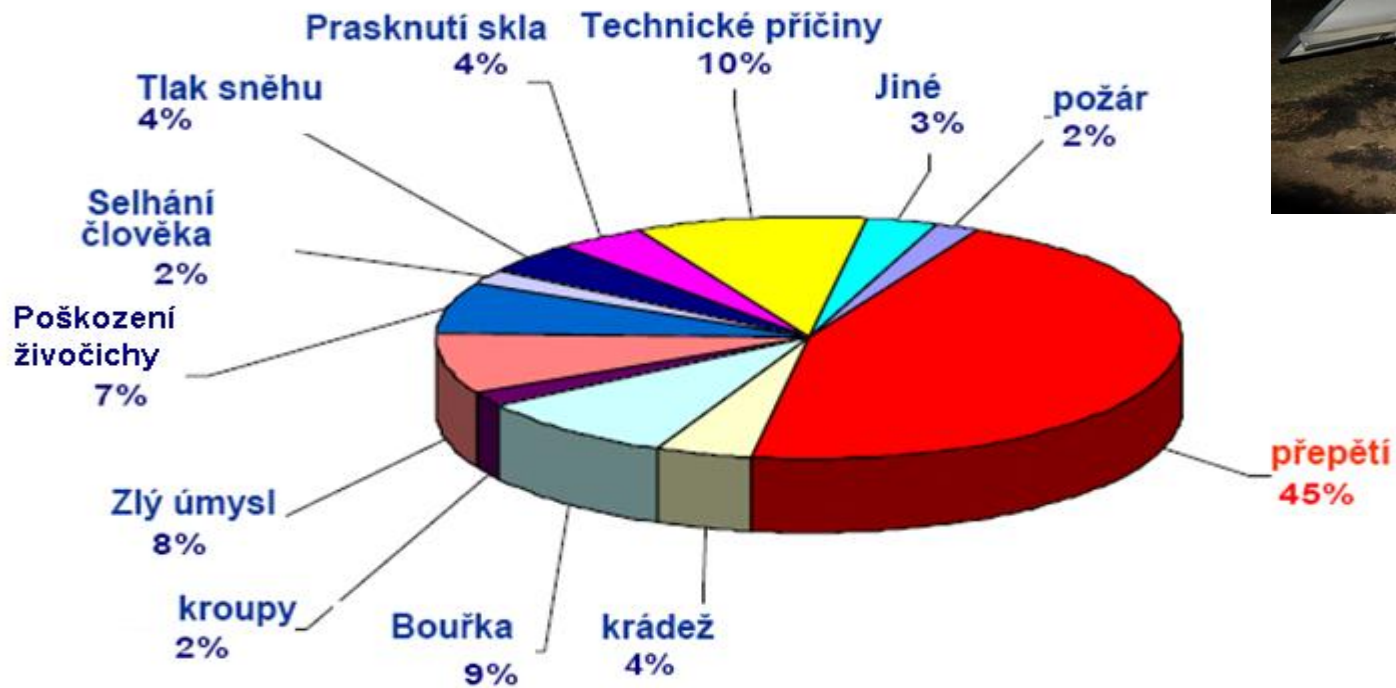


Provozní spolehlivost fotovoltaických systémů



Statistika škod na fotovoltaických systémech dle četnosti příčin



Spolehlivost se vyjadřuje obvykle pomocí bezporuchovosti, tj. schopnosti zařízení plnit požadovanou funkci po stanovenou dobu t za stanovených podmínek bez poruchy.

- pravděpodobnost poruchy $F(t)$
- pravděpodobnost bezporuchového provozu $P(t) = 1 - F(t)$
- hustotou poruch $f(t) = dF(t)/dt$
- intenzitou poruch $\lambda(t) = f(t)/P(t)$.

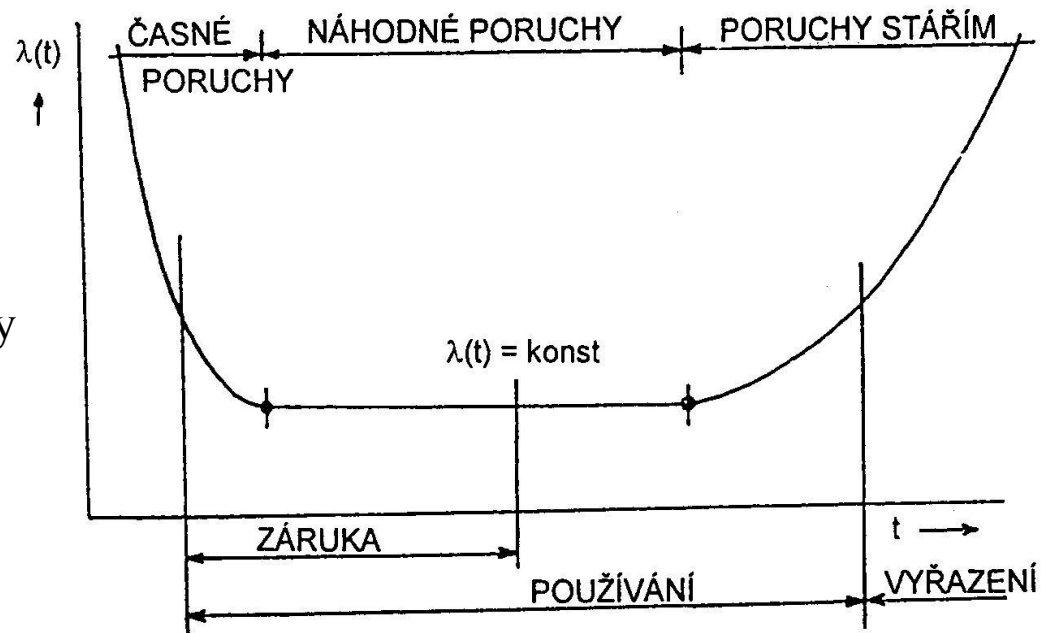
Intenzita poruch

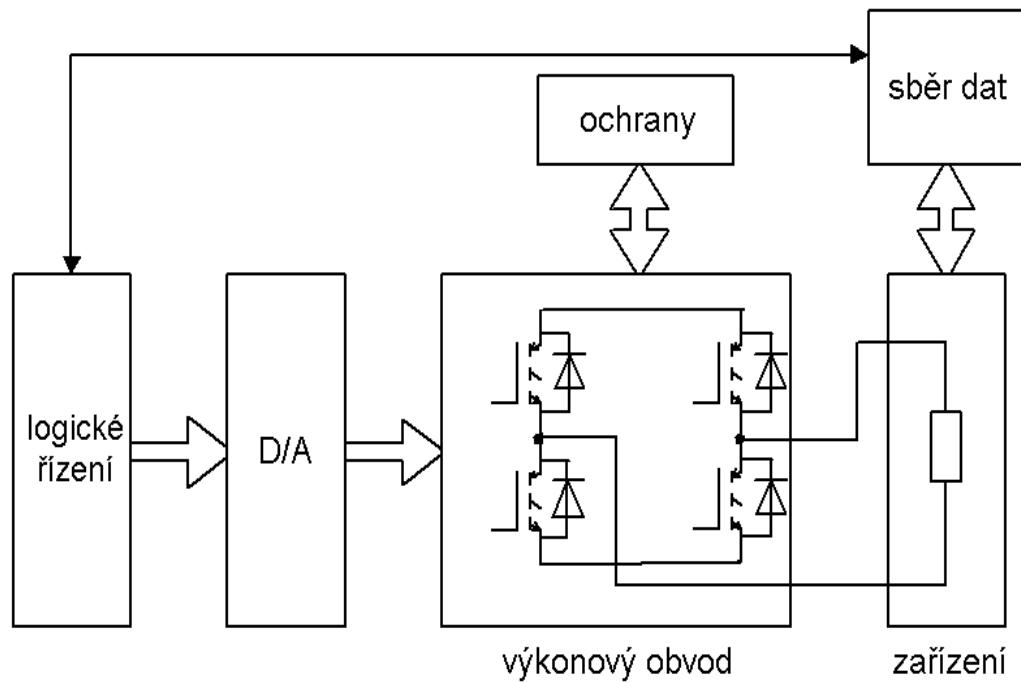
$$\lambda(t) = -\frac{1}{P(t)} \frac{dP(t)}{dt}$$

slouží nejčastěji k posuzování kvality a spolehlivosti výrobků

$$[\lambda] = 1 \text{ fit} = 10^{-9}/\text{h}$$

Střední doba mezi poruchami $1/\lambda(t)$.





V zařízení je výsledná intenzita poruch součtem intenzit poruch jednotlivých částí.

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

Na poruchovost měničů má vliv řada faktorů, které je možno rozdělit na:

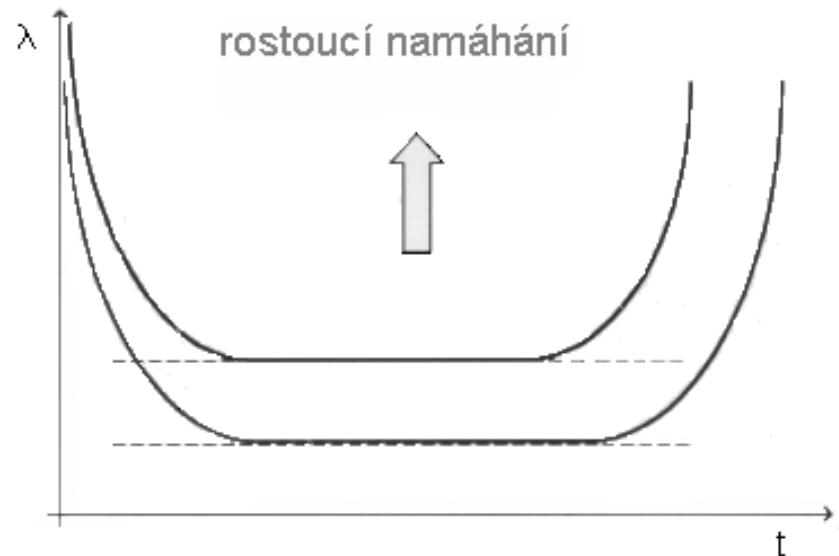
- **vlivy vnitřní** - zde se projevuje vliv konstrukce, použitých materiálů, výrobních a montážních technologií

- **vlivy vnější** - projevuje se zde vliv montáže a vliv provozních podmínek

Při provozu jsou součástky namáhány

- elektrickým polem
- mechanicky
- tepelně
- vlivem prostředí

S rostoucím namáháním roste intenzita poruch



Při provozu součástek dochází postupně ke stárnutí, změně parametrů a nakonec k poruše součástky vlivem řady mechanismů.

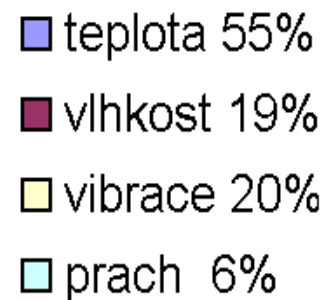
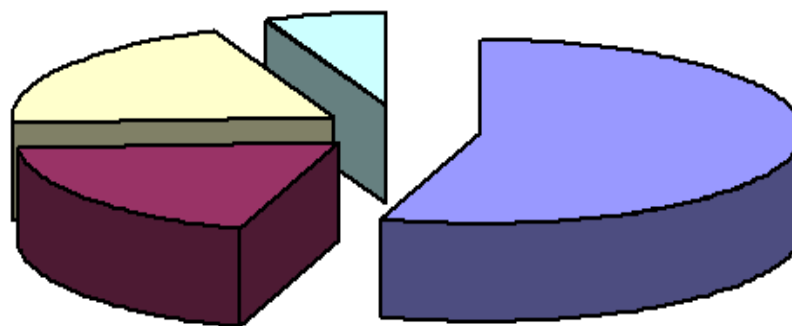
Jedním z nejzávažnějších vlivů je teplotní zatížení.

Při dlouhodobém teplotním zatížení je mezi intenzitou poruch (v oblasti konstantní intenzity poruch) a teplotou součástky vztah

$$\lambda = \exp(A + B \cdot T)$$

Zrychlení průběhu degeneračních fyzikálně-chemických procesů s rostoucí teplotou má za následek zvýšení intenzity poruch

Kromě teploty má na rychlost degradačních procesů značný vliv reaktivita okolního prostředí.



Hlavní typy poruch

Typ poruchy	Možný vliv na VA charakteristiku
Koroze	Nárůst R_s → snížení FF
Přerušení spojů článků, zlomené články	Nárůst R_s , zlomy na charakteristice → snížení FF, efekt podobný částečnému stínění
Snížení transparentnosti krycích vrstev	Snížení maximálního výkonu
- Znečištění povrchu	Snížení FF, částečné stínění
- Prach	Snížení maximálního výkonu
- Zabarvení plastových vrstev	Snížení maximálního výkonu, snížení FF, Částečné stínění
Nepřizpůsobení	Snížení FF
Stárnutí materiálů (struktura PV článků)	Snížení maximálního výkonu, snížení FF
Potential Induced Degradation (PID)	Snížení maximálního výkonu, snížení FF

Materiálové – vznikají chybou materiálového charakteru

Krystalické defekty:

Bodové poruchy:

Vakance

Intersticiální částice

Čarové poruchy:

Dislokační čáry - hranová

- šroubová

Plošné a objemové poruchy

Procesní – vznikají chybou mechanického nebo jiného charakteru

- mechanické poškození**
- nehomogenita difúzní vrstvy**

Degradace materiálů vlivem provozních podmínek

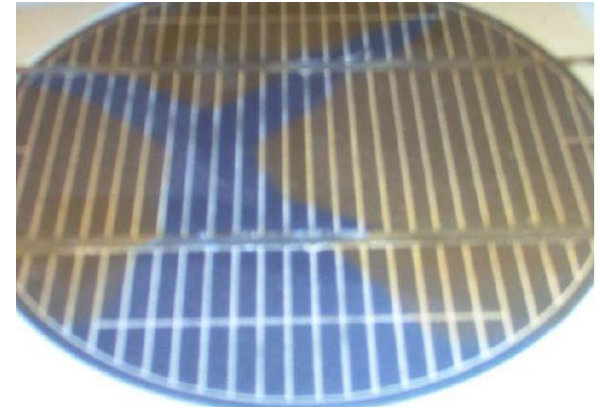
- LID (Light Induced Degradation)
- PID (Potential Induced Degradation)

LID (Light Induced Degradation)

Vlivem prostředí dochází ke stárnutí a následně k poklesu účinnosti

pokles transparentnosti skla

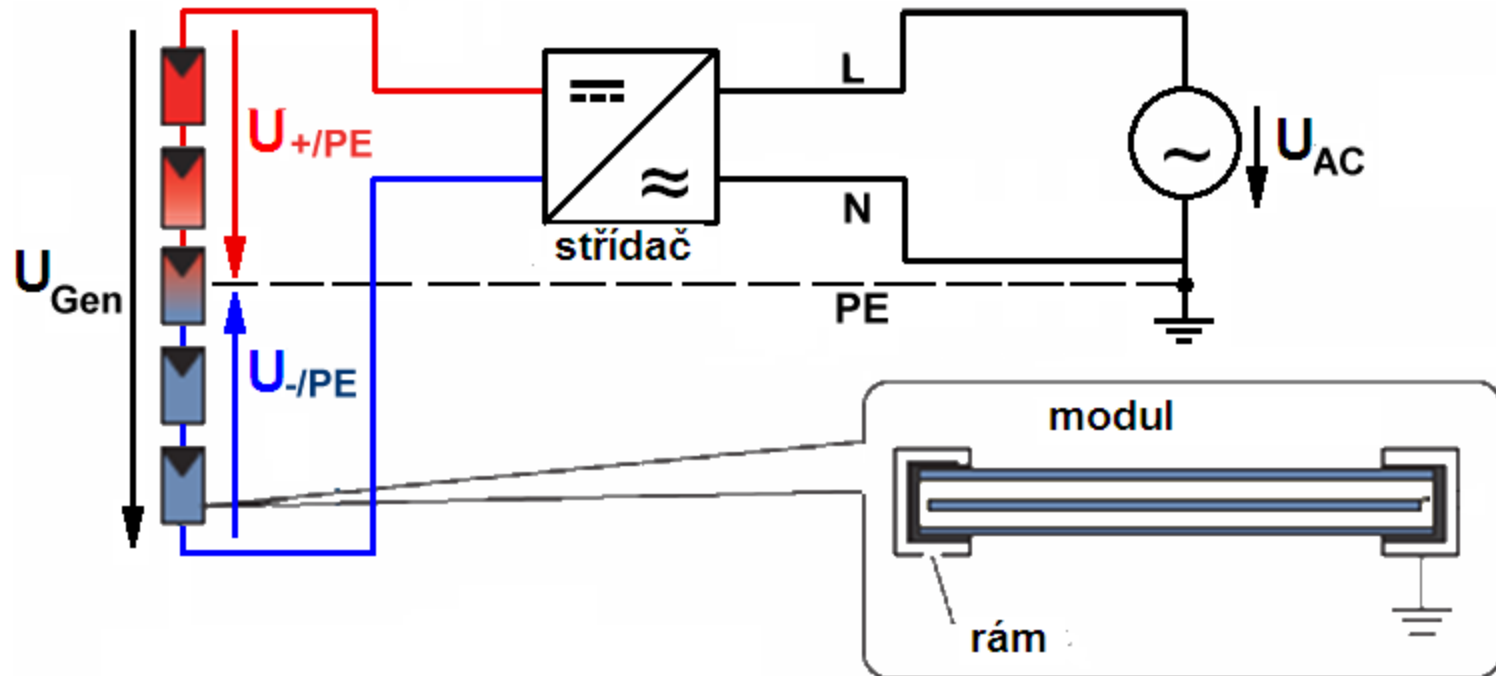
pokles transparentnosti EVA (hnědnutí)



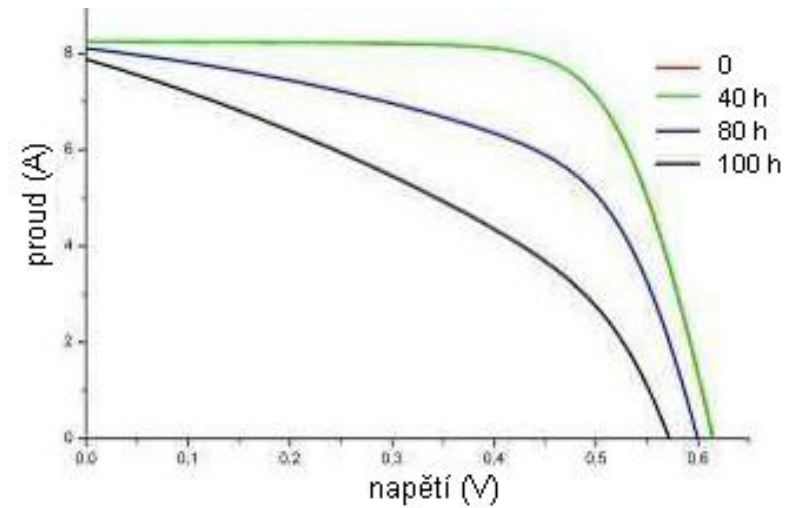
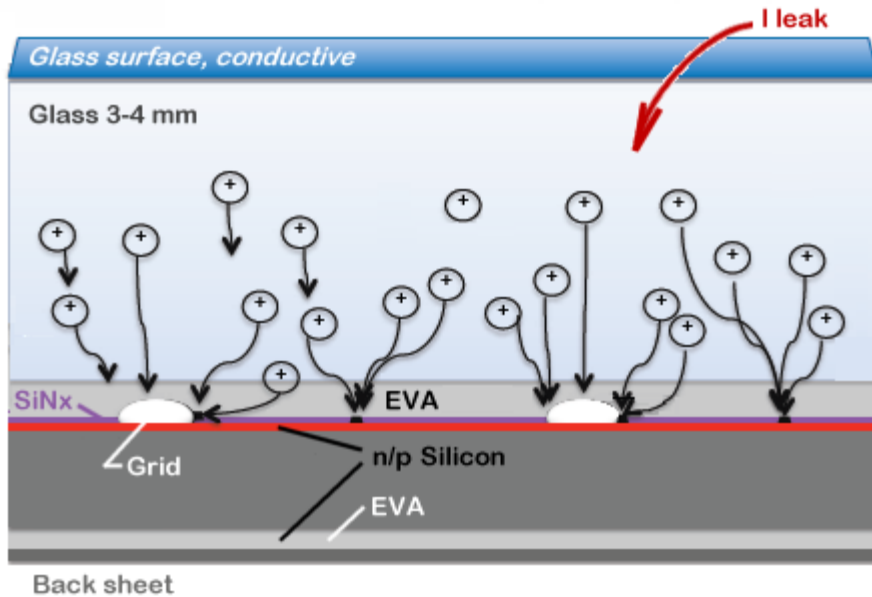
Generace rekombinačních center

- Si typu P vytváření BO komplexů
- Zvýšení rekombinace na rozhraní vrstev u tenkovrstvých struktur (Stabler-Wronski efekt)

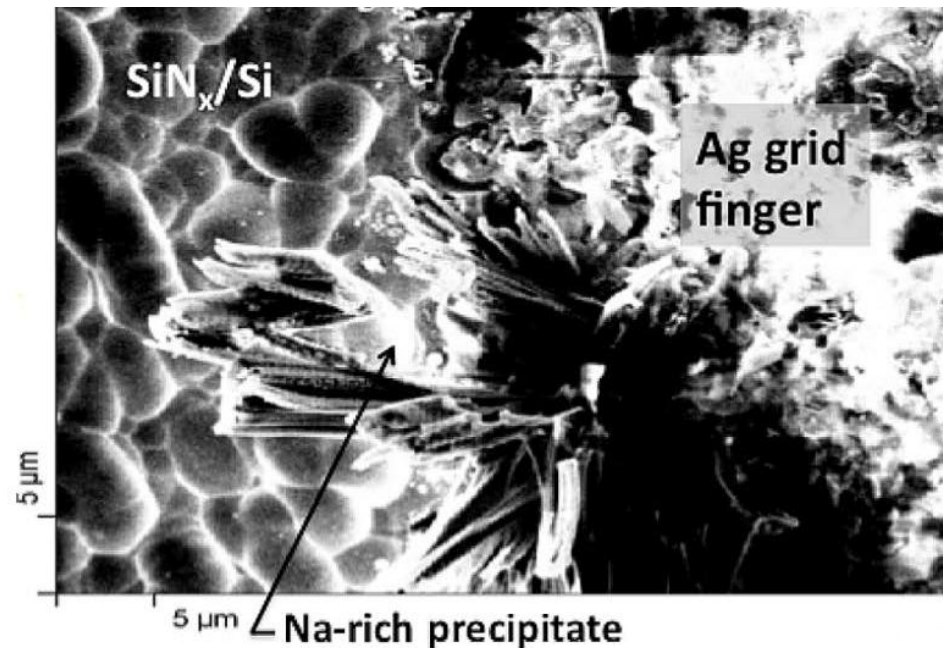
V případě použití beztransformátorových střídačů je část řetězce (fotovoltaického pole) polarizována vůči zemi kladně, část záporně.



U modulů polarizovaných záporně vůči zemi může dojít k degradaci parametrů



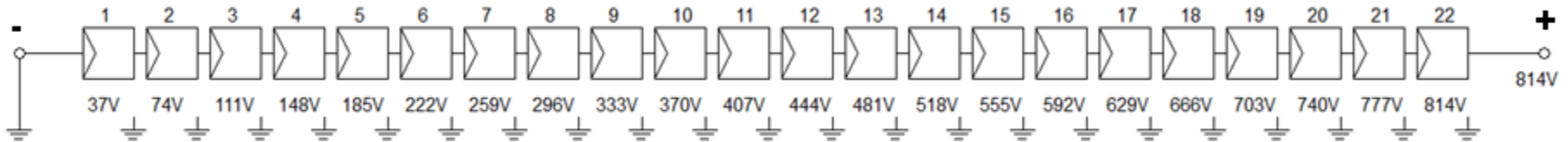
Sodíkové ionty nabíjejí povrch článků a pronikají antireflexní vrstvou



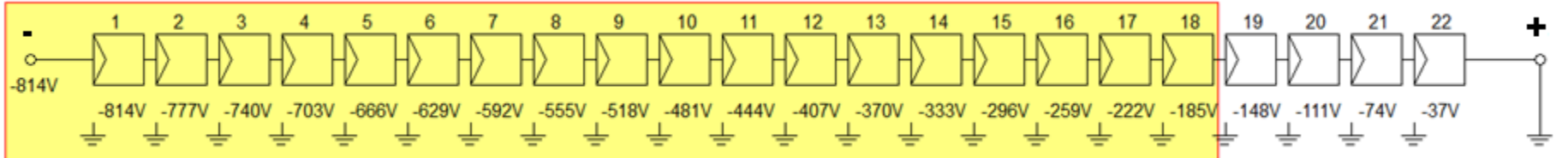
Podmínky pro vznik PID

- Hlavní je dostatečné napětí mezi rámem a články

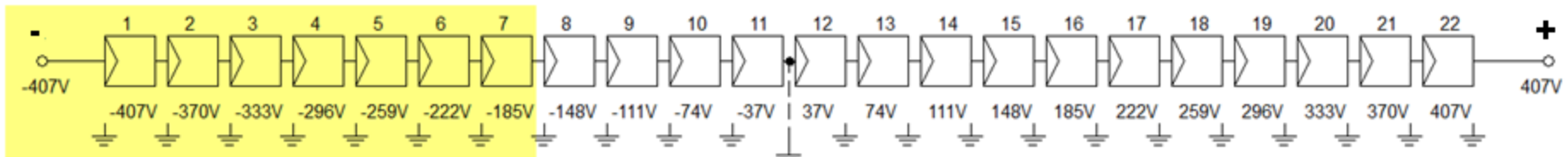
Měnič s transformátorem – uzeměný -



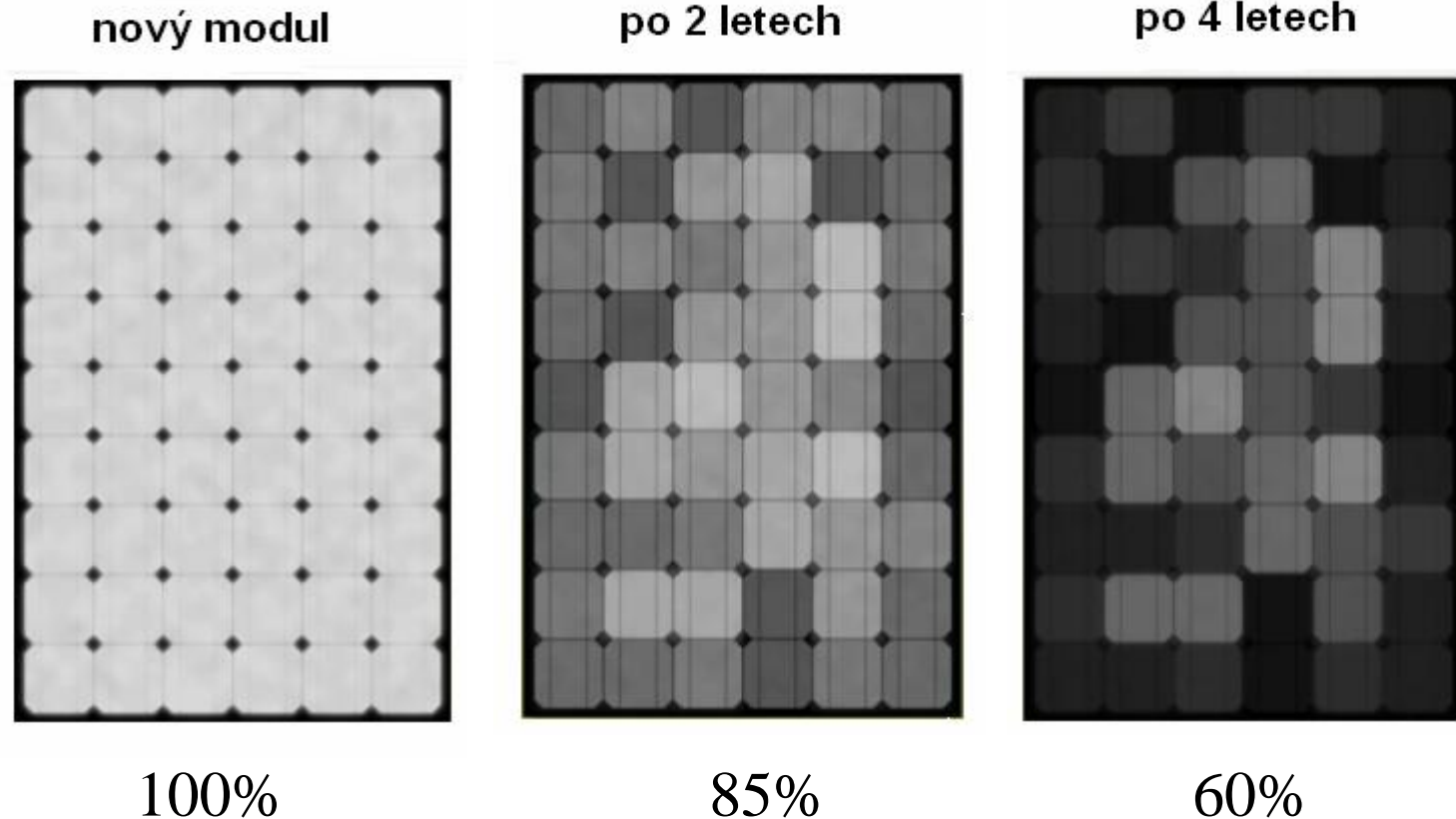
Měnič s transformátorem – uzeměný +



Měnič bez transformátoru

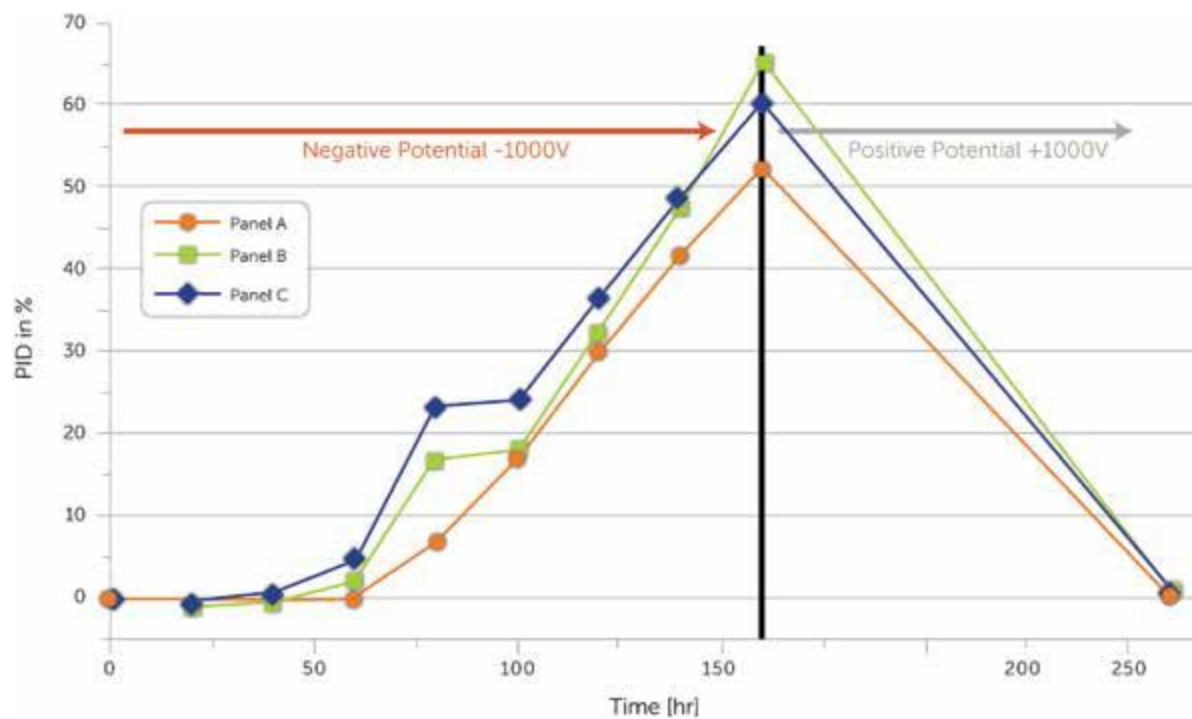


Pokles výkonu vlivem PID



Pokles výkonu se projevuje zejména u modulů, kde na přívodech je trvale záporné napětí vůči zemi

Možnost regenerace napětím opačné polarity



35 MW_p FV elektrárna Vepřek



- 186 960 panelů (185W_p and 190W_p) Phonosolar
- 3300 SMA 10 kW a 11 kW střídačů v řetězové konfiguraci
- 26 transformátorů z 0.4kV na 22kV
- 1 transformátor 22 kV na 110 kV VVN

Procedúra pro nalezení a odstranění závad

- Závada na FV modulu
- Závada zapojení (konektory, rozvaděče, vedení)
- Závada invertoru (případně monitorovacího systému)

A) Systém sběru dat

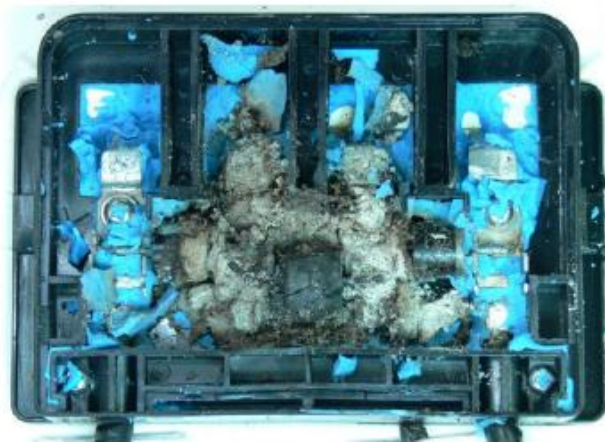
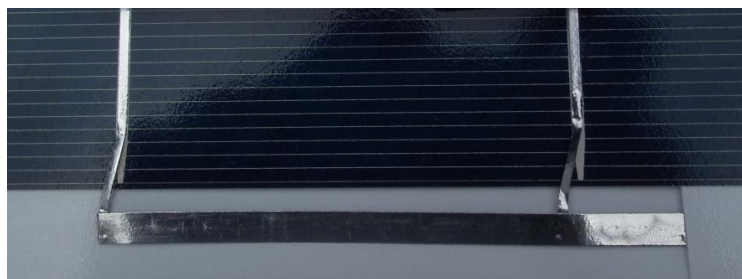
- Ukazuje chování všech invertorů (všech řetězců)
- Relativní pokles výkonu invertoru

- Příklad:
 - Inverter '2000760653'
SN: 2000760653
Generator: 11,9 kWp
Total yield: 20,97 kWh
Specific yield: 1,76 kWh/kWp
deviation >8% (8,7%)

Přesná lokalizace problémové části

B) Visuální kontrola odpovídající části FV pole

- Rozpojený modul, chybějící nebo poškozený modul, stínící překážka, poškozená svorkovnice, atd.



Vlivem koroze dochází
k růstu přechodových
odporů kontaktů
(konektory)



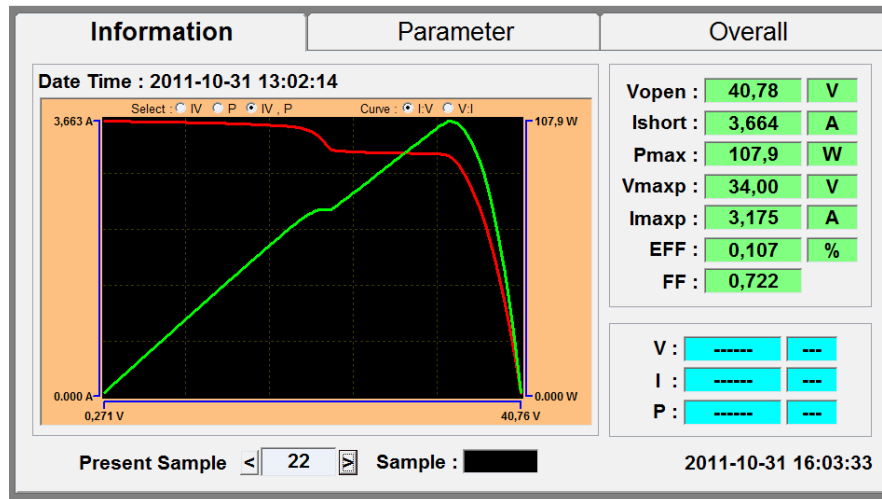
C) Kontrola rozvaděče (pojistky, přepět'ové ochrany)

D) Kontrola vadného řetězce

- Měření V-A charakteristiky
- Měření párů modulů (stanovení vadného konektoru)

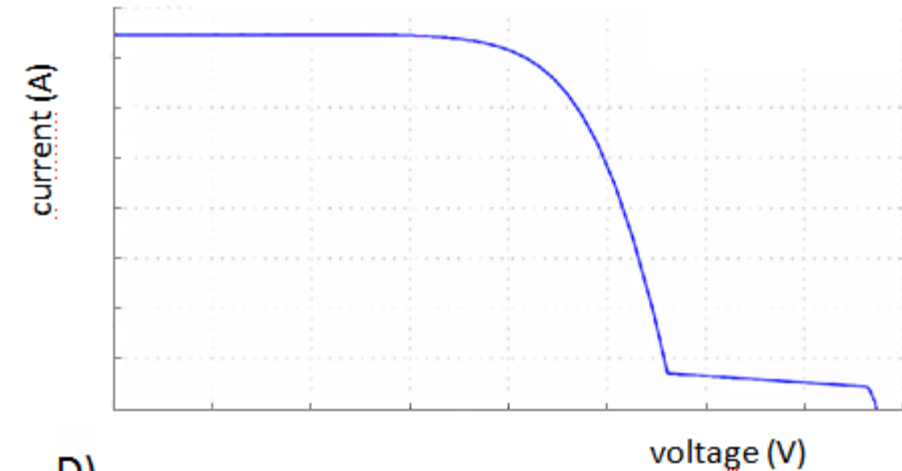
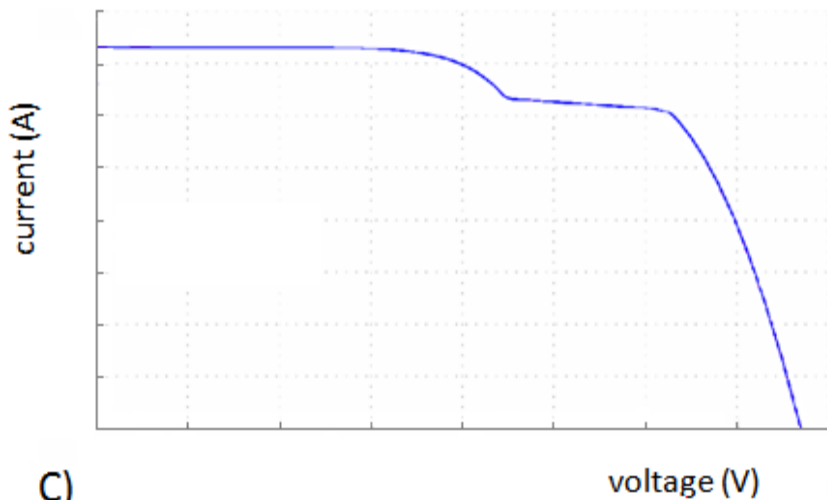
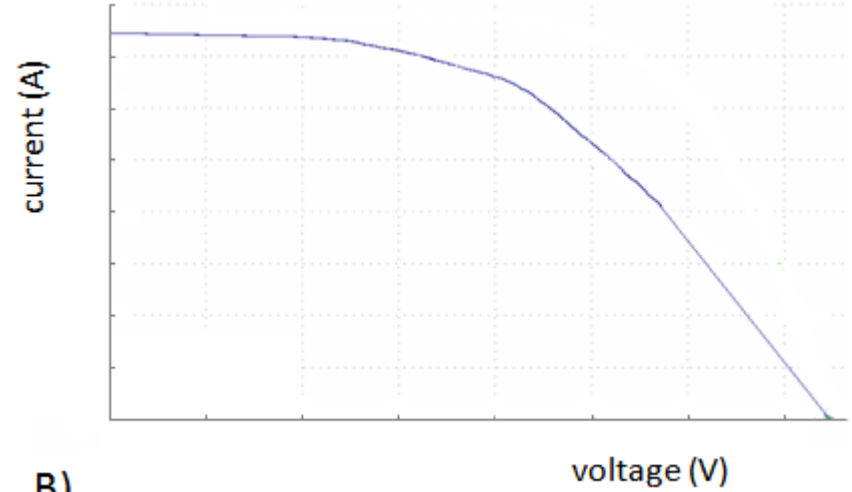
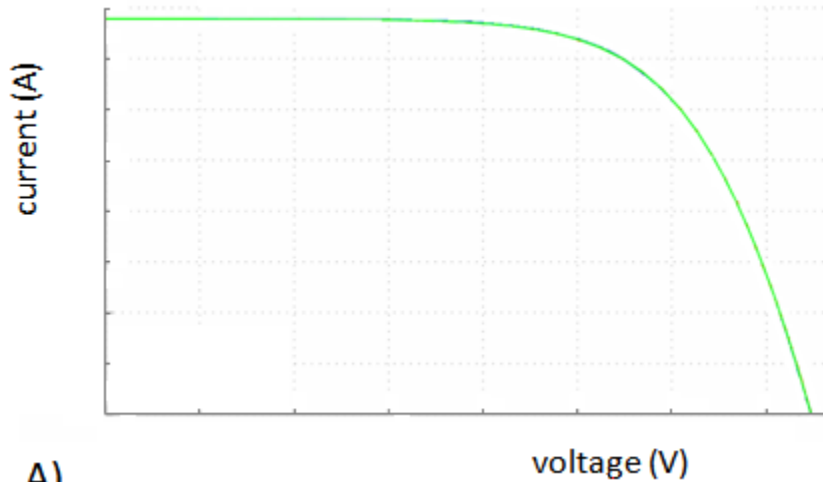
Měření solárním analyzátozem

- +Možnost použití v místě instalace
- +Neuplatňují se paměťové efekty
- Malá přesnost
- Problematické vyhodnocení
- Potřeba bezmračné oblohy



Pro přesnější vyhodnocení je třeba laboratorní měření

E) Kontrola V-A charakteristiky



A)

A) „Normální“ V-A charakteristika

C) Zlomené nebo částečně zastíněné články

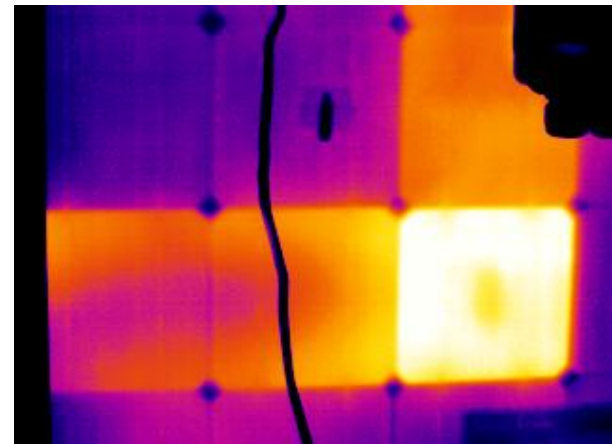
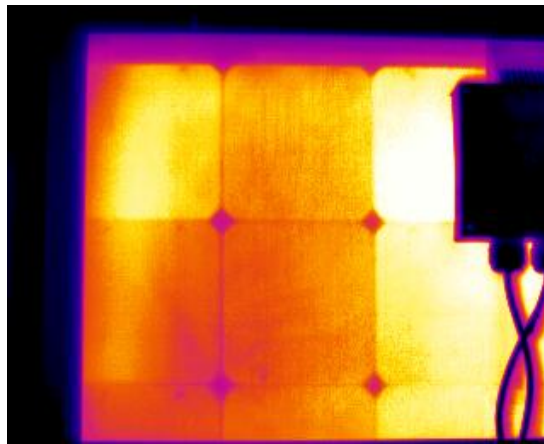
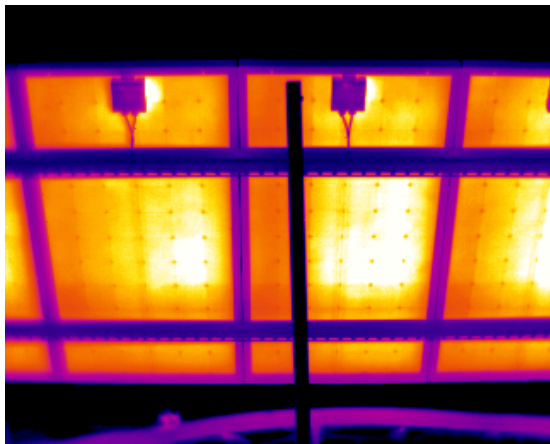
B)

B) Nárůst sériového odporu

D) Přerušovaný řetězec článků nebo úplně zastíněný článek

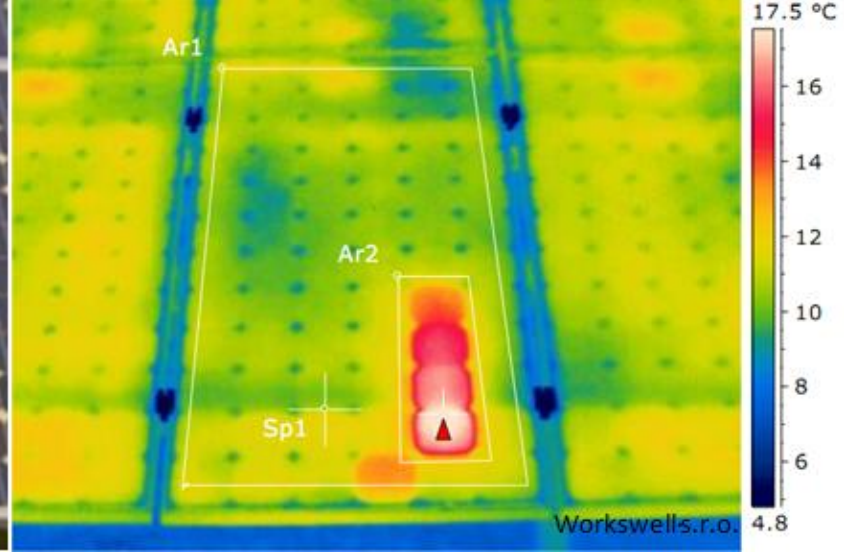
F) Kontrola rozložení teploty

- Na modulech - místa se zvýšenou teplotou buď nepracují, nebo jsou přetěžována
- "horké místo" ukazuje na možnou poruchu

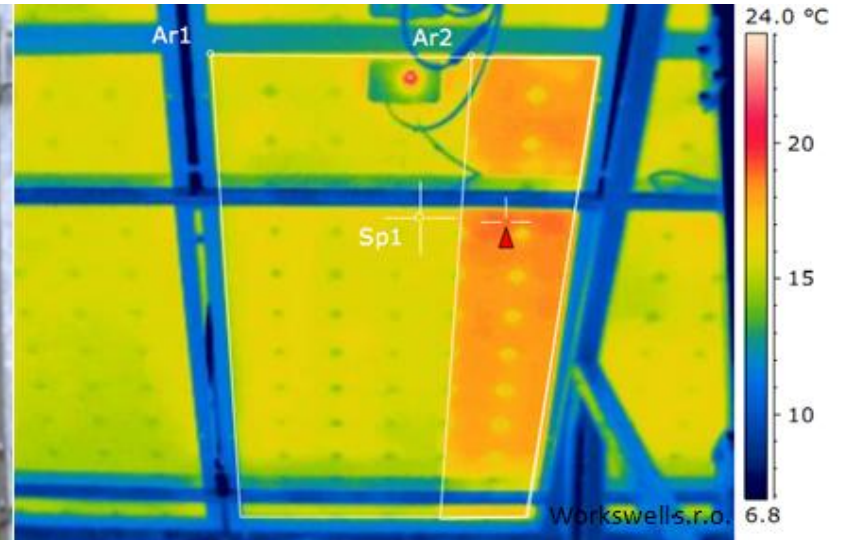


Kontrola pomocí termovizních systémů je nedestruktivní a rychlá

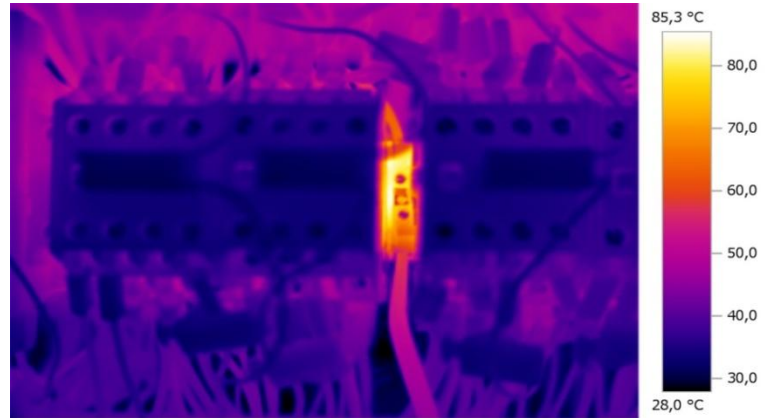
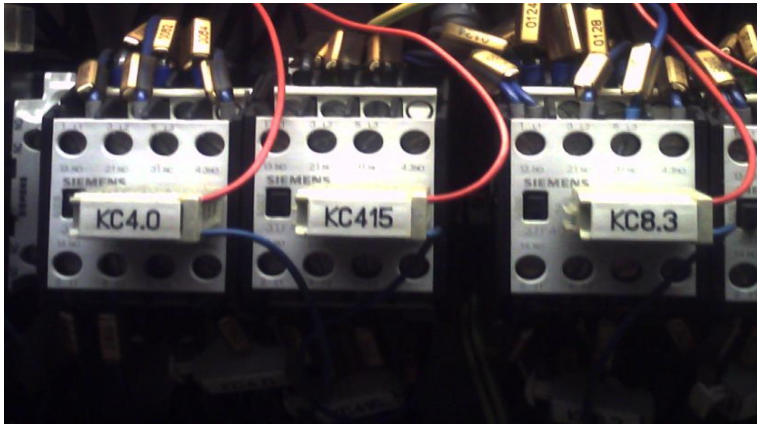
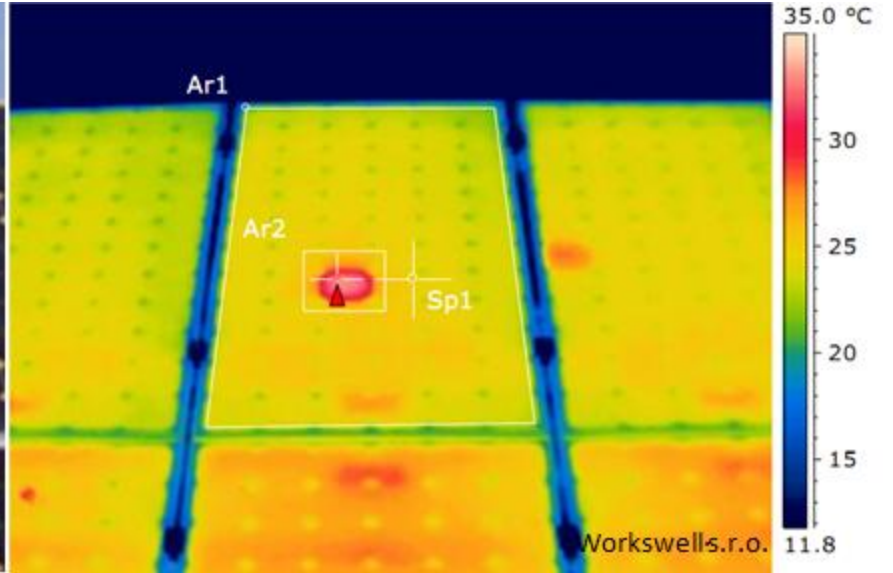
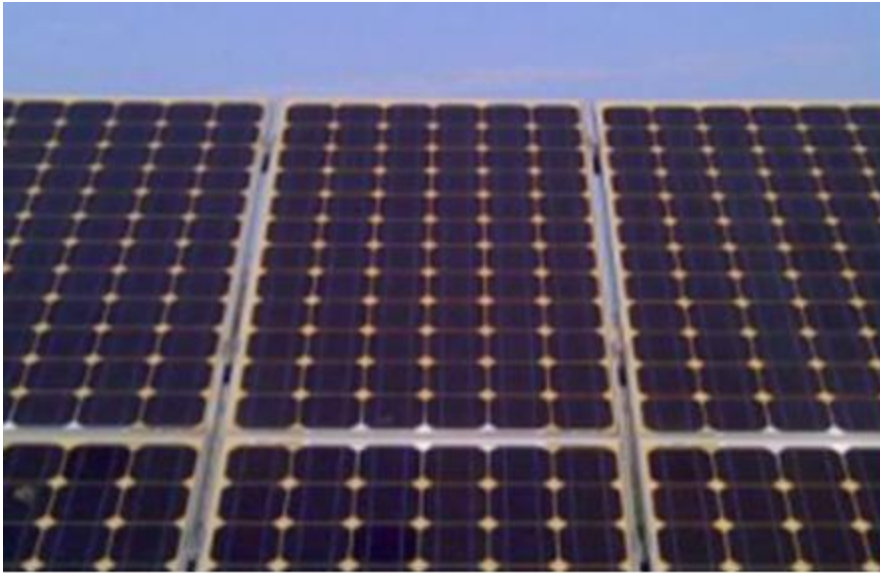
Lokality s indikovanou nehomogenitou teploty mohou být podrobněji zkoumány (případně provedena výměna modulů)



Vadný řetězec, projevuje se horkým místem



Vadný řetězec, ve svorkovnici je přetěžována překlenovací dioda



Vadné části (moduly, střídače, konektory apod.) je třeba vyměnit v co nekratším čase, aby se minimalizovaly ztráty

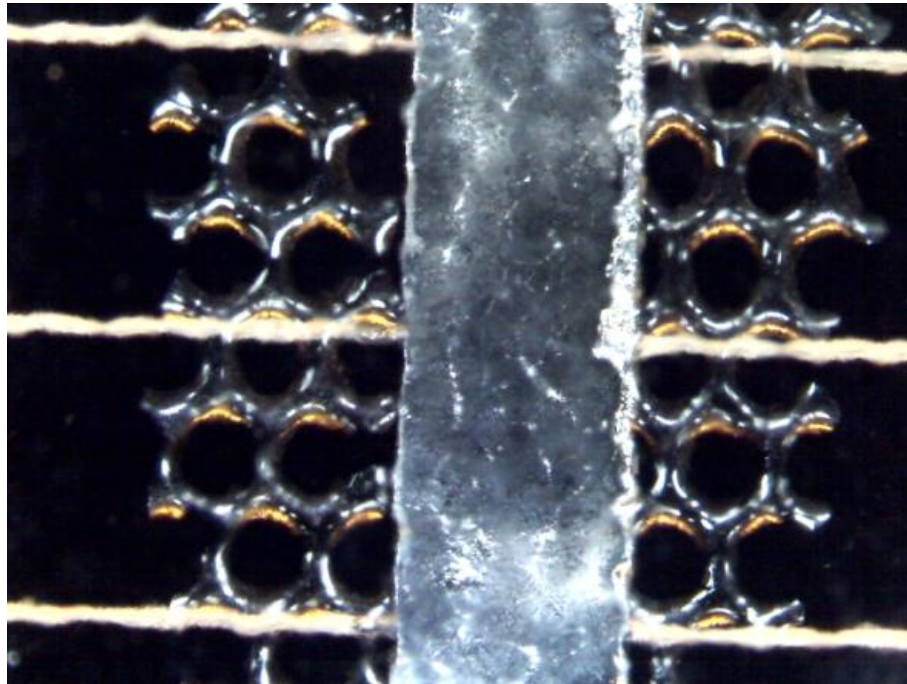
Poté je třeba moduly podrobit detailnímu zkoumání s cílem zjištění příčiny poruchy – případná reklamační řízení

- pečlivá vizuální kontrola (případně s pomocí digitálního mikroskopu)
- měření VA charakteristiky pomocí simulátoru
- hledání mechanických poruch a dalších nehomogenit pomocí elektroluminiscence nebo luminiscence mikroplazmy

Vytváří se rovněž zpětná vazba s výrobcí a montážními firmami

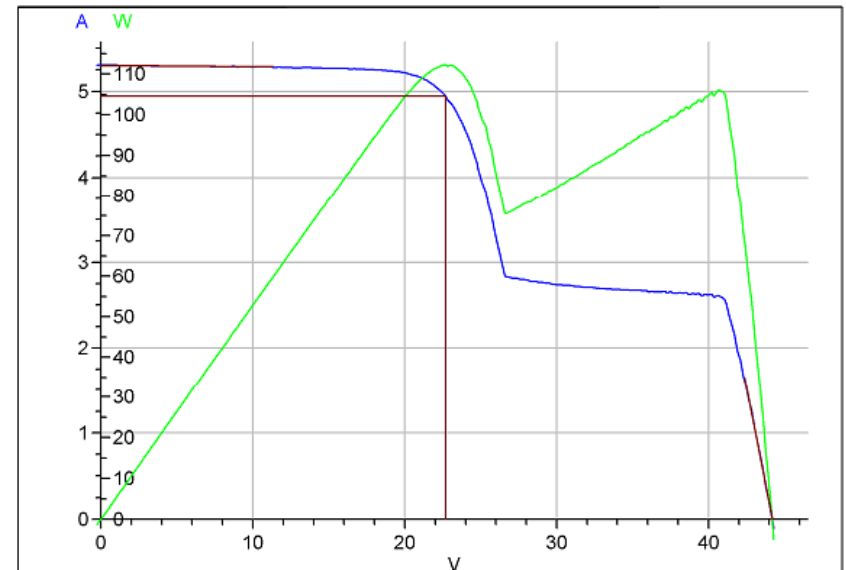
Vizuální kontrola modulů

- Podceňovaná, ale nezbytná
- Součást typových zkoušek
- Kontrola čitelnosti štítků
- Prasklé články
- Chyby laminace
- „Šnečí poruchy“
- a další...

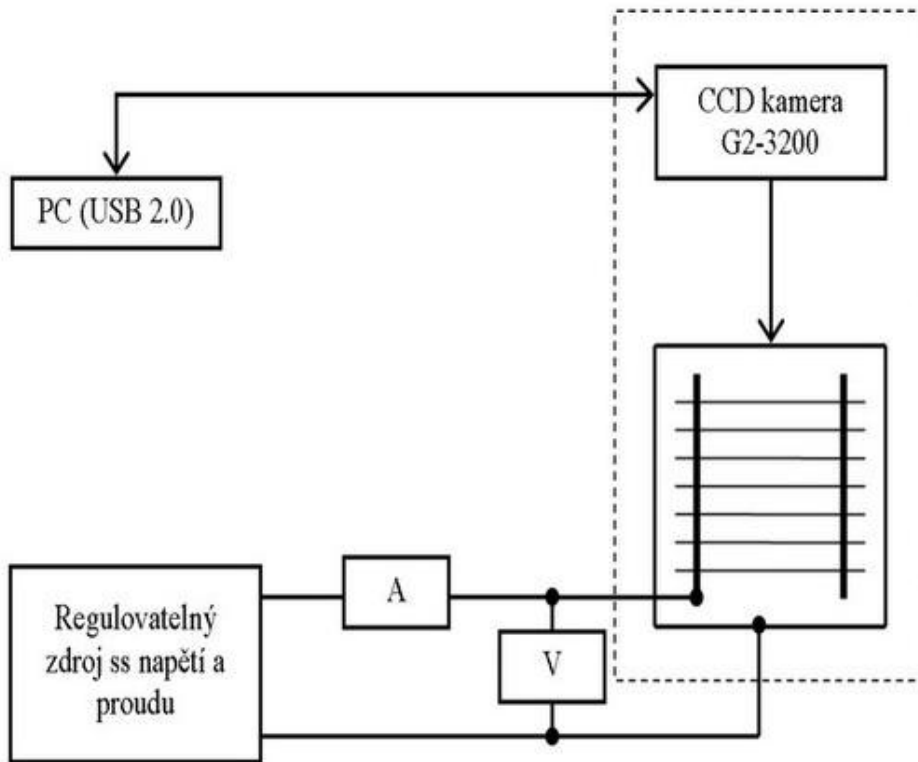


Flash test

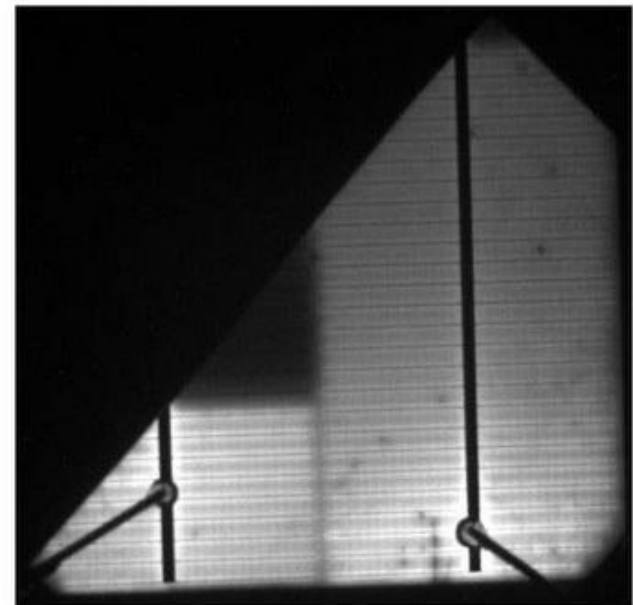
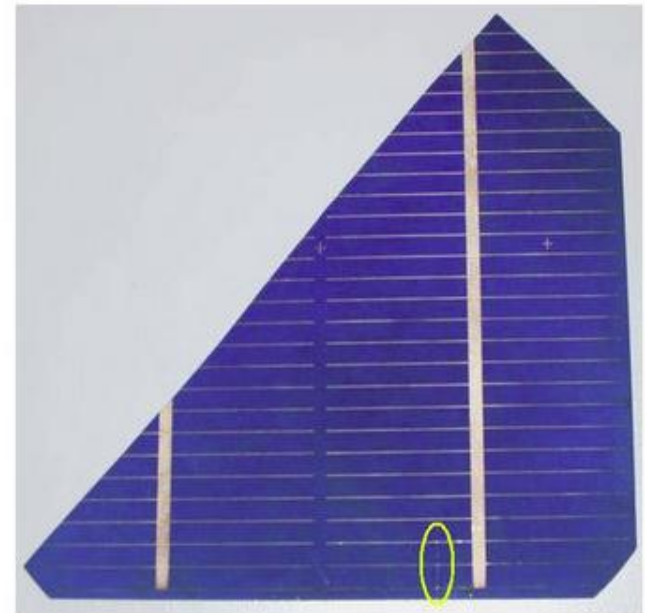
- Požadavky na:
 - sluneční simulátor – IEC 60904-9
 - nerovnoměrnost záření $< 2\%$
 - shoda s AM1.5 $> 25\%$
 - časová nestabilita záření $< 2\%$
 - měření teploty – přesnost $< 0,5\%$
 - měření intenzity záření – přesnost $< 0,2\%$
 - měření napětí a proudu – přesnost $< 0,2\%$



Elektroluminiscence

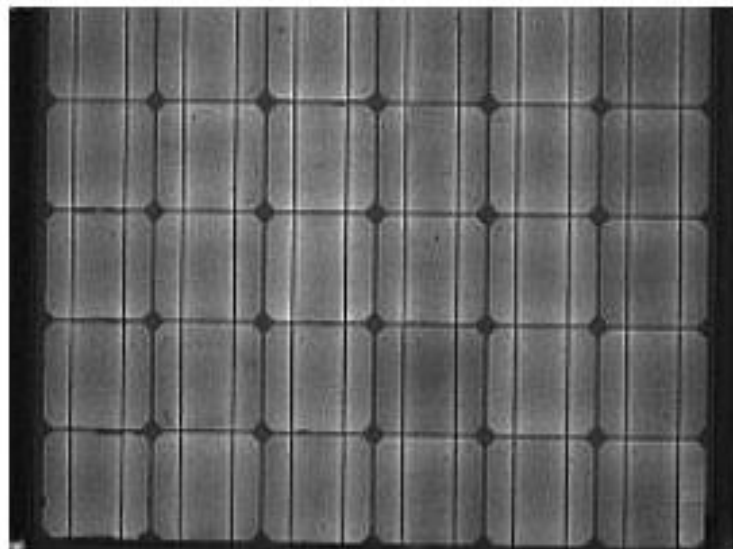
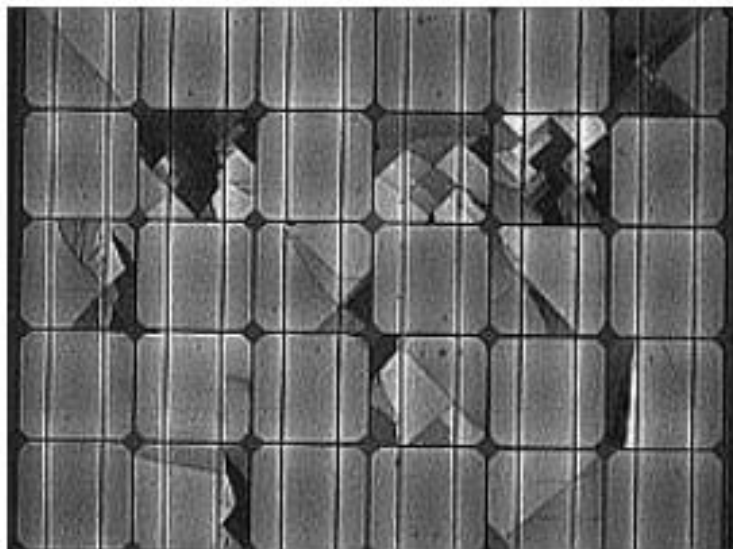


Článkem protéká proud blízký ISC, v místech s vyšší proudovou hustotou se projeví zářivá rekombinace (okolo 1100 nm)

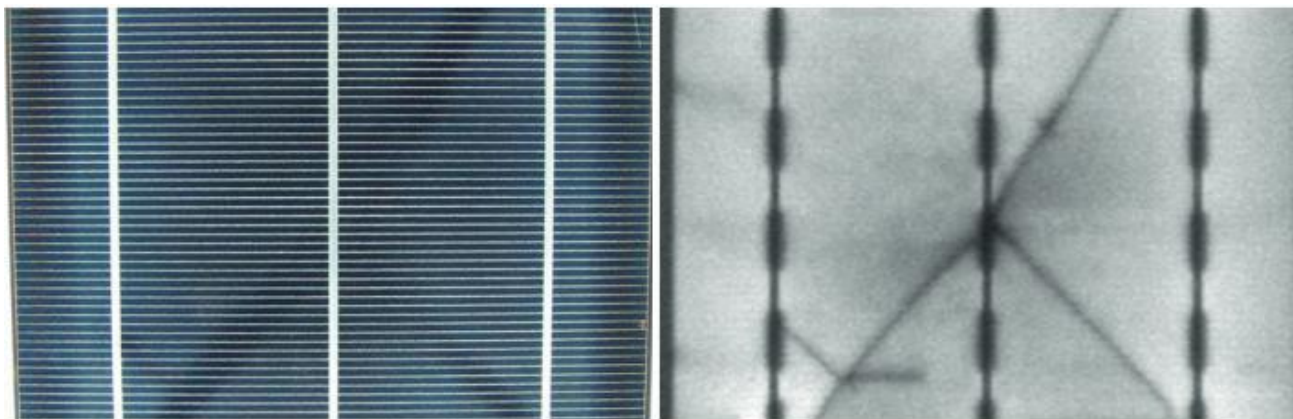
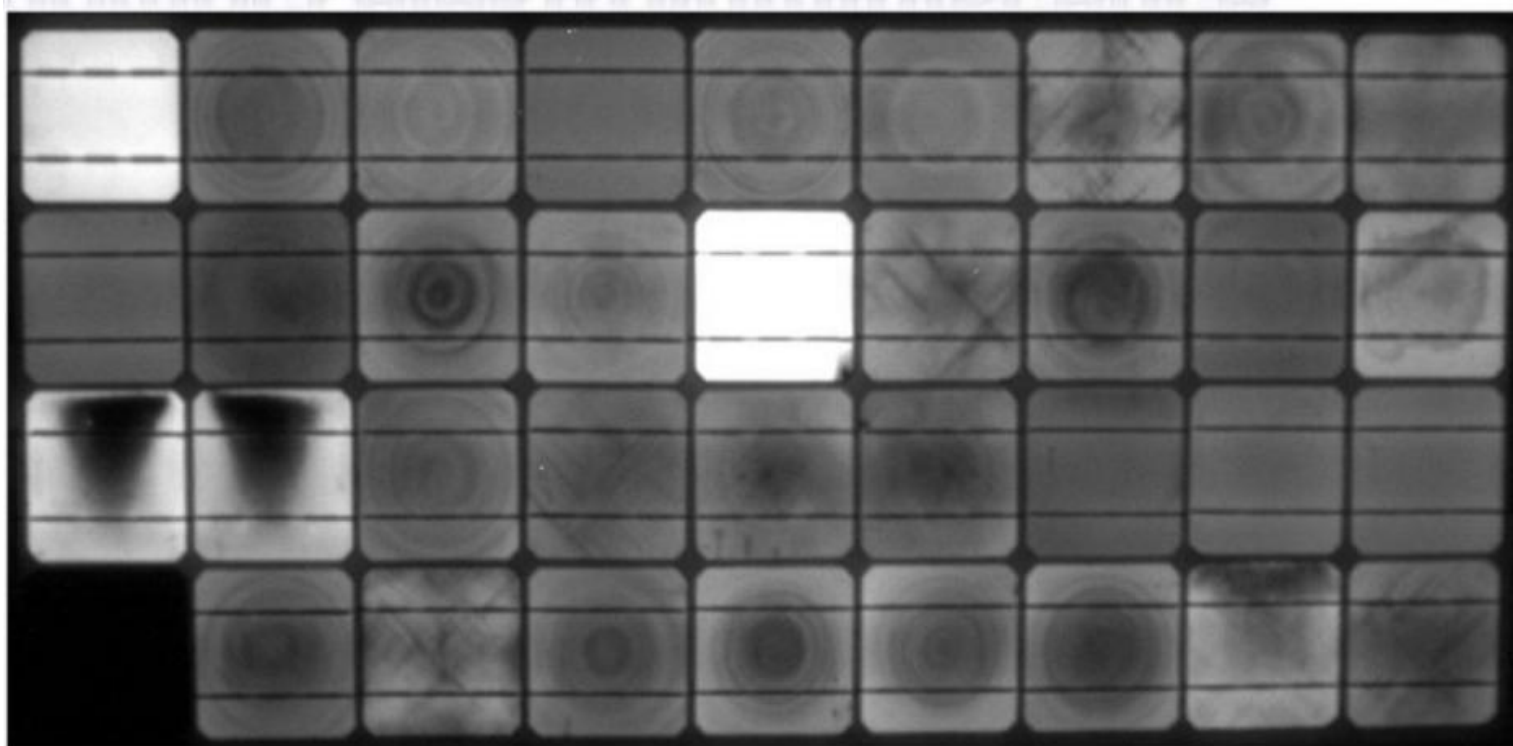


Detekce poruch pomocí rekombinačního záření

- +Názorné měření
- +Nedestruktivní odhalení mechanických závad
- Vyžaduje odstínění rušivého záření
- Vyžaduje speciální kameru

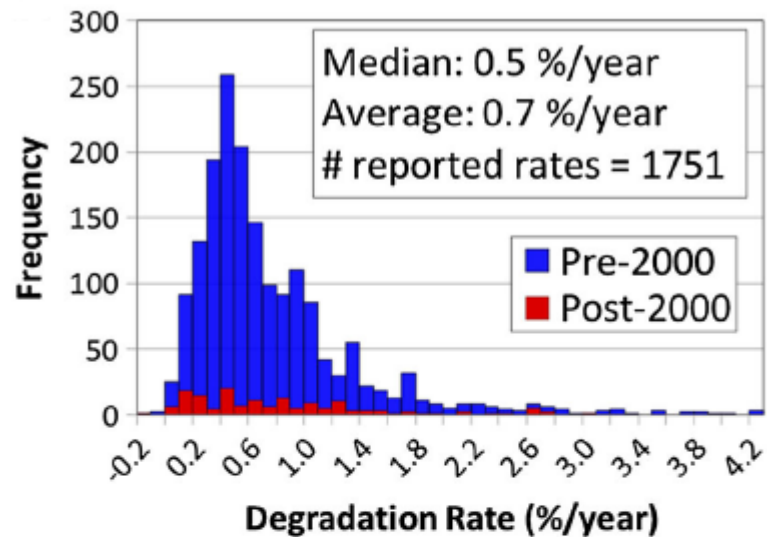


Různé typy defektů, zjištěné pomocí elektroluminiscence

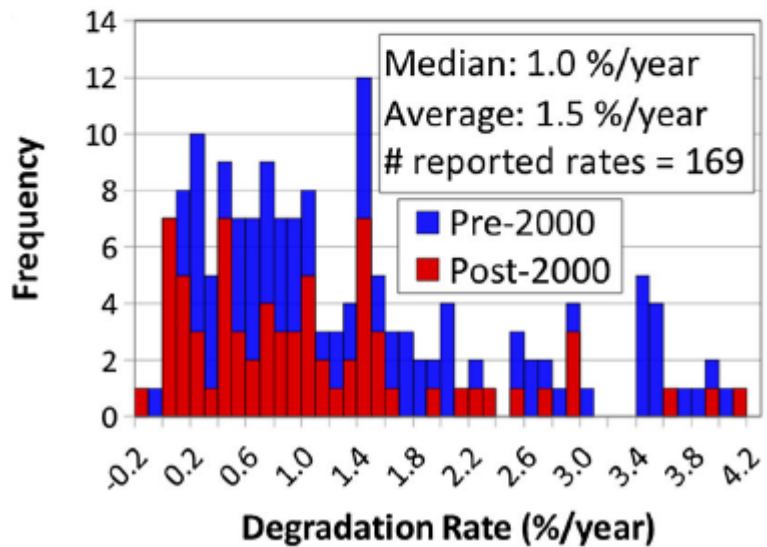




c-Si modules



TF modules

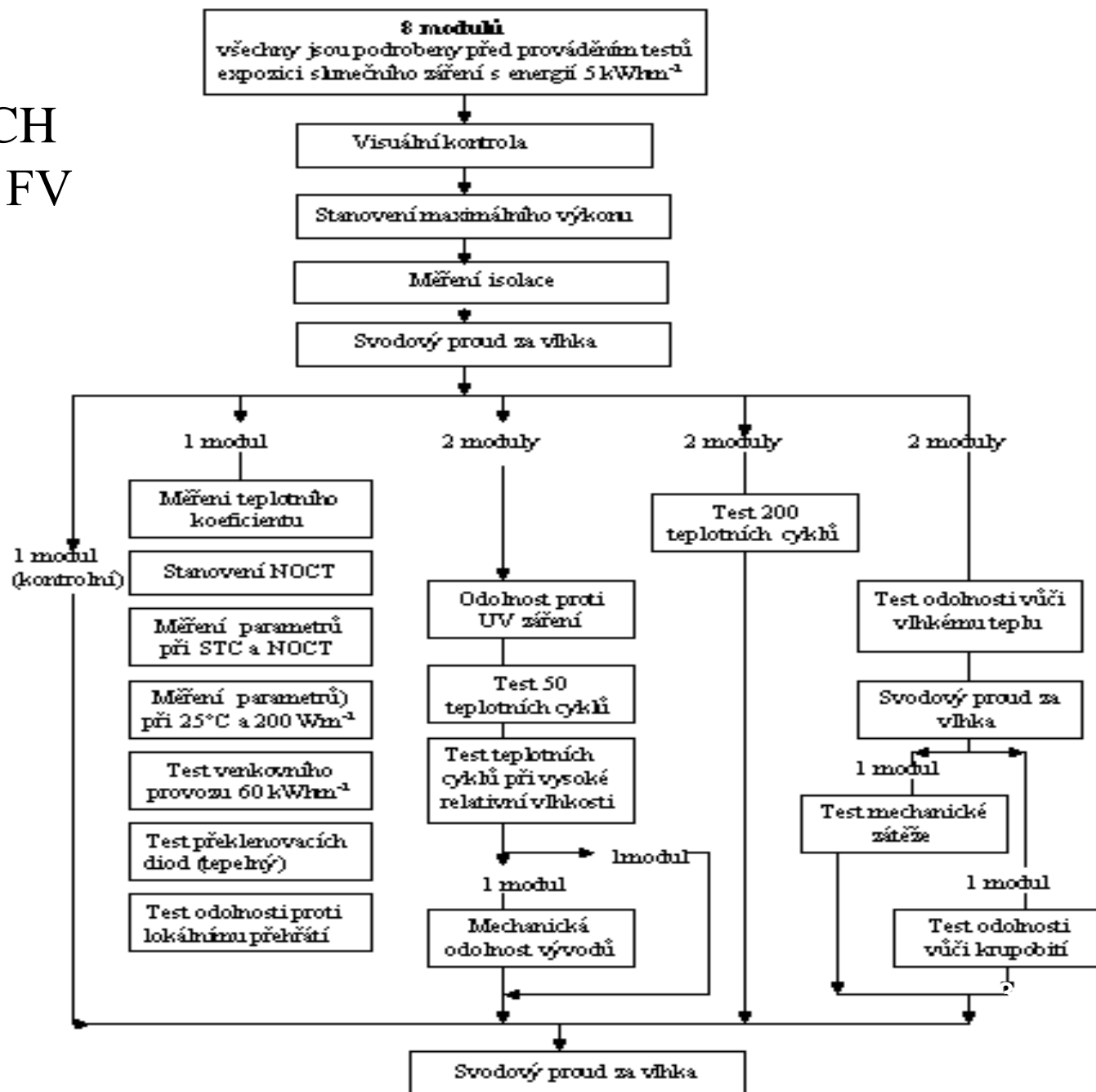


TESTOVÁNÍ KRYSTALICKÝCH KŘEMÍKOVÝCH FV MODULŮ (TYPOVÉ ZKOUŠKY)

- Moduly musí splňovat kritéria daná normou ČSN EN 61215.
- Před samotným testováním musí být všechny testované moduly vystaveny zdroji světla s celkovou dávkou záření v rozmezí 5kWh/m^2 až $5,5\text{kWh/m}^2$ naprázdno.
- K testování se vybírá 8 modulů.
- Moduly jsou připojeny k měřicímu zařízení přesně podle pokynů výrobce modulů.



TESTOVÁNÍ KRYSTALICKÝCH KŘEMÍKOVÝCH FV MODULŮ – VÝVOJOVÝ DIAGRAM



PODMÍNKY ÚSPĚŠNOSTI

- **Každý testovaný vzorek musí splňovat následující kritéria:**
 - pokles maximálního výstupního napětí nepřekročí během každého testu předepsané meze, ani 8% po měření sekvence (všechny testy)
 - žádný vzorek nevykazuje rozpojený obvod
 - nejsou vizuálně patrné žádné významné defekty
 - po testech moduly vyhovují z hlediska elektrické pevnosti
 - požadavky na svodový proud za vlhka jsou splněny na začátku sekvence, po testu odolnosti vůči vlhkému teplu i na konci sekvence
 - VACH se nezmění o více než 5%.
 - jsou splněny specifické požadavky skupiny.

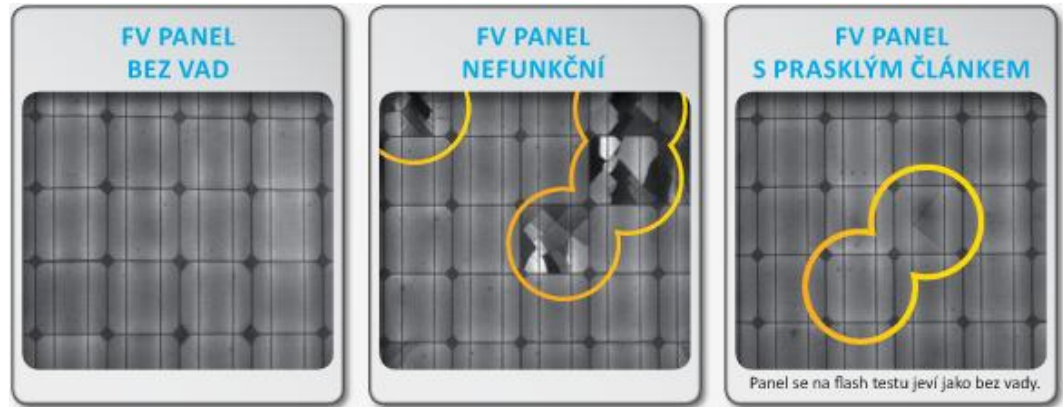
Pokud nesplňuje kritéria jeden modul v jedné zkoušce, jsou změřeny dva náhradní a oba musí vyhovět.

Pokud nesplňují požadavky 2 a více, je celá skupina zamítnuta.

PROVÁDĚNÉ ZKOUŠKY

- **Vizuální kontrola**

- zlomený, prohnutý, nevyrovnaný nebo porušený vnější povrch
- zlomené články
- prasklé články
- vadné spoje
- dotek článků mezi sebou nebo s rámem
- chyby lepených spojů
- bublinky a chyby laminace
- lepivé povrchy plastů
- vadné vývody, živé části



- **Stanovení maximálního výkonu**

- používá se k rozlišení maximálního výkonu před a po různých klimatických zkouškách – opakovatelnost musí být lepší než $\pm 0,5\%$
- jako zdroj záření sluneční světlo, nebo solární simulátor třídy B a lepší
- teplota měřena s přesností vyšší než $\pm 1^\circ\text{C}$
- zařízení pro měření proudu a napětí musí mít přesnost $\pm 0,2\%$
- pro měření je doporučena teplota mezi 25°C a 50°C a intenzita záření 700 až 1100 W/m^2 . Výsledky se přepočítají na STC v souladu s IEC 60891

- **Měření izolace (izolačního odporu)**
 - modul je namáhán napětím rovným dvojnásobku maximálního napětí udávaného výrobcem zvýšeným o 500 V nebo 1000 V po dobu 1 min
 - moduly menší než 0,1 m² musí mít odpor nejméně 400 M Ω
 - moduly větší musí mít odpor nejméně 40 M Ω .m² při napětí 500 V nebo maximálním napětí (podle toho, které je větší)



- **Měření teplotního koeficientu**

- měření charakteristik v teplotním intervalu alespoň 30°C, minimálně 4 hodnoty teploty, pro každou teplotu tři měření
- měření se provádí při intenzitě záření 1000 W/m², nebo se na tuto hodnotu přepočítávají
- teplota musí být měřena s přesností vyšší, než ±0,5°C
- měří se teplotní koeficienty
 - proudu α
 - napětí β
 - špičkového výkonu δ

Koeficienty se používají pro přepočet parametrů na aktuální provozní podmínky (při změně teploty).

- **Měření NOCT (normal operating cell temperature)**
 - Měření se provádí při rozpojeném obvodu za podmínek:
 - úhel sklonu k horizontální rovině 45°
 - intenzita záření 800 W/m^2
 - teplota okolí 20°C
 - rychlost větru 1 m/s
 - Teplota článků se měří pomocí tepelných čidel připevněných k zadní straně dvou článků umístěných v blízkosti středu testovaného modulu
- K měření NOCT je možno použít srovnání s referenčním modulem

- **Měření při STC a NOCT**
 - teplota článků 25°C a NOCT
- **Měření při snížené intenzitě záření**
 - teplota článků 25°C
 - intenzita 200 W/m^2



- **Test venkovního provozu**
 - posouzení schopnosti modulu fungovat ve venkovních podmínkách, které nemohou být aplikovány v laboratoři
 - modul se umístí na konstrukci dle doporučení výrobce, koplanárně je umístěno čidlo intenzity slunečního záření. Zátěž je volena tak, aby přibližně odpovídala MPP za STC.
 - Zkouška končí po dosažení celkové dávky záření 60 kWh/m^2

- **Odolnost proti lokálnímu přehřátí (lokální stínění)**
 - Modul je vystaven záření o intenzitě větší než 700 W/m^2 .
 - Změří se V-A charakteristika a stanoví I_{MP} . Vhodným teplotním čidlem (nejlépe IR kamerou) se stanoví nejteplejší článek.
 - Vybraný článek se kompletně zastíní a ověří se, zda proud nakrátko je nižší, než proud I_{MP} .
 - Poté je modul vystaven záření o intenzitě 1000 W/m^2 a je udržován v podmínkách maximálního ztrátového výkonu po dobu 5h.
 - Teplota modulu během zkoušky by měla být $50^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.
 - Během testu se nesmí objevit žádné vizuální změny (defekty)
 - Degradace maximálního výkonu nesmí převýšit 5% a nesmí dojít ke změně izolačního odporu.

- **Odolnost proti UV záření**

- Modul je ozařován UV zářením o vlnové délce 280-385 nm a dávce 15 kWh/m², přičemž alespoň 5 kWh/m² připadá na záření o vlnové délce 280-320 nm
- Teplota modulu během testu je udržována na hodnotě 60°C ±5°C, intenzita záření po ploše musí být homogenní ±15%
- Během testu se nesmí objevit žádné vizuální změny (defekty)
- Degradace maximálního výkonu nesmí převýšit 5%
- Nesmí dojít ke změně izolačního odporu

- **Test teplotních cyklů**

- Modul (nebo více modulů) je umístěn v komoře s automatickým řízením teploty.
- Musí být umístěn tak, aby okolní vzduch mohl volně proudit a aby bylo minimalizováno srážení vody na povrchu modulu.
- Teplota musí být měřena s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$.
- Modul je připojen ke zdroji umožňujícímu zatěžování modulu proudem I_{MP} , stanoveným za STC.

- **Test teplotních cyklů**

- Během testu se mění teplota v komoře mezi $-40^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, rychlost změny teploty nesmí přesáhnout $100^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Na minimální i maximální teplotě musí moduly setrvat alespoň 10 min. Jeden teplotní cyklus nesmí trvat déle než 6 hod.
- Při testu 50 teplotních cyklů není třeba modul zatěžovat proudem.
- Při testu 200 cyklů prochází moduly proud I_{MP} , pokud je teplota vyšší než 25°C .

- **Test teplotních cyklů při vysoké relativní vlhkosti**
 - Modul umístěn v komoře s automatickým řízením teploty a vlhkosti (relativní vlhkost musí být udržována na $85\% \pm 5\%$ při teplotách nad 25°C).
 - Během testu musí být modul na teplotě
 - 85°C alespoň 20 hodin
 - -40°C minimálně 0,5 hodiny



- **Test odolnosti vůči vlhkému teplu**

- Modul je umístěn v komoře v prostředí s teplotou $85^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí $85\% \pm 5\%$ po dobu 1000 hodin.
- Za 2-4 hodiny po skončení testu je provedeno měření elektrické pevnosti, měření svodového proudu za vlhka, vizuální kontrola a měření maximálního výkonu.
- Nesmí dojít ke změně izolačních vlastností a nesmí se snížit maximální výkon o více než 5%



- **Mechanická odolnost vývodů**

- Vývody jsou namáhány způsobem odpovídajícím podmínkám montáže na výměny modulů. Vývody jsou zatěžovány tahem v různých směrech silou odpovídající váze modulu, Provádí se 1 – 10 cyklů.
- Během testu nesmí dojít ke změně parametrů.

- **Svodový proud za vlhka**

- Testovaný modul je ponořen do nádoby s kapalinou o rezistivitě menší než $3500 \Omega\text{cm}$, povrchovým napětím menším než $0,03 \text{ N/m}$ a teplotě $22^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$
- Do kapaliny se vloží jedna elektroda a druhá se připojí k vývodu modulu. Mezi elektrody se přiloží napětí 500V nebo maximální povolené napětí (podle toho, které je větší) po dobu 2 min a změří izolační odpor, který musí být větší než $40 \text{ M}\Omega\text{m}^2$.

- **Test mechanické zátěže**

- Testovaný modul se zapojí do obvodu, který umožňuje detekovat případné rozpojení během testu.
- Modul je upevněn způsobem doporučovaným výrobcem a postupně zatěžován z přední strany (rovnoměrně po ploše) do tlaku odpovídajícího 2400 Pa po dobu 1 hod.
- Poté se stejná zkouška provede při aplikaci zátěže z druhé strany modulu.
- Zkouší se pevnost v tahu a tlaku.
- Procedura se provádí třikrát.



- **Test odolnosti vůči krupobití**
 - Vytvoří se ledové koule o požadovaném průměru ($25 \text{ mm} \pm 5\%$), které nesmějí mít viditelné praskliny. Koule jsou skladovány v kontejneru.
 - Modul a vrhací zařízení mají pokojovou teplotu. Rychlost ledových koulí je určena s přesností $\pm 5\%$ (23 m/s). Koule jsou zaměřeny na místa na modulu, definovaná normou (odchylka max. 10 mm – celkem 11 míst).



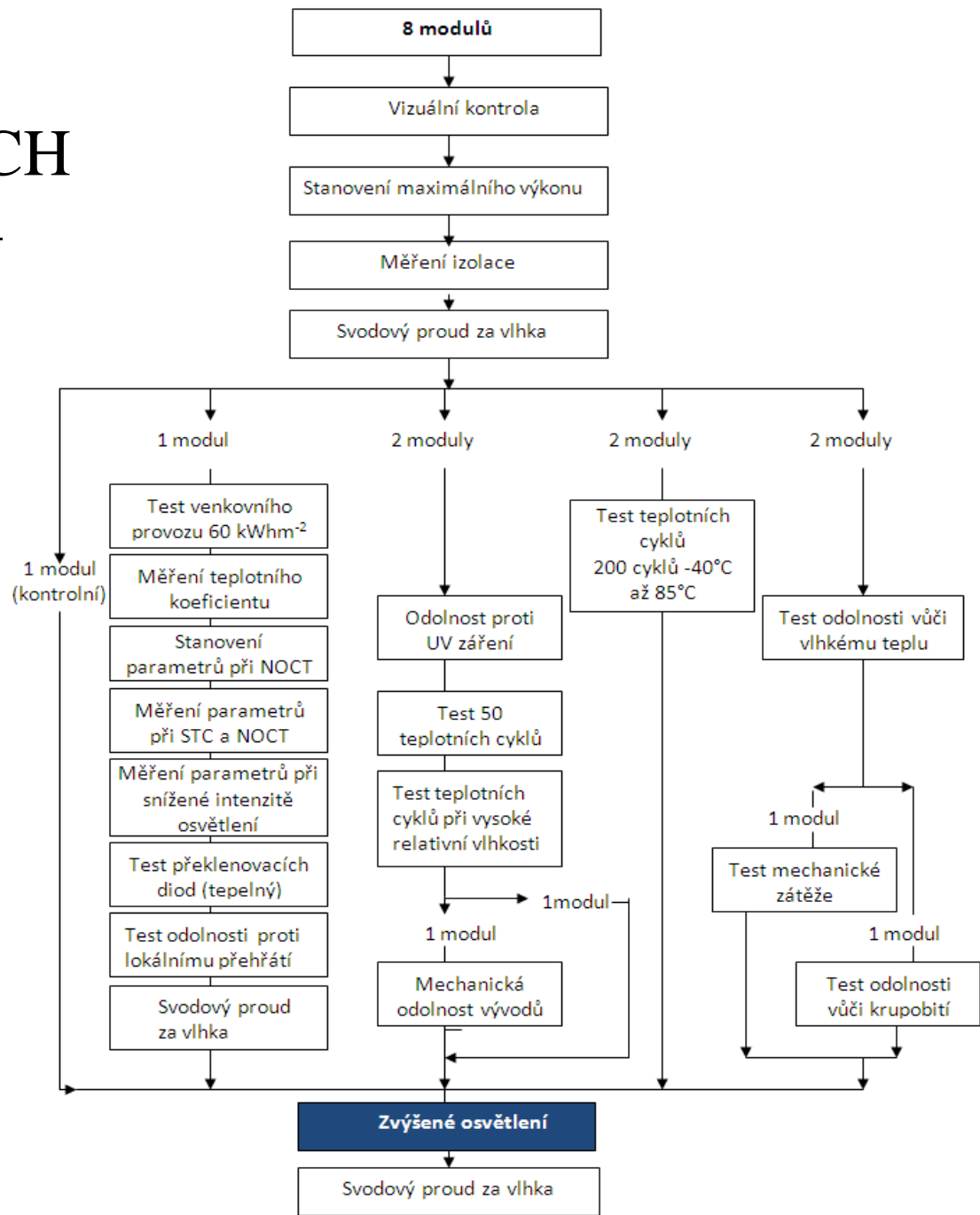
- **Test překlenovacích diod (tepelný)**

- Modul je zahřátý na teplotu $75^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Libovolná paralelní větev překlenovacích diod je propustně polarizována a je nastaven proud odpovídající I_{SC} při STC.
- Po 1 hod zatěžování je změřena teplota pouzdra a stanovena teplota přechodu diody.
- Poté se zvýší proud o 25% a dioda je zatěžována po dobu 1 h.
- Po provedení zkoušky musí být dioda nadále funkční (ověří se testem při částečném zastínění).



TESTOVÁNÍ TENKOVRSŤVÝCH PV MODULŮ – VÝVOJOVÝ DIAGRAM

- ČSN EN 61646
- Staebler-Wronskiho efekt



FLASH TESTY, MĚŘENÍ VACH

- Požadavky na:
 - sluneční simulátor – IEC 60904-9
 - nerovnoměrnost záření $< 2\%$
 - shoda s AM1.5 $> 25\%$
 - časová nestabilita záření $< 2\%$
 - měření teploty – přesnost $< 0,5\%$
 - měření intenzity záření – přesnost $< 0,2\%$
 - měření napětí a proudu – přesnost $< 0,2\%$



- Neshoda se spektrem AM 1.5
 - potřeba různých referenčních článků
- Krátký světelný impuls
 - nemožnost měření některých technologií
 - Multiflash
- Paměťové efekty některých modulů
 - nutnost dlouhodobého ozáření modulů před měřením

Technologie	Kapacitní efekt	Doporučená délka trvání pulzu
c-Si, CIS, CdTe	Ne/nízký	2 ms
a-Si	Střední	> 10 ms
c-Si s vysokou účinností	Vysoký	> 100 ms

Typové zkoušky jsou velmi drahé, musí je mít každý typ modulu uváděný na trh

Vzhledem k zárukám na výkon PV modulů (obvykle nesmí poklesnout o více než o 10% původní hodnoty za prvních 10 let, pak o dalších 10 % původní hodnoty do konce životnosti

V případě pochyb se provádějí kontrolní měření, zejména parametrů za STC

