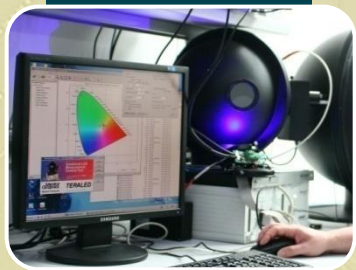


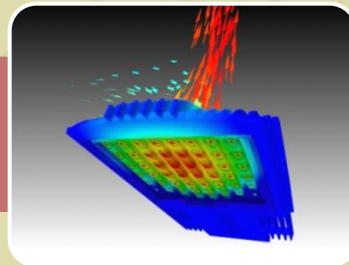
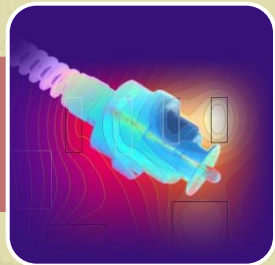
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

Termikus hatások figyelembe- vétele LED-es világításoknál

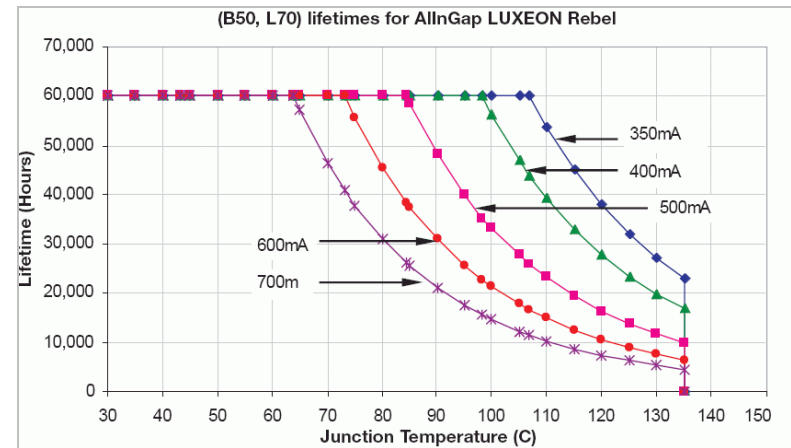
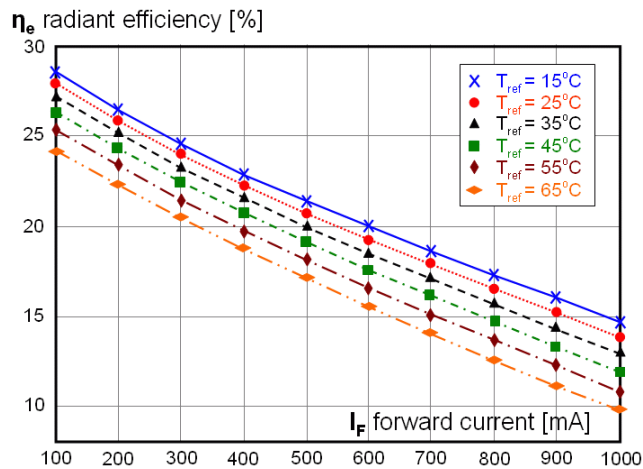


Dr. Poppe András egyetemi docens

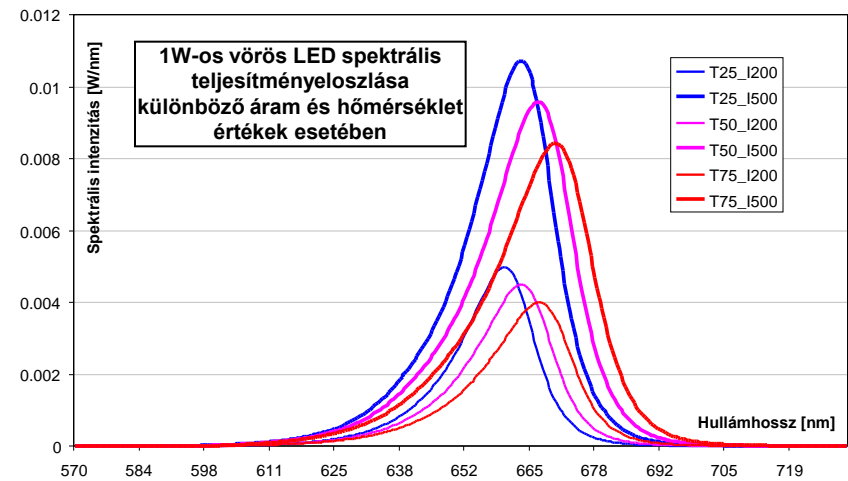


Miért fontos a LED-ek termikus jellemzése?

- ▶ **A LED-ek megbízhatósága, élettartama erősen függ a hőmérséklettől:**
 - élettartam (termikusan asszisztált meghibásodási mechanizmusok)
 - termo-mechanikai feszültségek \Rightarrow delaminálódó kötések / határfelületek
- ▶ **Kibocsájtott fény jellemzői is erősen hőmérsékletfüggők:**
 - spektrális teljesítményeloszlás (csúcs hullámhossz, szélesség)
 - teljes fluxus (fényáram), teljes hatásfok, fényhasznosítás

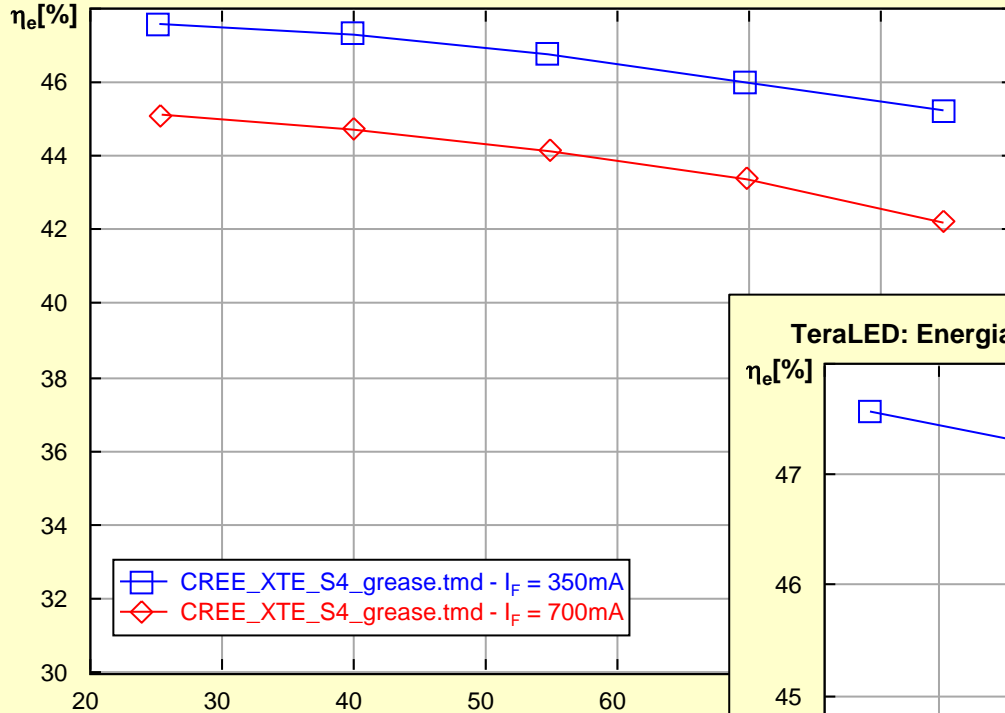


Forrás:
Philips Lumileds, Rebel Reliability Data, 2007

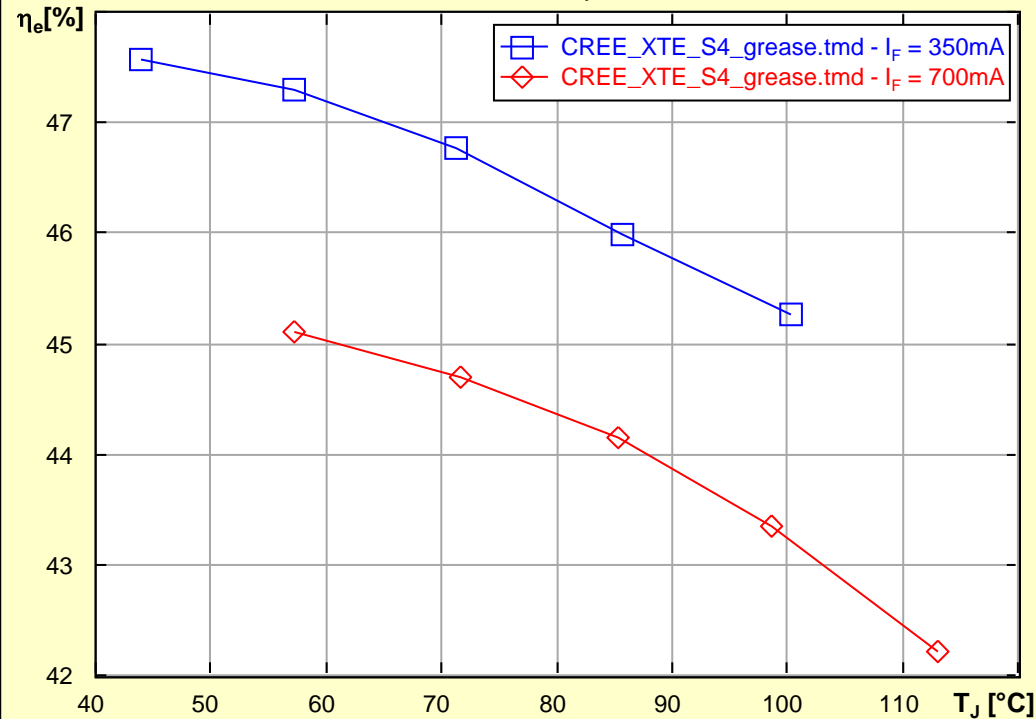


Néhány mérési eredmény:

TeraLED: Energiakonverziós hatások (P_{opt}/P_{el}) vs. környezeti hőmérséklet

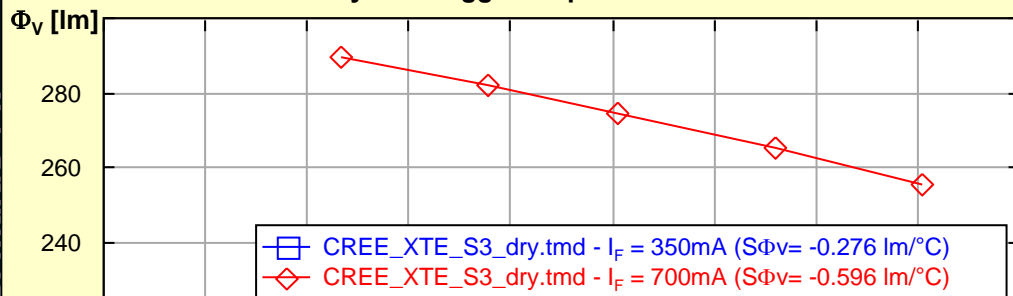


TeraLED: Energiakonverziós hatások (P_{opt}/P_{el}) vs. pn-átmenet hőmérséklet

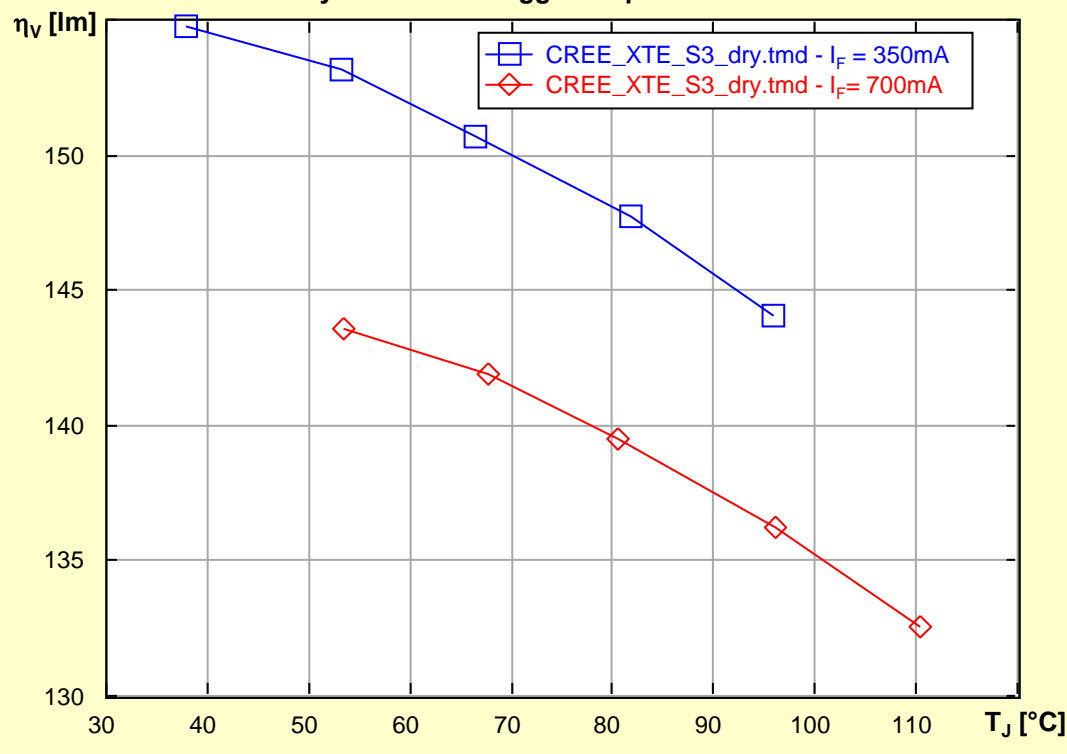


Néhány mérési eredmény:

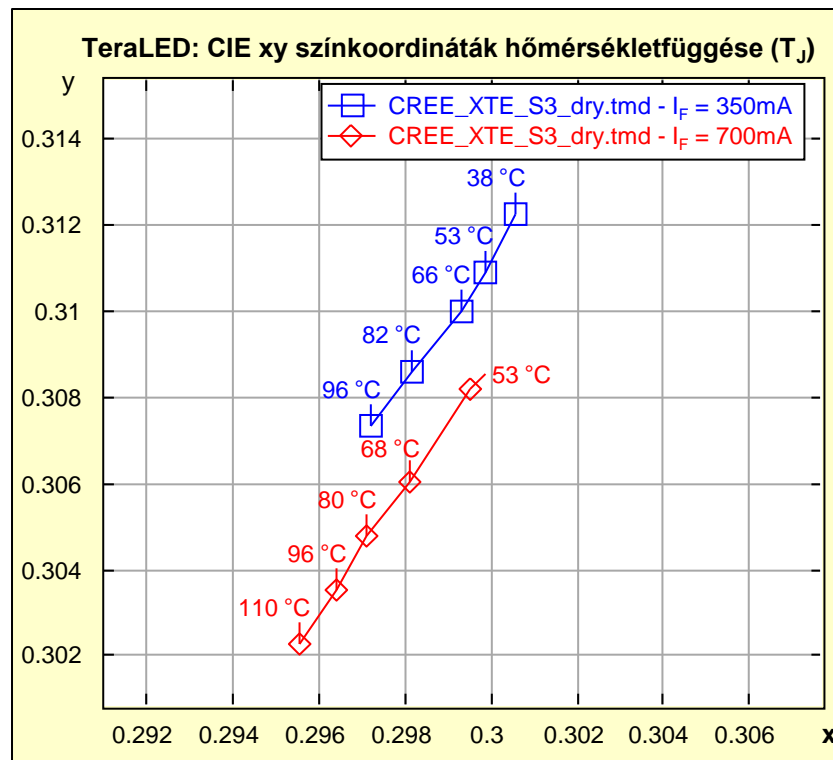
TeraLED: Fényáram függése a pn-átmenet hőmérsékletétől



TeraLED: Fényhasznosítás függése a pn-átmenet hőmérsékletétől

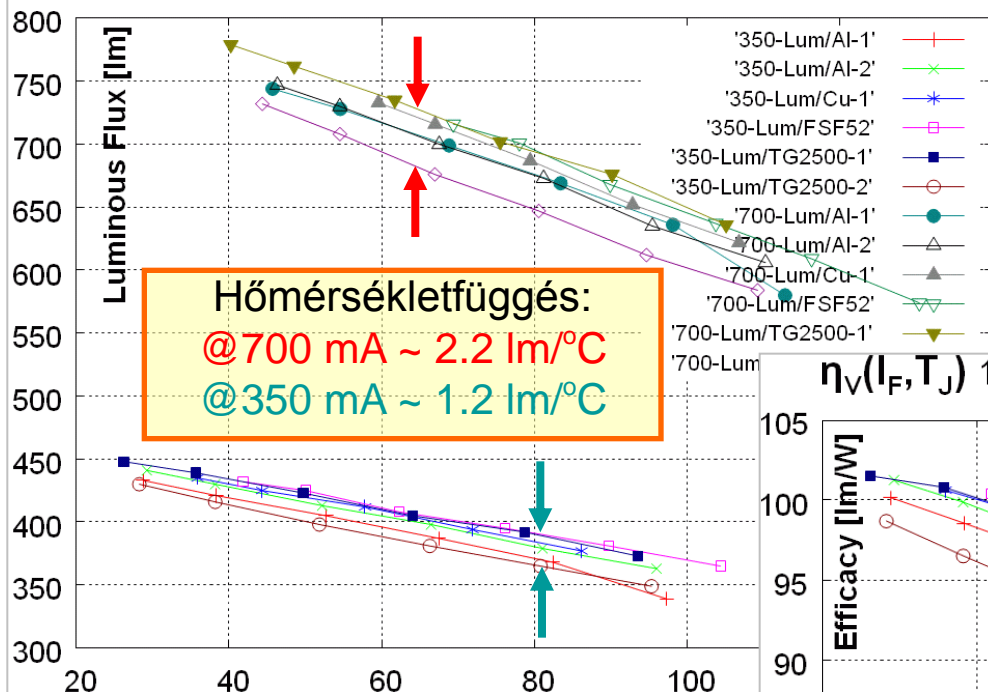


Néhány mérési eredmény:



Növekvő hőmérséklet hatása:

$\Phi_V(I_F, T_J)$ 10 W white LED luminous fluxes at 350 mA and 700 mA



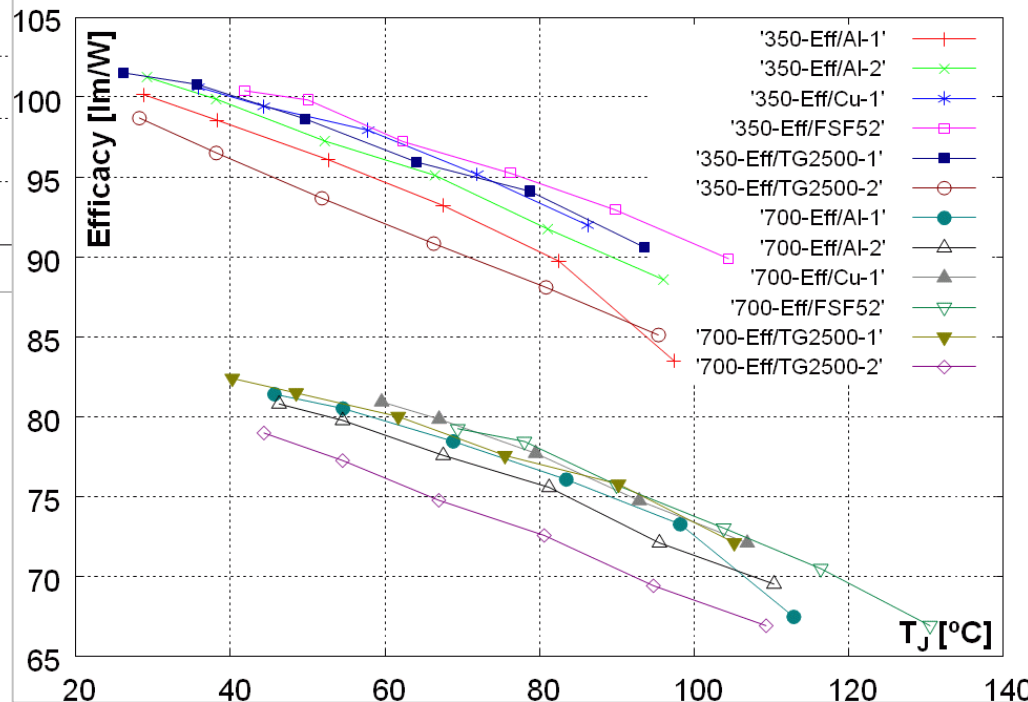
Fényáram [lm]

Egy 10 W-os fehér LED-re kapott eredmények



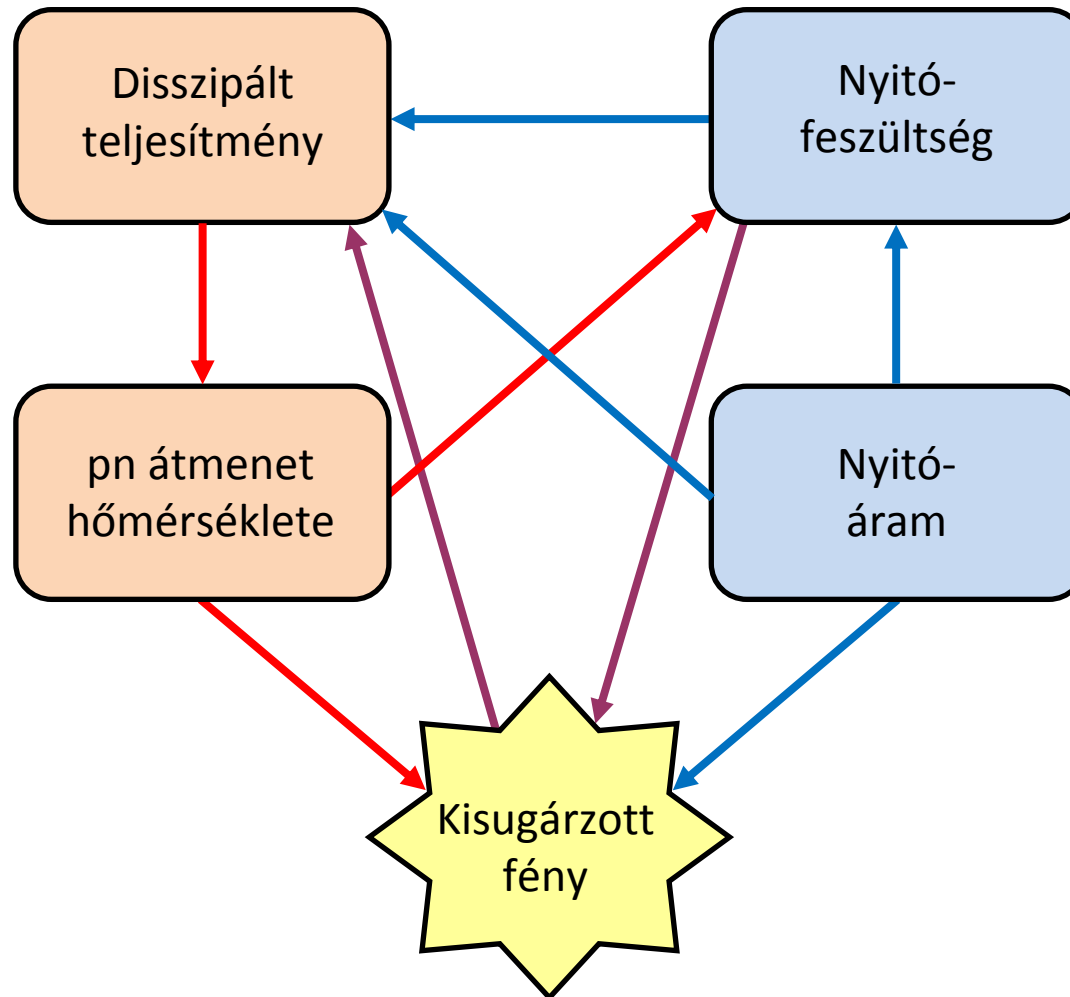
Fényhasznosítás [lm/W]

$\eta_V(I_F, T_J)$ 10 W white LED Efficacies at 350 mA and 700 mA



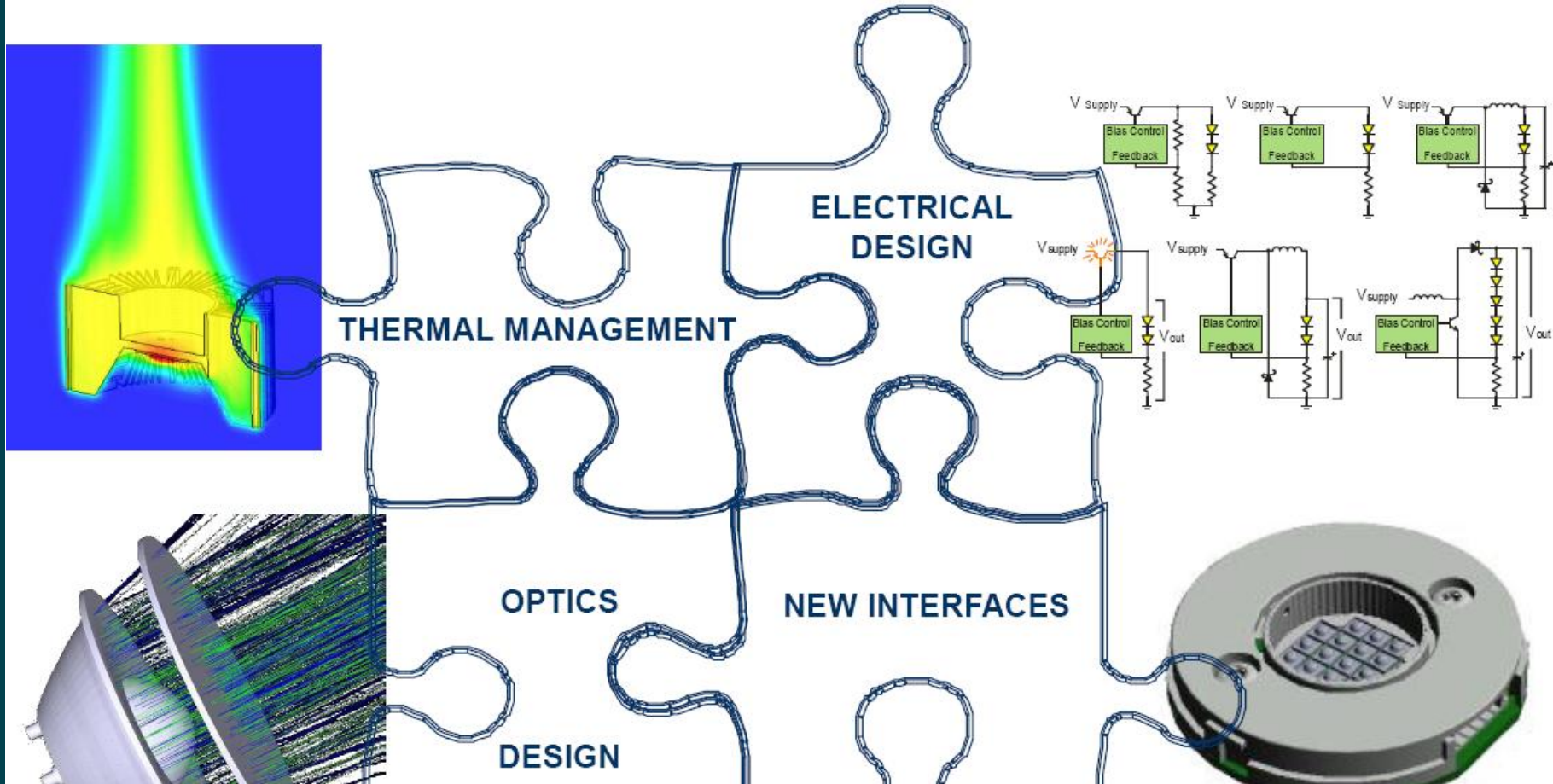
Minden mindennel összefügg:

LED alkatrész szinten is ...



Minden mindennel összefügg:

... és teljes világítási rendszer szinten is.



Konzisztens mérés, konzisztens tervezés szükséges!

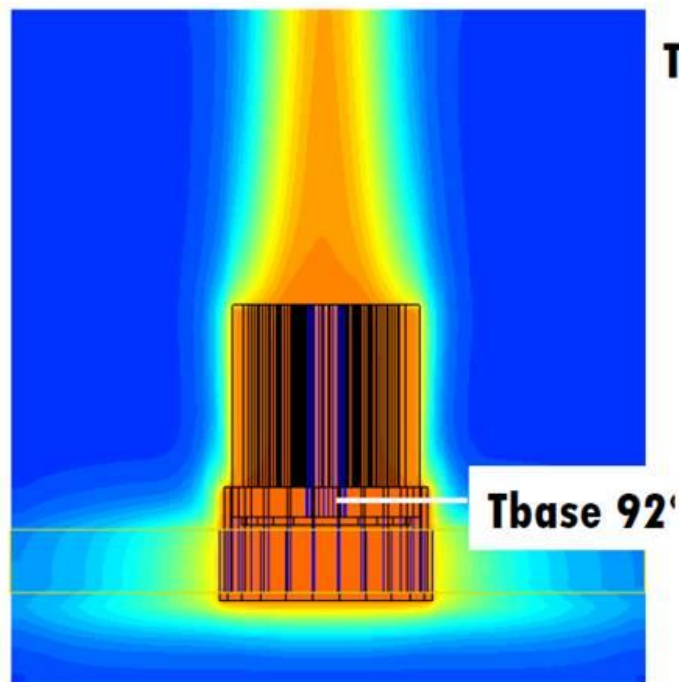
Forrás:

Dr. Gerhard Kuhn: Challenges of LED Lighting Systems, Keynote at LED professional Symposium September 27-29, 2011, Bregenz, Austria

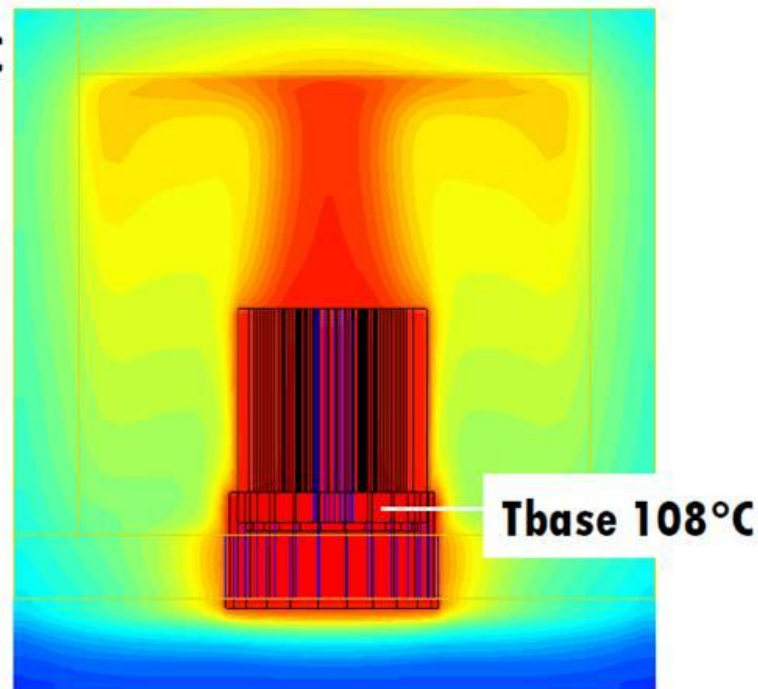
Blokkolt légáramlás hatása

- ▶ Pl. álmennyezetbe süllyesztett LED lámpa sokszor nem szellőzik jól, ezért magasabb lesz a pn-átmenet hőmérséklete...

Lamp in ceiling sufficient ventilation



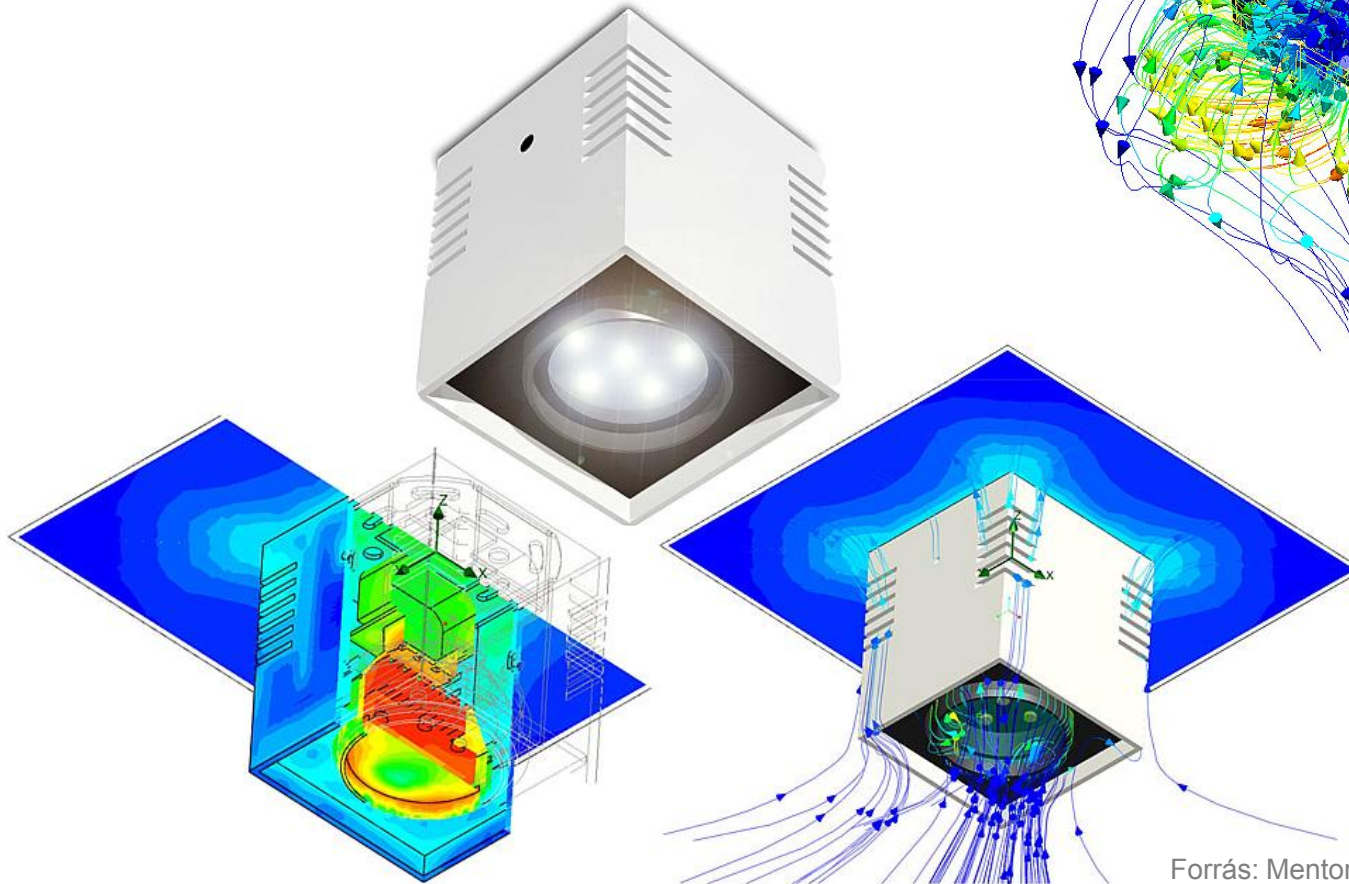
Lamp in ceiling with poor ventilation



http://www.led-heatsink.com/LED_heat_sink_calculation_simulation_thermal_design.html

Ideális esetben...

- ▶ A hűtést ne blokkolja semmi
 - Legkisebb hőellenállású hővezető út
 - Hatékony "hűtőborda"
 - Jól szellőző terek



Forrás: Mentor Graphics

Forrás: Mentor Graphics

LED-EK ÉLETTARTAMA ÉS A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA



LED-ek élettartama és a hőmérséklet

- ▶ Nem mindegy, mik a termikus (öregítési) feltételek:

Different stress conditions can cause different aging mechanisms.

100°C
5min
preferable, tastes good



37°C
21 days
very vital



room temperature
several weeks
unenjoyable



Long experience is required to find the correct reliability testing parameters.

Forrás:

Dr. Gerhard Kuhn: Challenges of LED Lighting Systems, Keynote at LpS, September 27-29, 2011, Bregenz, Austria

- ▶ IES LM80 **élettartam mérési szabvány**: emelt hőmérsékletű öregítés – független vizsgálatok a Pannon Egyetemen

LED élettartam vizsgálatok (LM80)

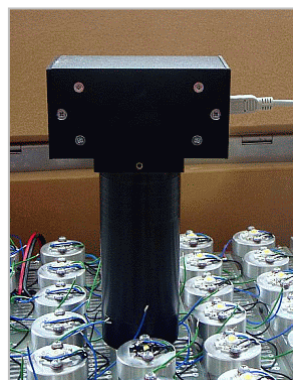
A kísérletsorozatot a Pannon Egyetem kutató csoportjával együtt végeztük:

- több, mint 8000 h égetés
- 8 LED típus európai, USA és ázsiai gyártóktól
- in-situ mérések

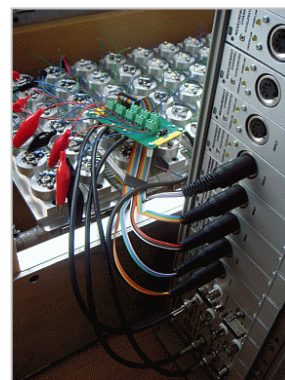
A vizsgálatokat a KÖZLED projekt számára végeztük.



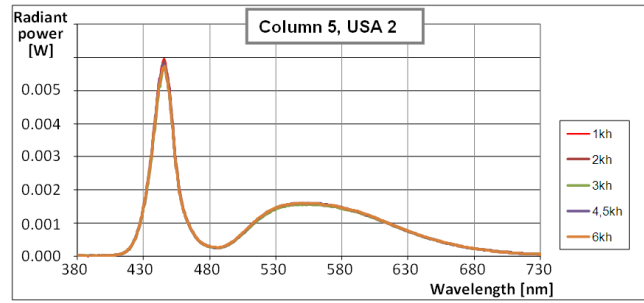
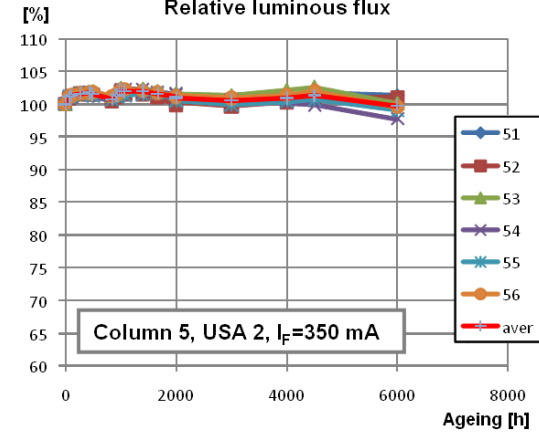
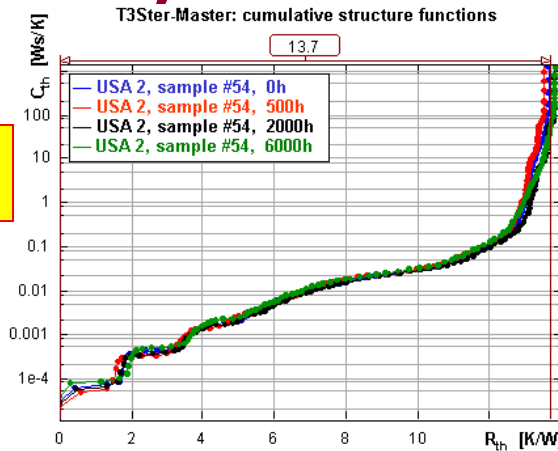
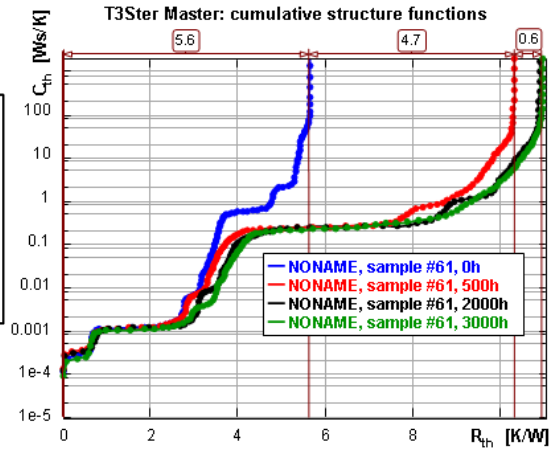
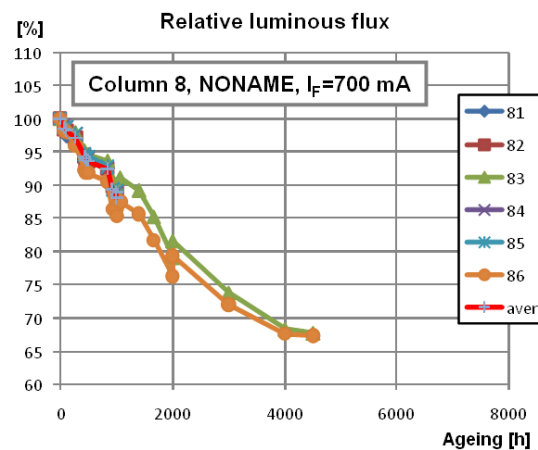
LM80-as öregítő kamra a LED mintákkal



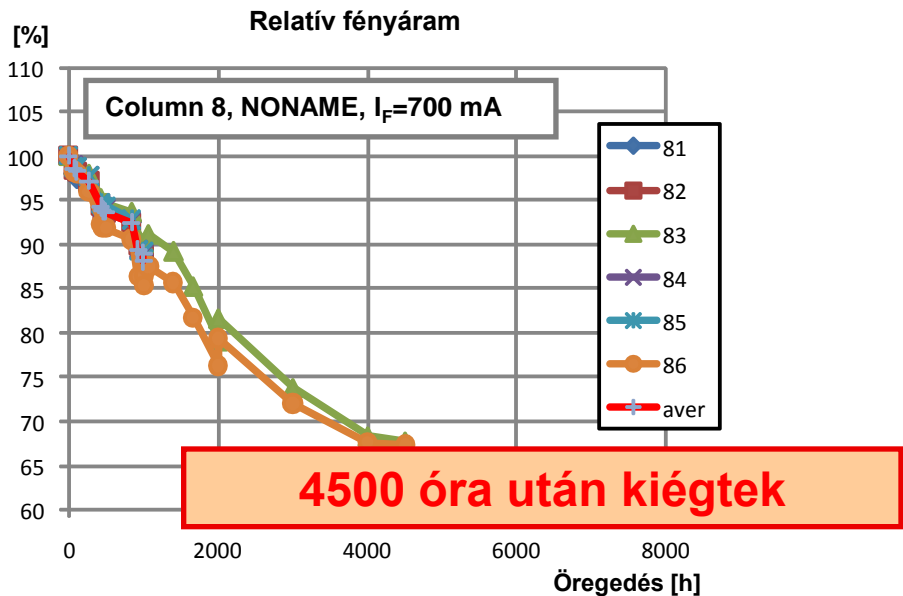
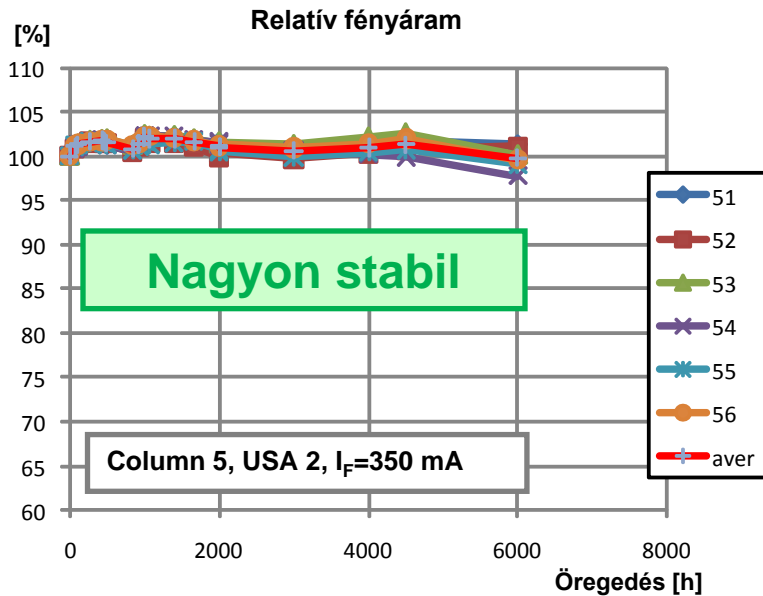
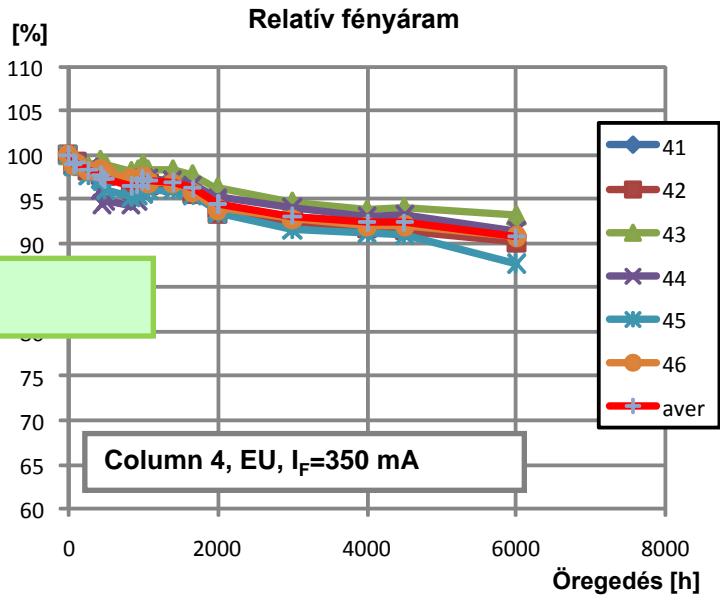
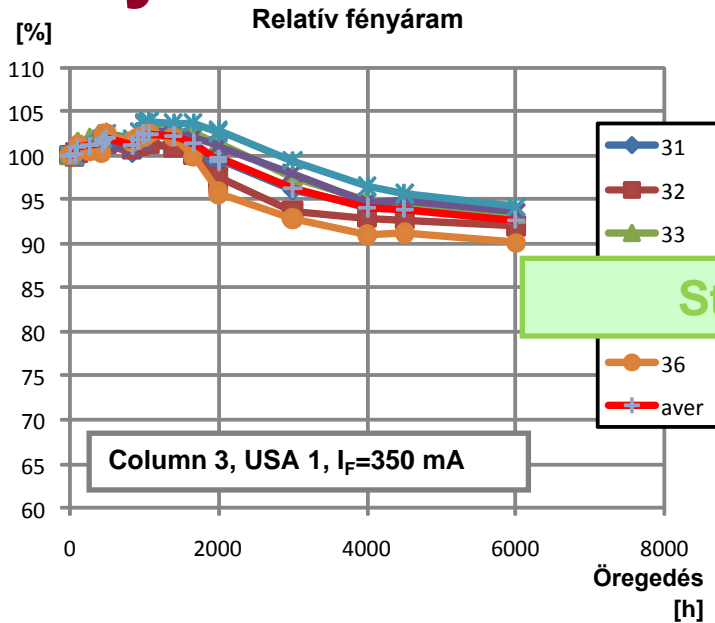
In-situ fotometriai mérések



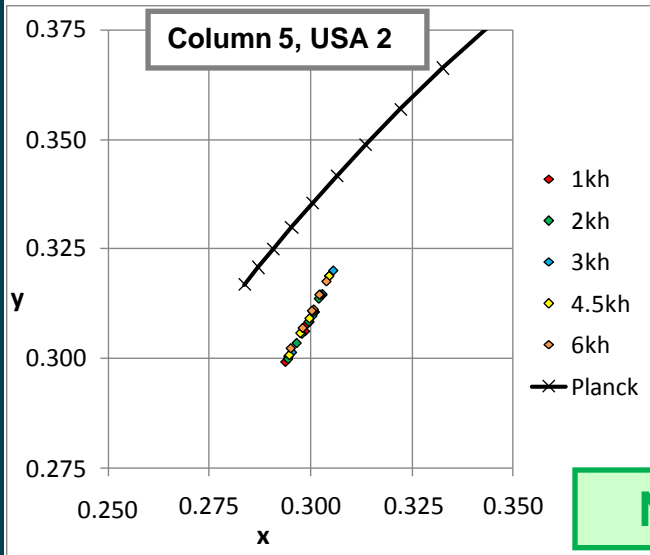
In-situ termikus mérések



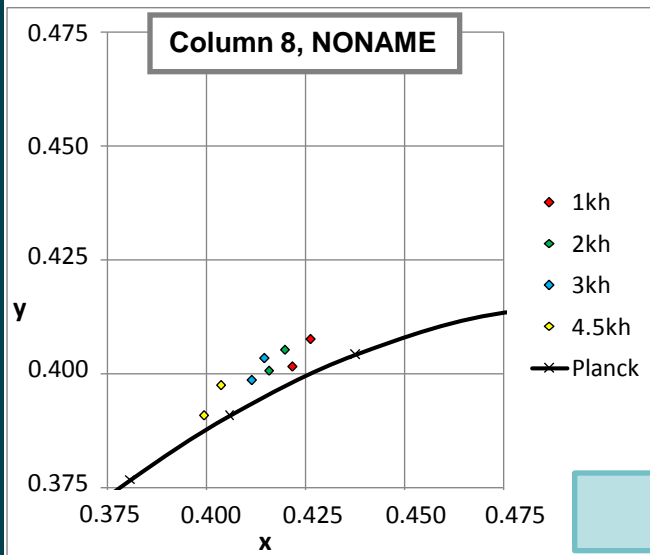
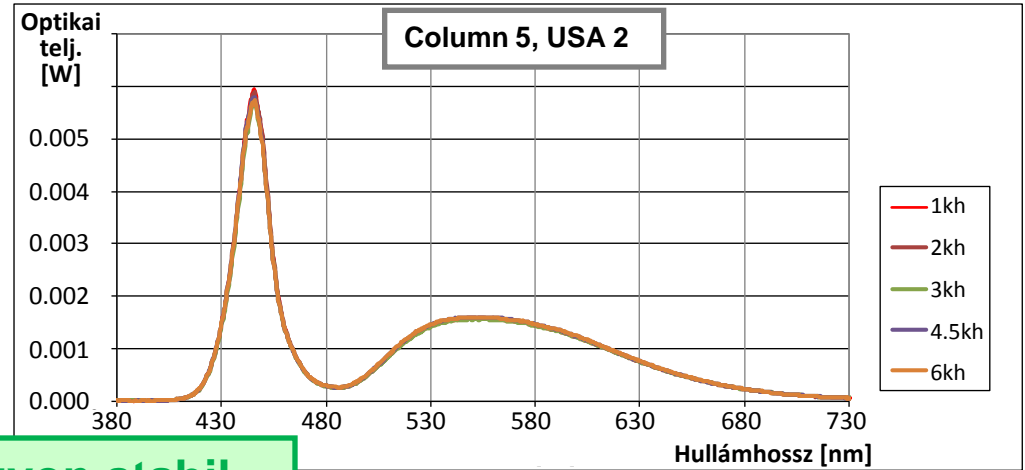
Fényáram változások



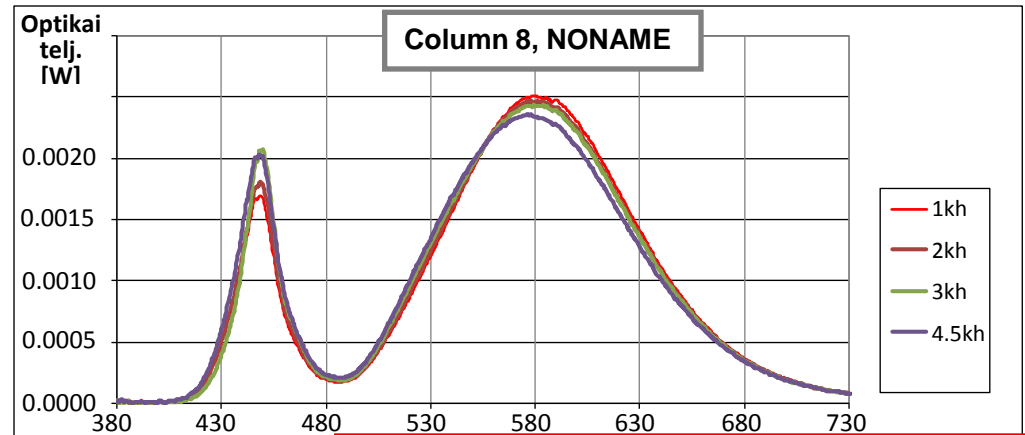
Színkoordináta és spektrum változások



Nagyon stabil

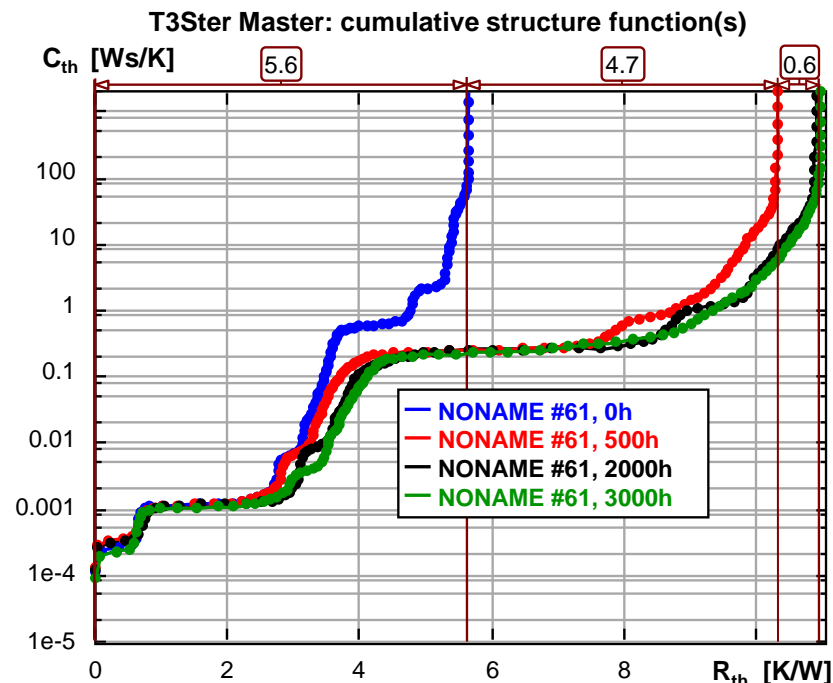
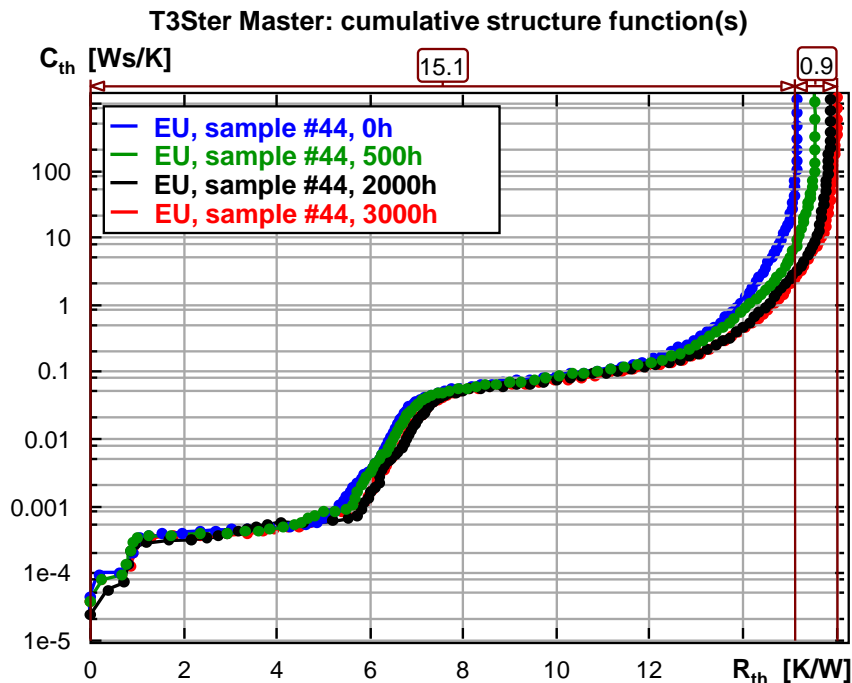


Kékülés



4500 óra után kiégtek

Egy stabil és egy degradálódott LED



A gyorsan degradálódott LED hőellenállása 500 óra alatt megduplázódott. Ez magasabb lapkahőmérsékletet okozott, ami tovább gyorsította a degradációt.

A degradáció eredménye a gyakorlatban

Reklámfelirat betűi egyenetlenül elsötétedtek 3-4 hónap alatt

- Epoxy gyantával (hőszigetelő!!!) kiöntött házban
- NONAME forrásból származó LED-ekkel szerelve



Hasonló gond: “LED cső”: szilikon gumiba ágyazott LED-ek

- Normál hőellenállás: 5..10..20 K/W, ezekben az esetekben: 400 K/W

Hibás az ilyen termékek koncepciója

Megoldás:

- Megbízható LED gyártó
- Fém ház, jó hűtéssel



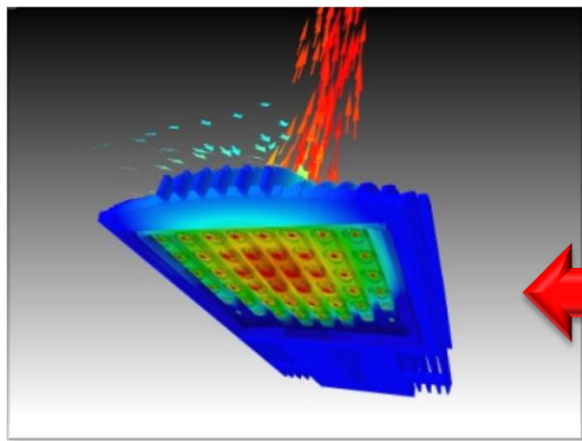
Forrás: OSRAM

TERMIKUS VISZONYOK FIGYELEMBE VÉTELE TERVEZÉSEKOR ÉS MÉRÉSKOR

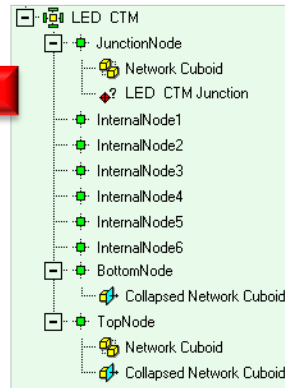


Jó gyakorlat

- ▶ Alapos termikus tervezés pl. világítási rendszer szintű termikus szimulációval, üzemi fényáram számításával...
- ▶ Alkatrész szintű LED kompakt modelleket lámpatest szintű szimuláció során használunk a szimuláció egyszerűsítésére:
 - Termikus modell CFD szimulációban – a lámpatest valós környezete szerinti hűtéssel számol. Eredmény: **a PN-átmenet hőmérséklete.**
 - Ennek alapján üzemi fényáram számolható (“hot lumen”).



KÖZLED projekt
BME-EET és HungaroLux



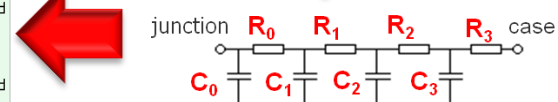
CIE 127-2007

JESD51-52

JESD51-1

JESD51-51

JESD15-14



Mentor Graphics T3Ster/TeraLED/FloTHERM



Gyakorlatban: konstans nyitó áram

► Egyszerűsített modellek

- V_F – lineáris hőmérsékletfüggés

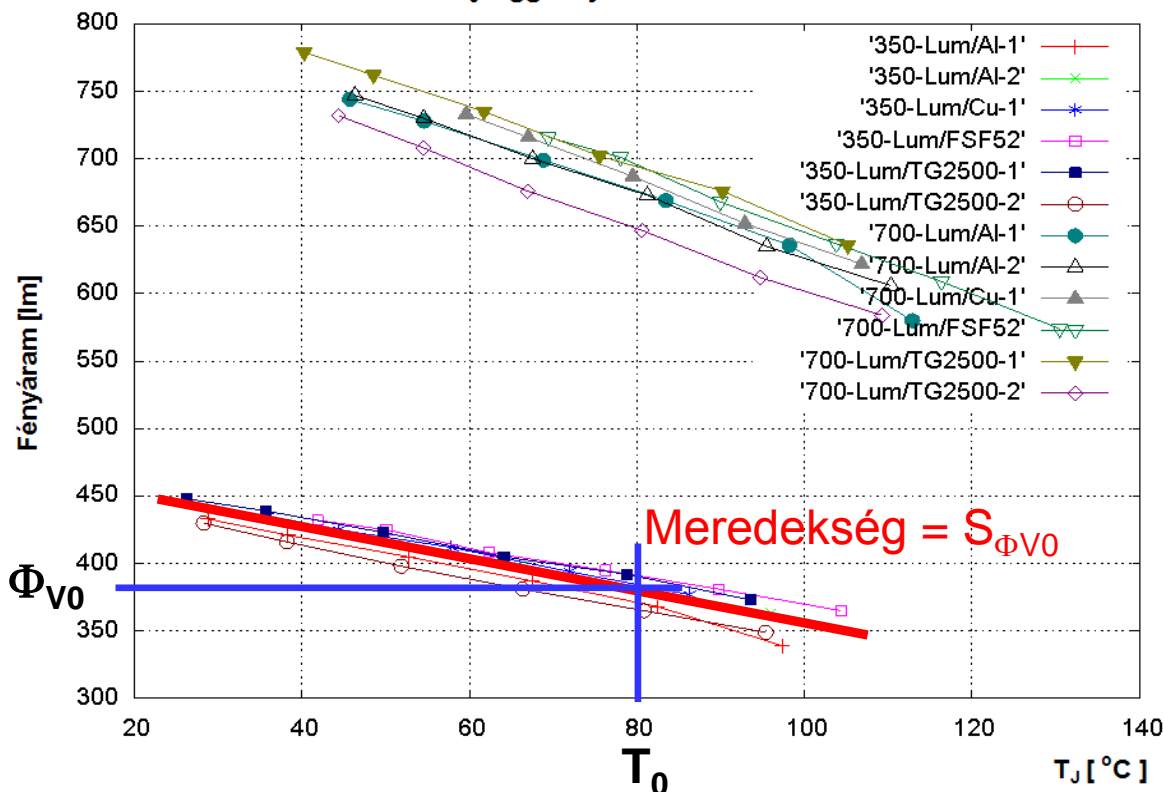
$$V_F(I_{F0}, T_J) = V_{F0} + S_{V_{F0}} \cdot (T_J - T_0)$$

- Nagyáramú karakterisztika szakaszon a fényáram (optikai teljesítmény) hőmérsékletfüggésére lineáris közelítés adható

$$\Phi_V(I_{F0}, T_J) = \Phi_{V0} + S_{\Phi_{V0}} \cdot (T_J - T_0)$$

$$\Phi_e(I_{F0}, T_J) = \Phi_{e0} + S_{\Phi_{e0}} \cdot (T_J - T_0)$$

Cree MCE1 LED-ek fényárama 350 mA-es és 700 mA-es munkapontban, T_J függvényében mérve



Hőmérsékletfüggés:
 @700 mA ~ -2.2 lm/°C
 @350 mA ~ -1.2 lm/°C

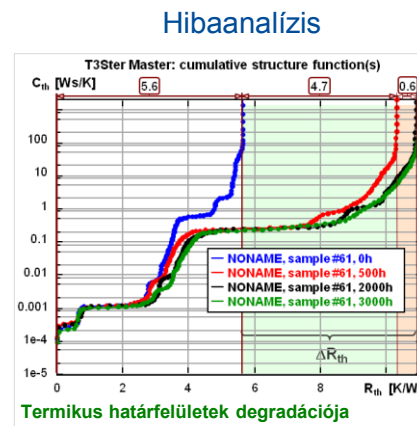
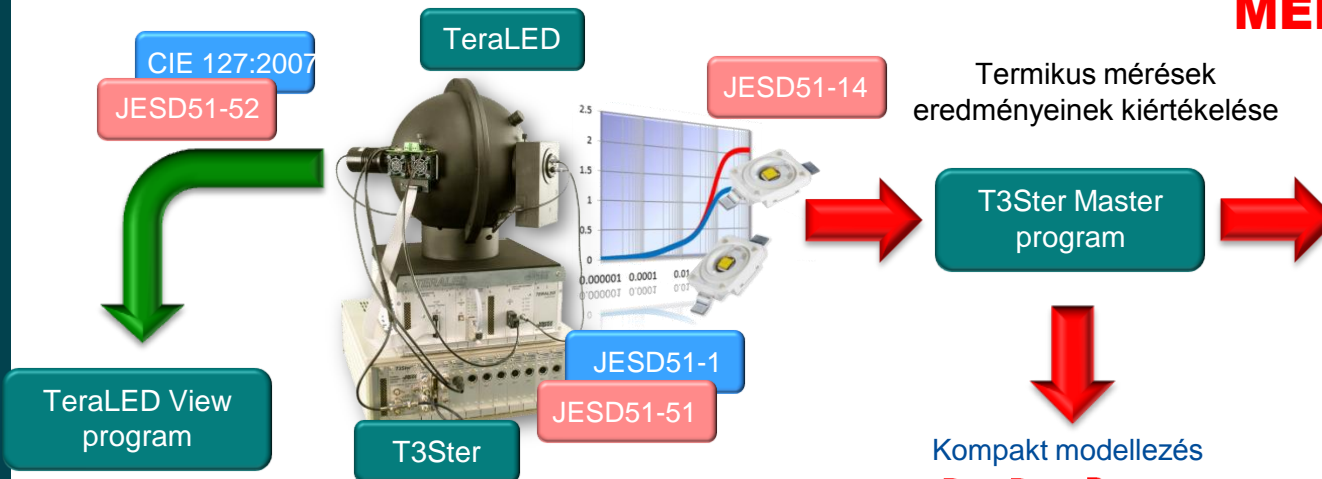
- Üzemi fényáram számítása CFD szimulációban



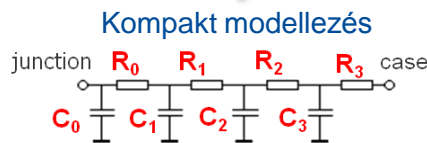
Termikus és optikai mérés és szimuláció

MÉRÉS

QA

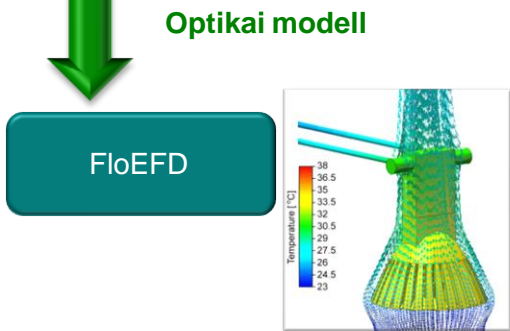


LED eszköz termikus karakterizációja és optikai paramétereinek mérése



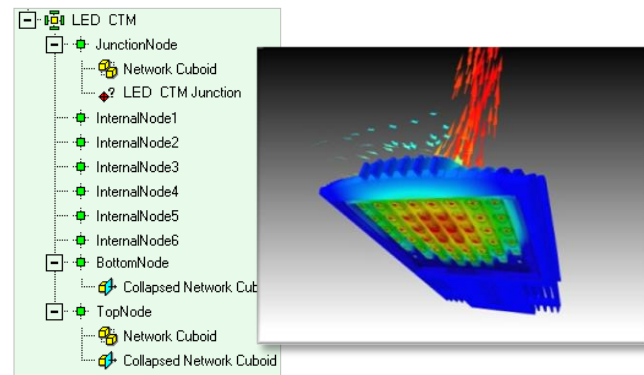
Kész termikus modell

SZIMULÁCIÓ



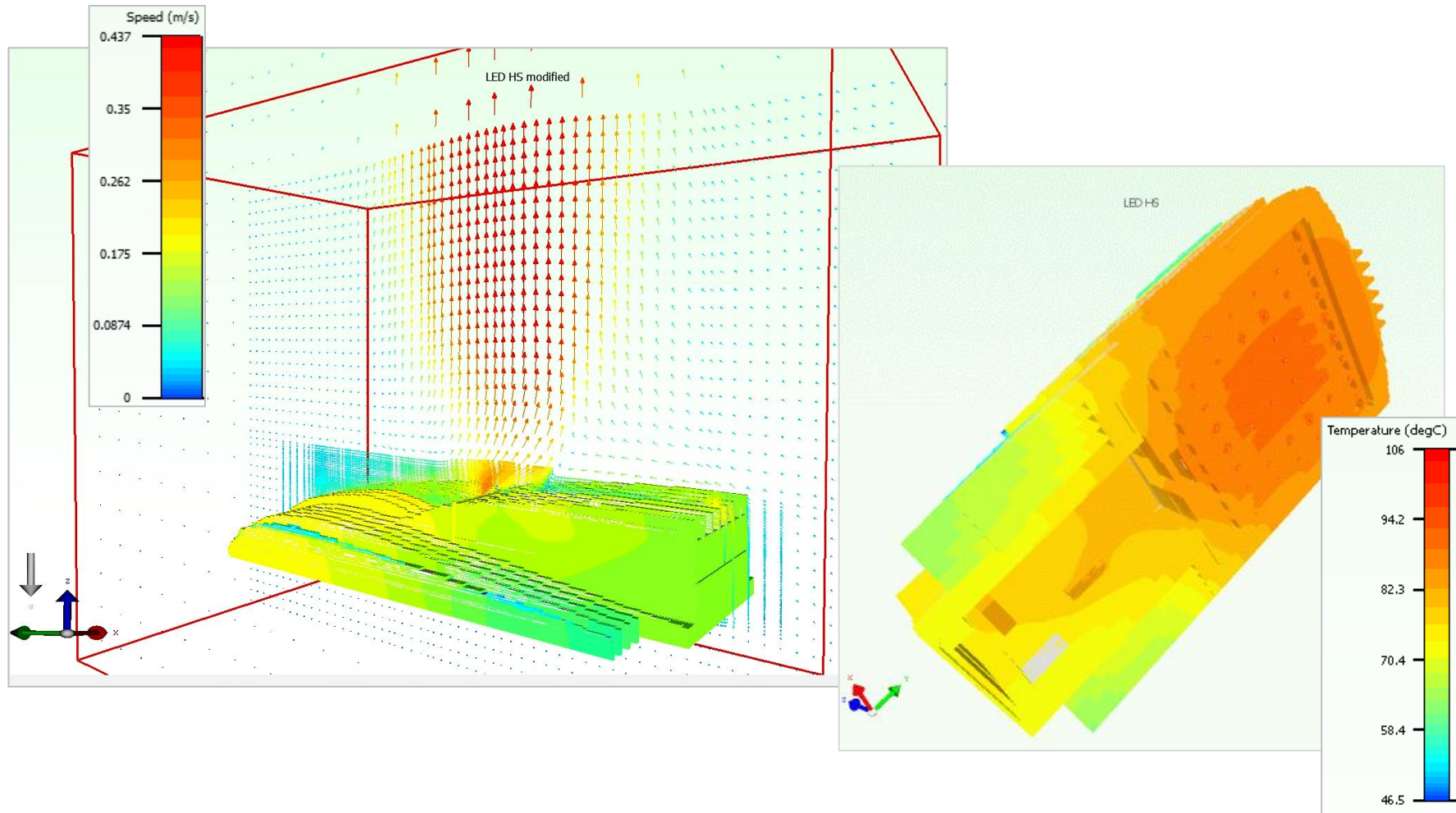
Lámpatest szintű szimulációk kompakt LED modellel.

FloEFD-ben az üzemi fényáram kiszámítása is része a szimulációnak. Az ehhez szükséges adatokat a TeraLED View program szolgáltatja.



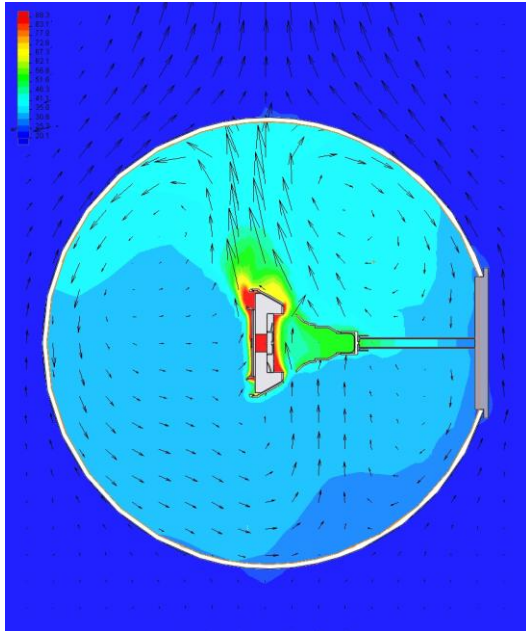
LED T_j ellenőrzése szimulációval

- ▶ LED tok: ún. kompakt modellel
- ▶ A lámpatestház egyben hűtőborda is: részletes CAD modell

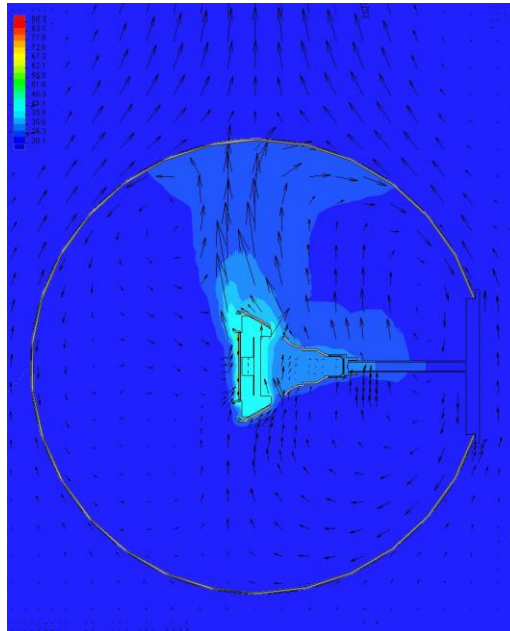


LED + hűtőborda: az *orientáció* is fontos

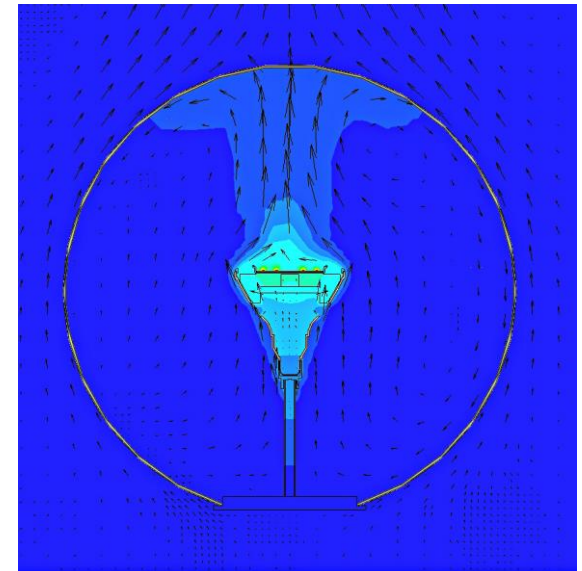
- ▶ Méréskor is, és a használat során is
- ▶ CFD szimulációk integráló gömbbe helyezett retrofit LED lámpáról:



Műanyag falú gömb: a külső (labor) környezet termikus hatása kicsi, de a LED lámpa felmelegíti...



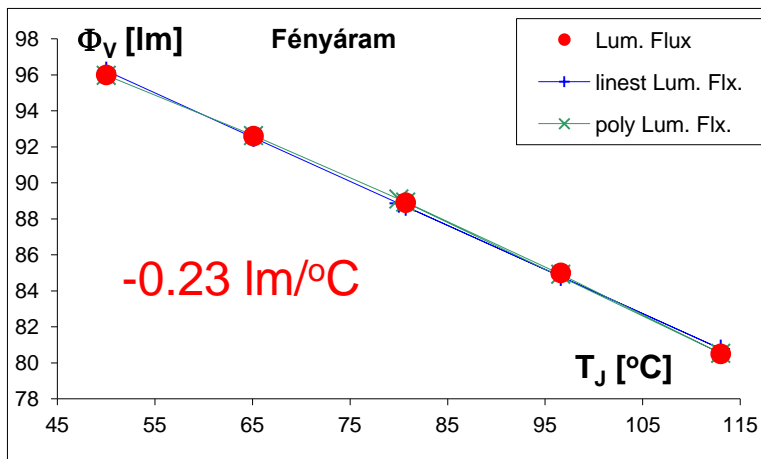
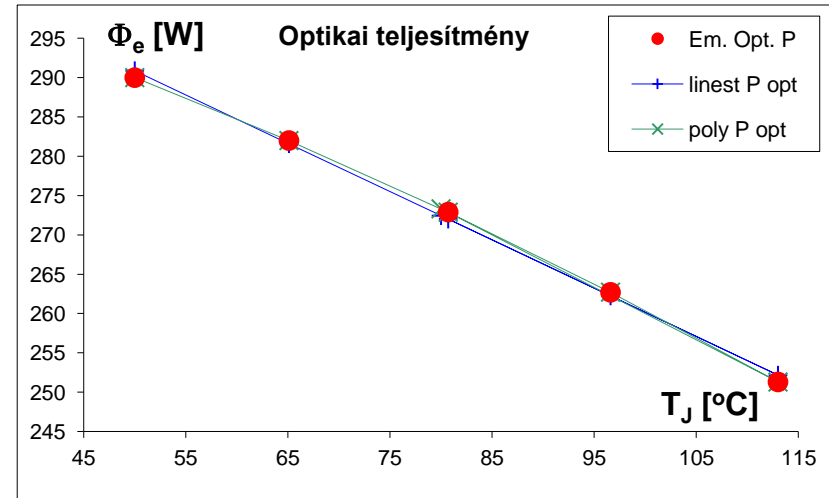
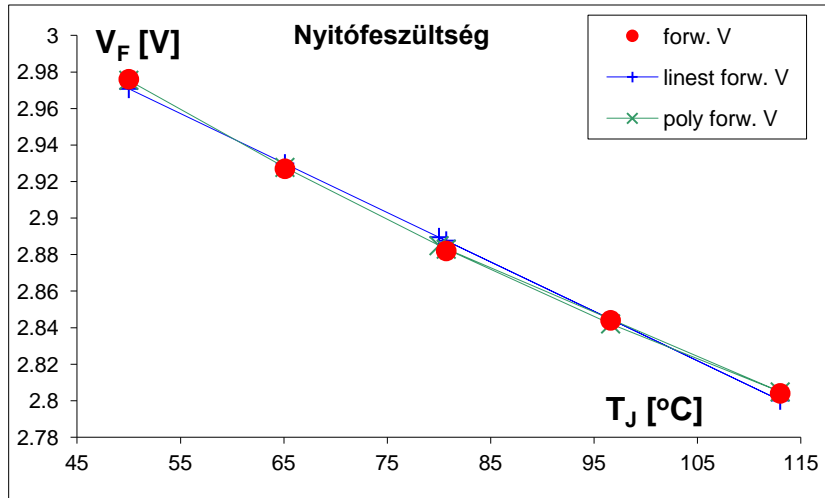
Fémről készült gömb: a külső (labor) környezet termikus hatása nagyobb és az visszahat a LED lámpára is



Az áramló levegő hűtő hatása függ a lámpa helyzetétől...

LED-ek mért hőmérsékletfüggése

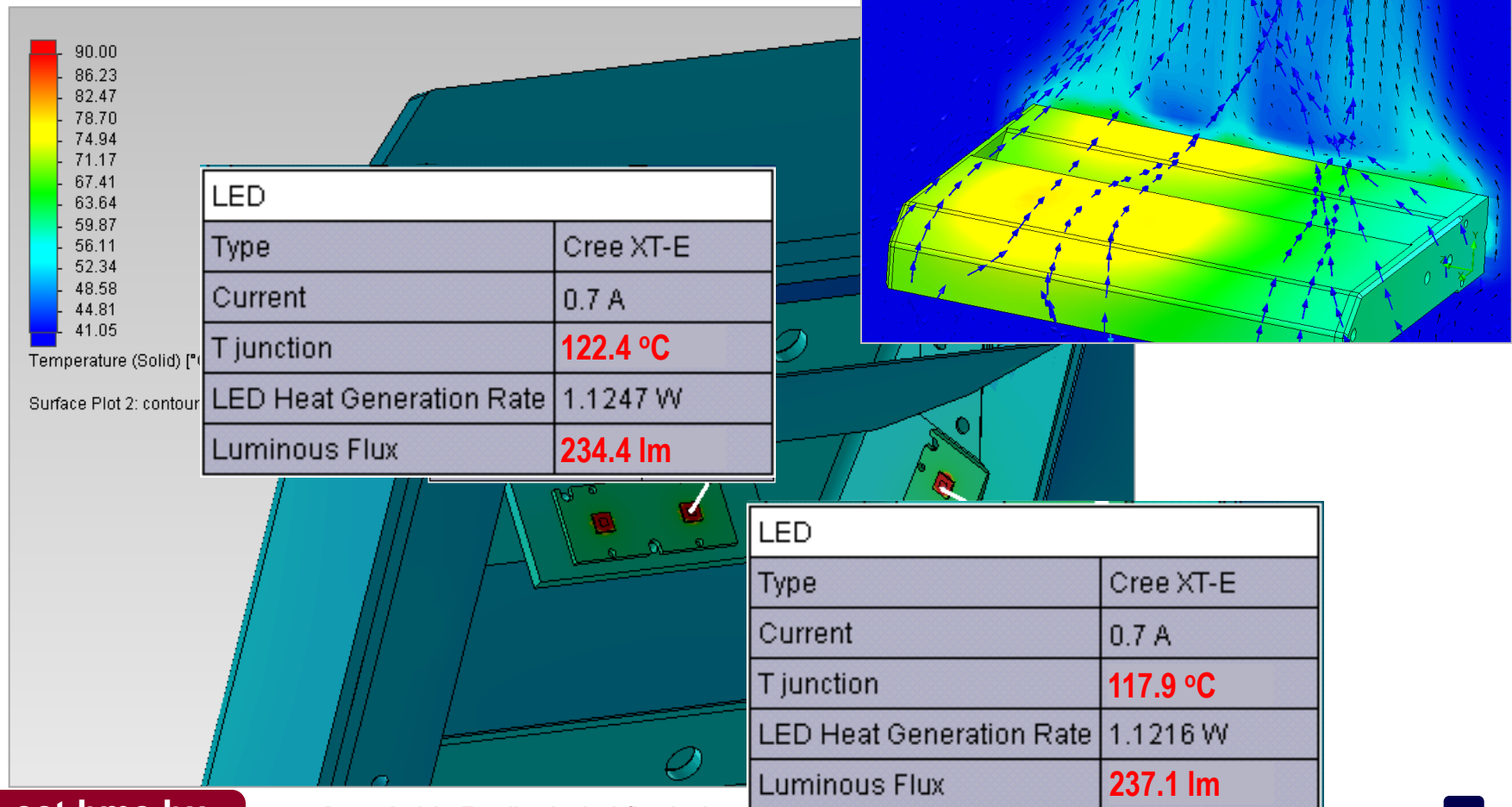
► Luxeon Rebel (fehér), $I_F = 350 \text{ mA}$



A fényáram hőmérsékletfüggése a regressziós görbe meredekségével jól jellemezhető

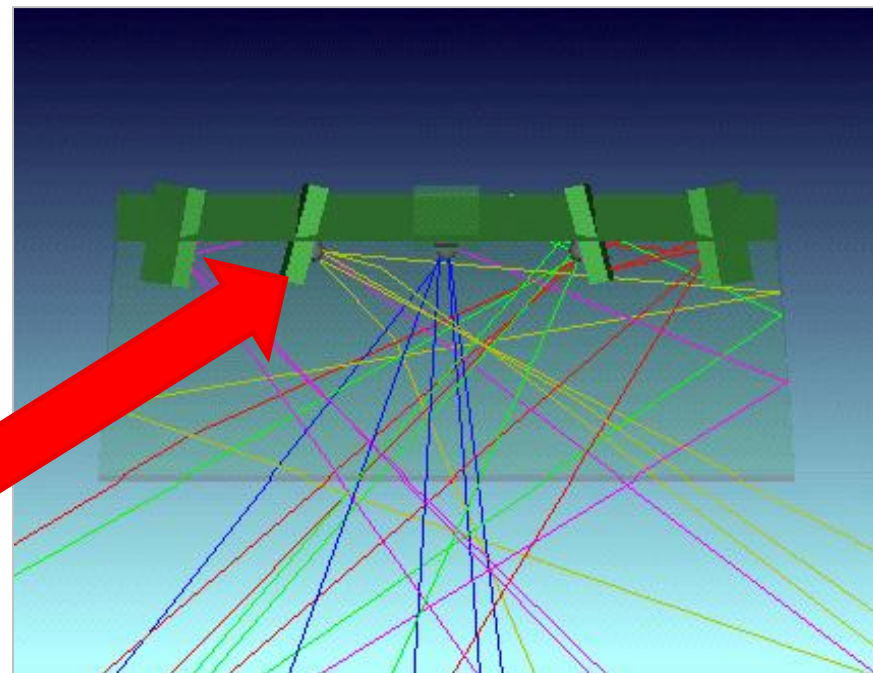
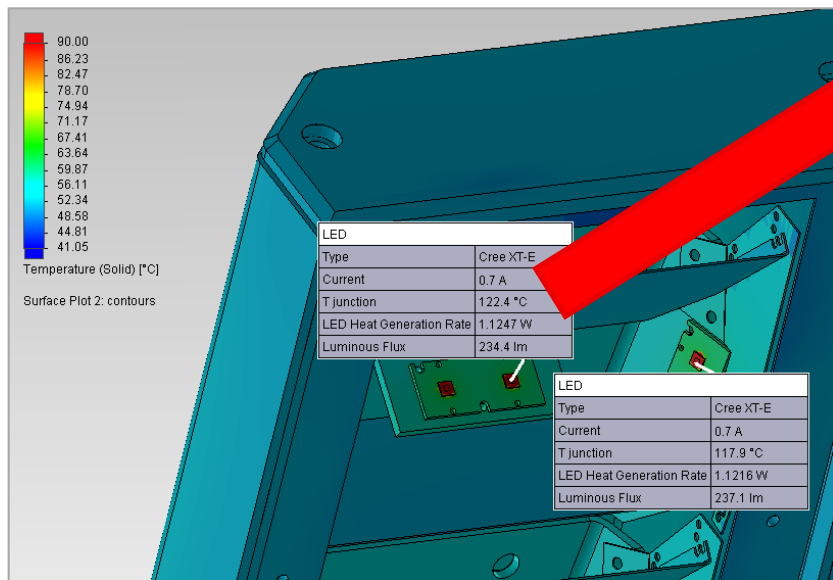
Üzemi fényáram számítása szimulációban

- ▶ KÖZLED projekt számára mérés, mérés alapján LED modellezés majd lámpatest szintű CFD szimuláció



Bemelegedett lámpatest fényeloszlása

- ▶ A termikus szimulációból kapott teljes üzemi fényáram értékeket figyelembe véve egy optikai szimulátorban a valós üzemi körülményeket legjobban tükröző fényeloszlást számolhatjuk:



GYAKORLATI KÉRDÉSEK



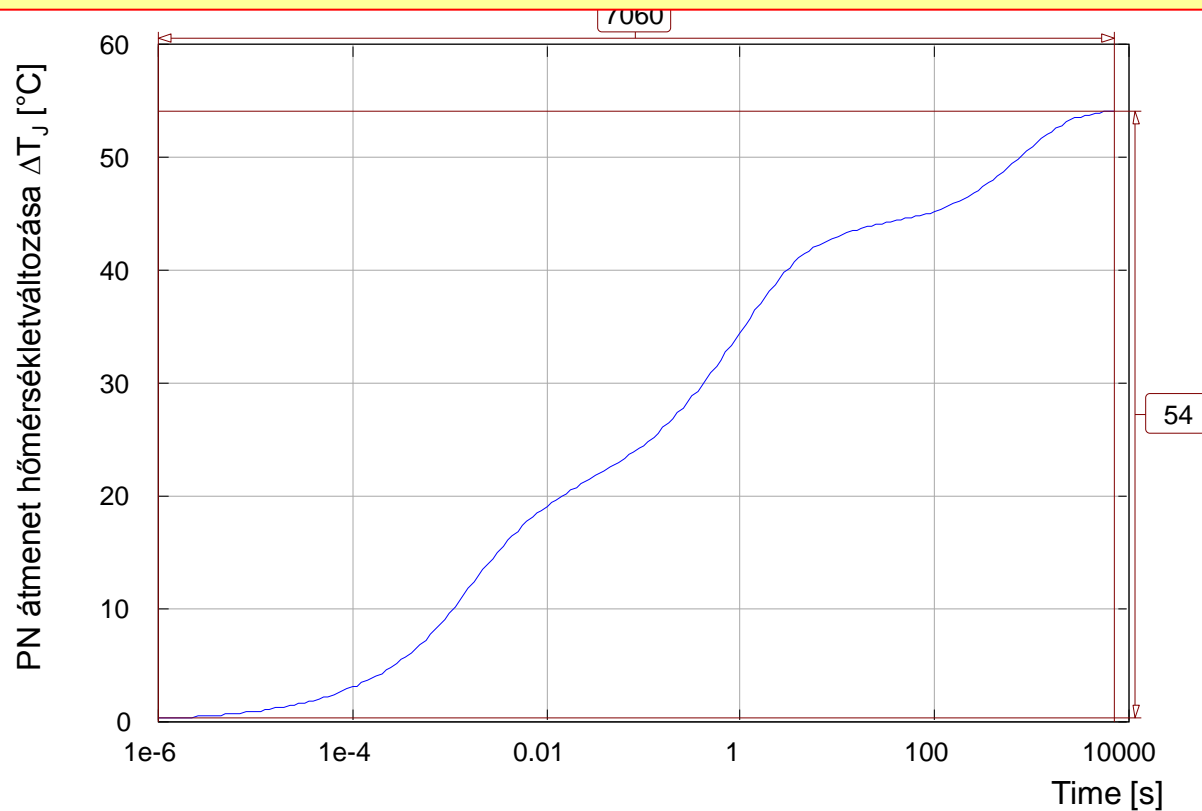
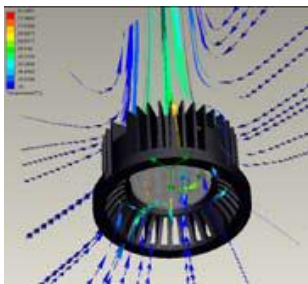
A fényáram alakulása bekapcsolás után:

- ▶ A LED-ek hőmérsékleti tranziensétől függ
- ▶ Ezt a teljes rendszer termikus időállandója határozza meg

$t_{\text{stab}} = 7060 \text{ s} = 1 \text{ h } 57 \text{ min } 40 \text{ s}$ (álló levegős kamrában mérve)

$\Delta T_J = 54 \text{ }^\circ\text{C}$ $S_{\Phi_V} \approx -0.2 \text{ lm}/^\circ\text{C} \rightarrow \Delta \Phi_V = -10.8 \text{ lm}$

$T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C} / \Phi_V = 100 \text{ lm} \rightarrow 10\text{-kal kisebb fényáram 2 óra elteltével}$



A lámpatest időállandójának becslése

► Még hosszabb mérés kellene..

► Becslés:

- **Konvekciós hőellenállás:** $R_{th_conv} = 1/(A \cdot h)$
 - A – a lámpatestház, mint hűtőborda aktív felülete
 - h – hőátadási tényező természetes konvekció esetében ($\approx 10 \text{ W/m}^2/\text{K}$)
- **Hőkapacitás:** $C_{th} = V \cdot c_v$
 - V – a lámpatestház, mint hűtőborda térfogata
 - c_v – a lámpatestház anyagának volumetrikus hőkapacitása
- **Termikus időállandó:** $\tau = R_{th_conv} \cdot C_{th} = 1/(A \cdot h) \cdot V \cdot c_v$
- **Szám példa:**
 - $A = 30 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} = 0.15 \text{ m}^2$, $V = A \times 10 \text{ cm} = 0.015 \text{ m}^3$
 - $h = 10 \text{ W/m}^2/\text{K}$, alumíniumra: $c_v = 2.421 \cdot 10^6 \text{ Ws}/(\text{m}^3\text{K})$
 - $\tau = 1/(10 \cdot 0.15) \cdot 0.015 \cdot 2.421 \cdot 10^6 \text{ s} = 2.421 \cdot 10^4 \text{ s}$
 - A vastagságot durván túlbecsültük, az 1/3-a reálisabb, azaz
 $\tau = 8070 \text{ s} \approx 2 \text{ h } 15 \text{ m}$

► **Tehát az üzemi fényáram ~ 2 óra alatt stabilizálódik**

A konvekciós hűtés degradációja:



Erről lefolyik... 😊

nem kritikus



LED-es

...erről nem ☹️

kritikus



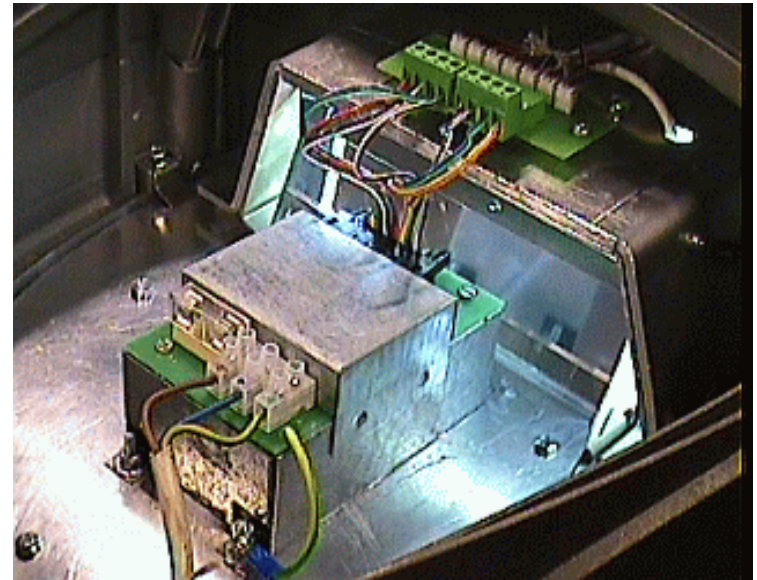
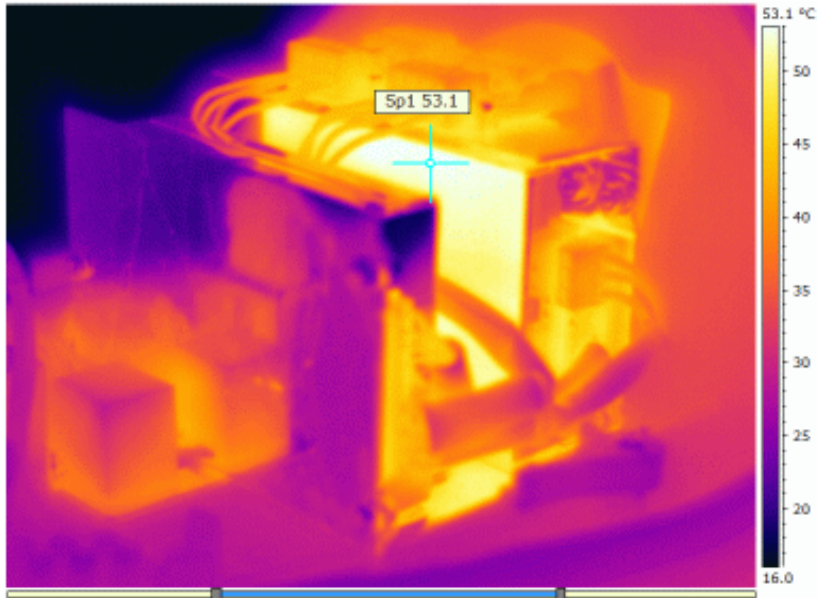
A guano hővezetőképességét, ill. hőátadási tényezőjét nem ismerjük, de biztos, hogy nagyságrendekkel rosszabb, mint a lámpatestház anyagáé...

A rosszabb hűtés miatt biztosan csökken a várható LED élettartam.



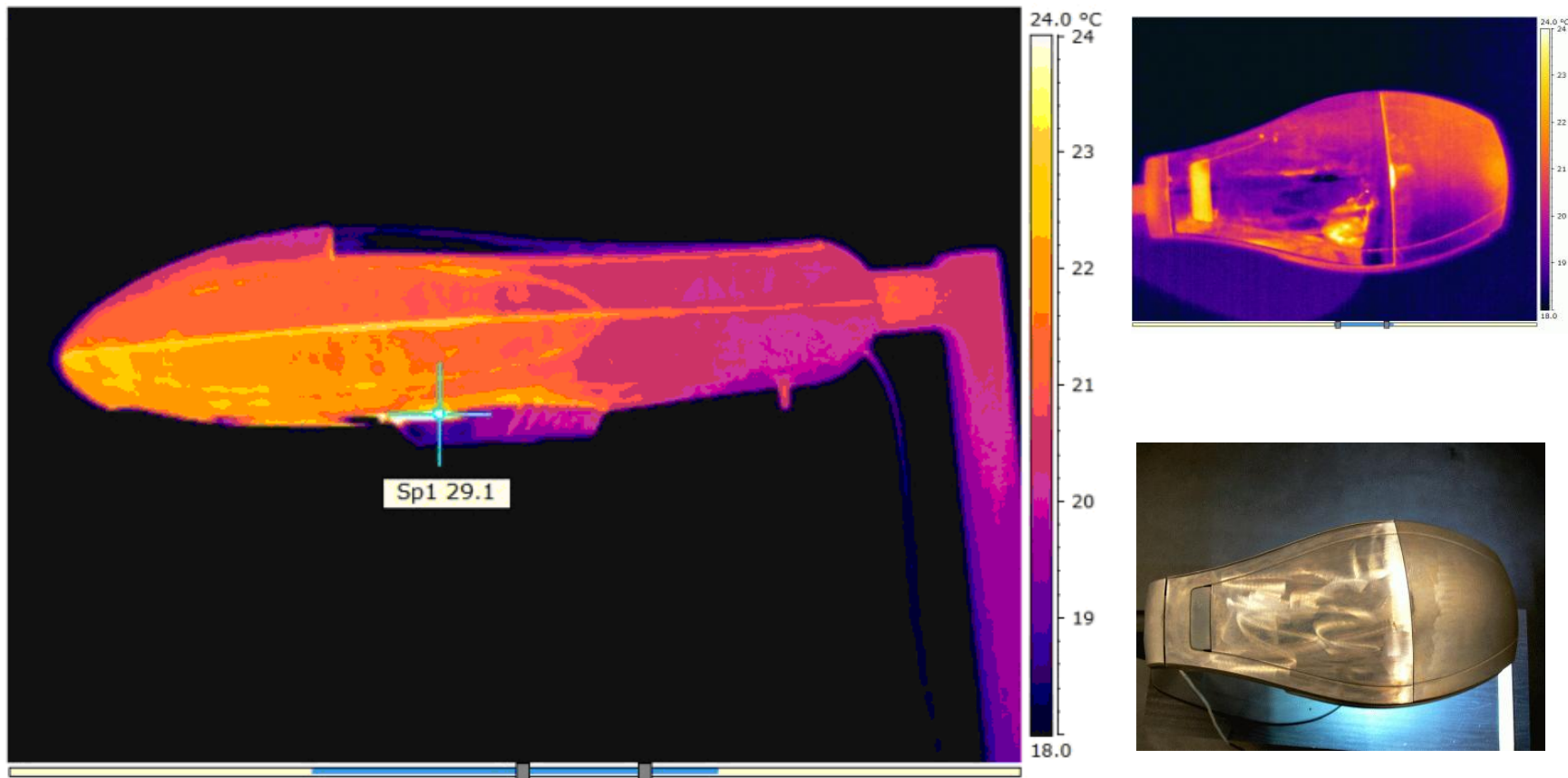
Nem csak a LED-ek melegednek

► Hanem a tápegység is...



Nem csak az áramló levegő hűthet:

- ▶ Adott esetben az oszlopfej hővezetése is besegíthet



- ▶ Ezt érdemes kihasználni, de nehéz jól megoldani
 - A jó hőátadáshoz pontos méretilleszkedés kellene...

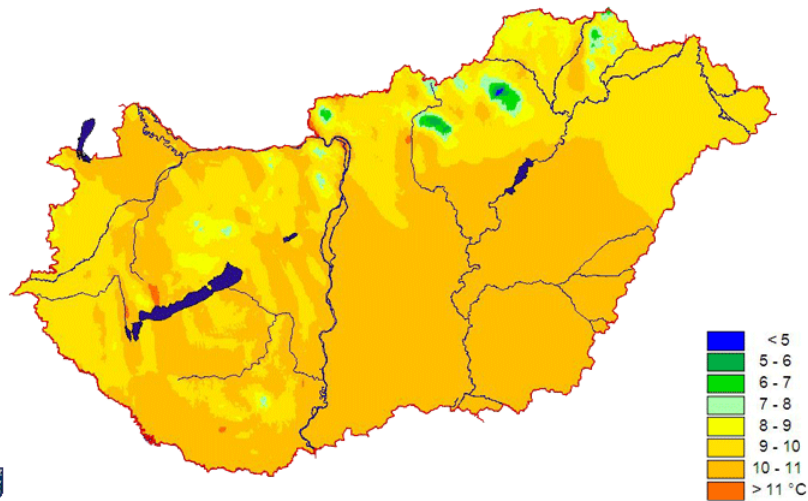
IDŐJÁRÁSI HATÁSOK



Az időjárás hatása a LED-es közvilágításra

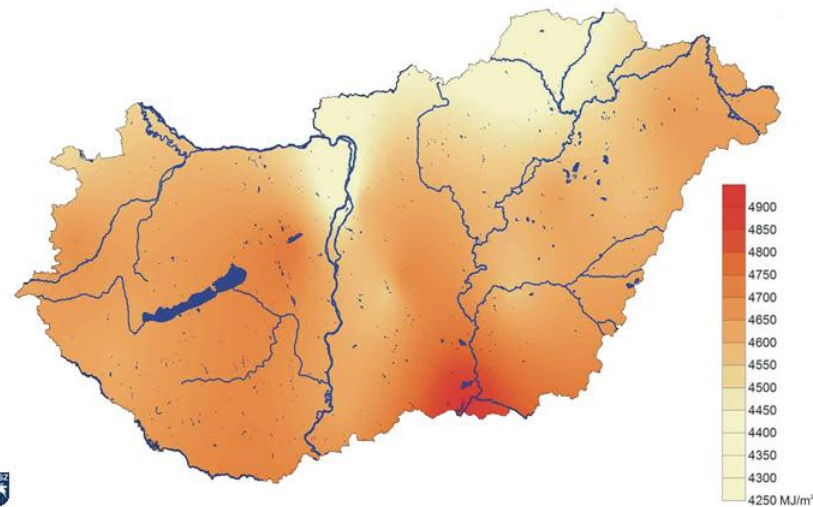
- ▶ **Melegebb időben kisebb fényáram, hidegebb időben nagyobb fényáram**
 - Nem mindegy, mikor mérünk megvilágítást
 - Várható legkisebb megvilágítás:
 - meleg nyári éjszakán, a LED-es közvilágítás bekapcsolása után 1-2 órával
 - Várható legnagyobb megvilágítás:
 - hideg téli éjszakán, azonnal a LED-es közvilágítás bekapcsolása után
 - Energiatakarékossági lehetőség: *hőmérsékletmérésen alapuló aktív fényáramszabályozás*
- ▶ Nem mindegy, hogy ugyanaz a LED-es lámpatest Magyarországon hol van telepítve
- ▶ **Túlmelegedés: erős napsugárzás mellett** bekapcsolt lámpasorban a LED-ek termikus megfutása előfordulhat
 - Emiatt is fontos a túlmelegedés elleni védelem

Az időjárás, mint környezeti hatás



Az évi átlagos középhőmérséklet Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján

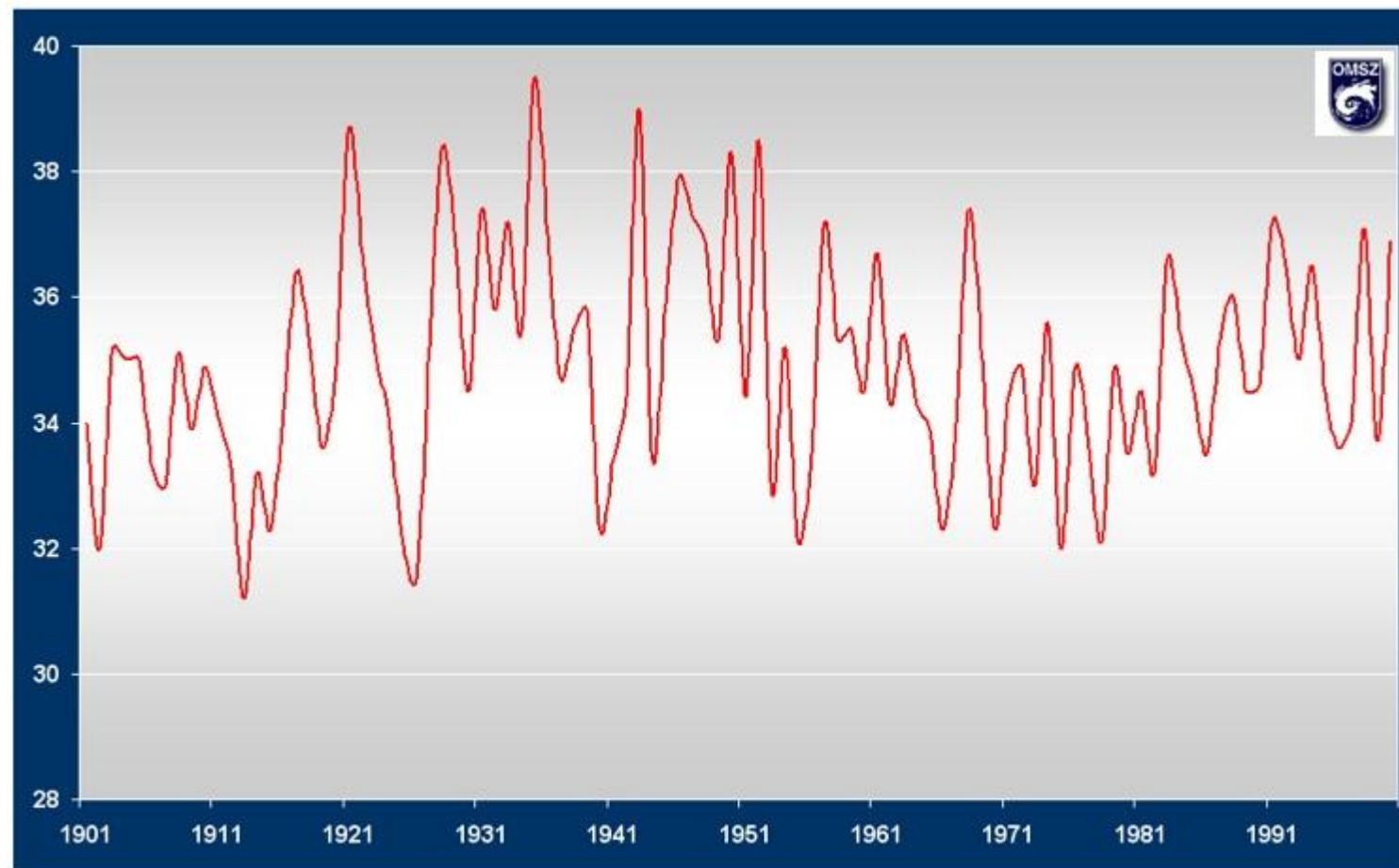
http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/sugarzas/
http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/homerseklet/



A globálsugárzás (MJ/m²) átlagos évi összege Magyarországon (2000-2009)

- ▶ Besugárzás, átlagos középhőmérséklet
- ▶ Maximális mért hőmérsékletek
- ▶ Meleg éjszakák

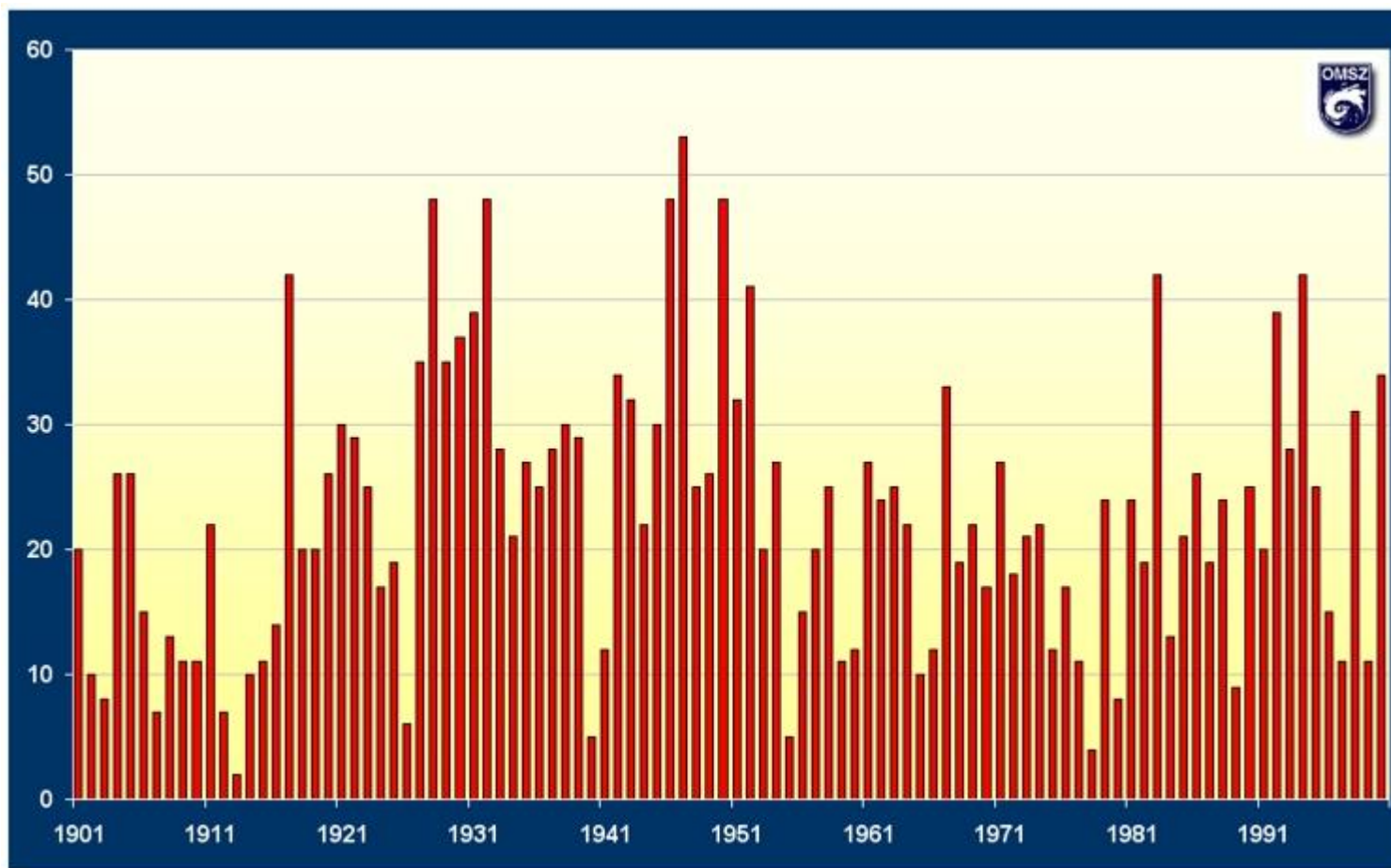
Maximális hőmérséklet



Az évi maximumhőmérséklet [°C]

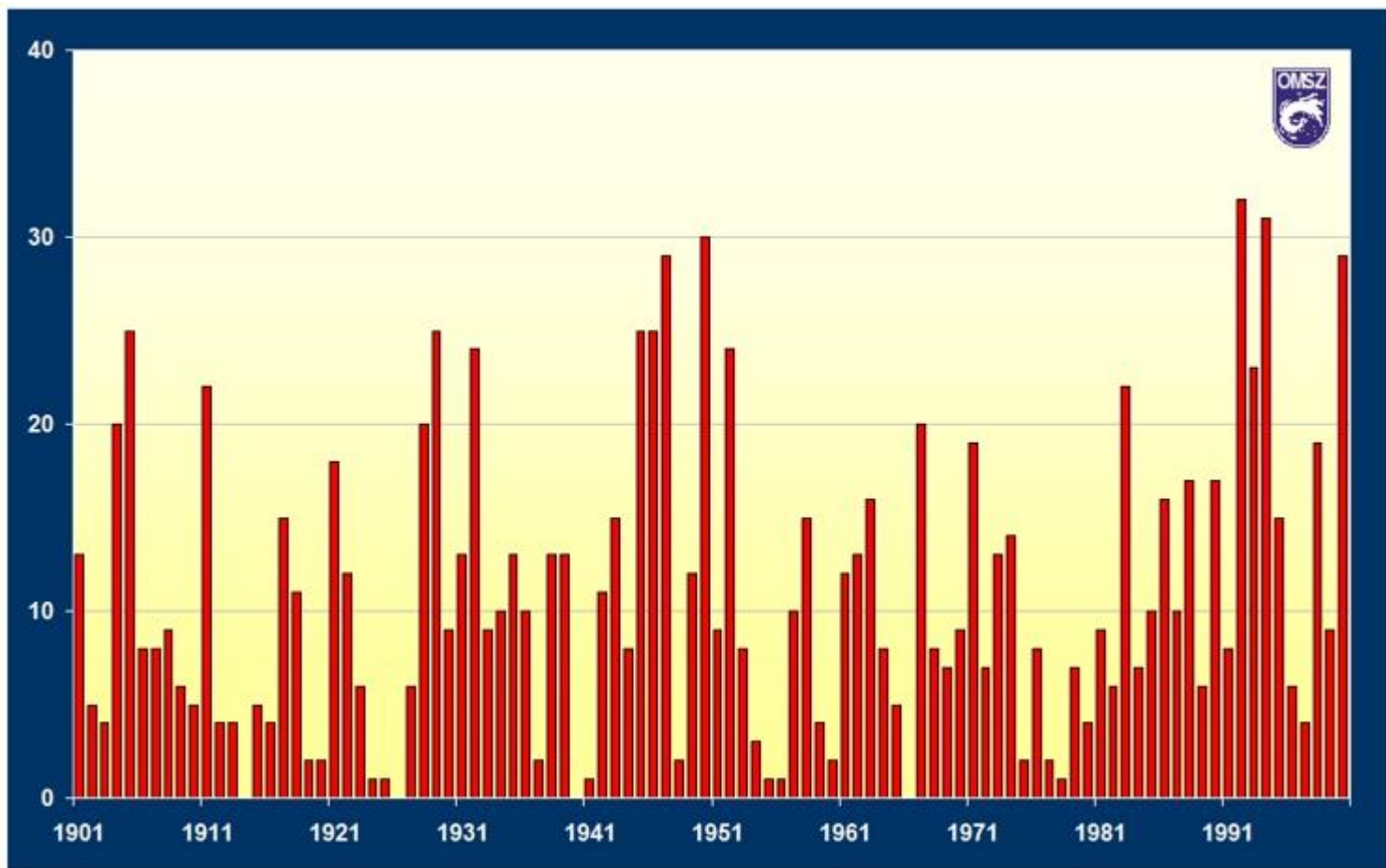
http://owww.met.hu/eghajlat/eghajlati_adatsorok/bp/Navig/Index2.htm

A hőségnapok száma – Budapest



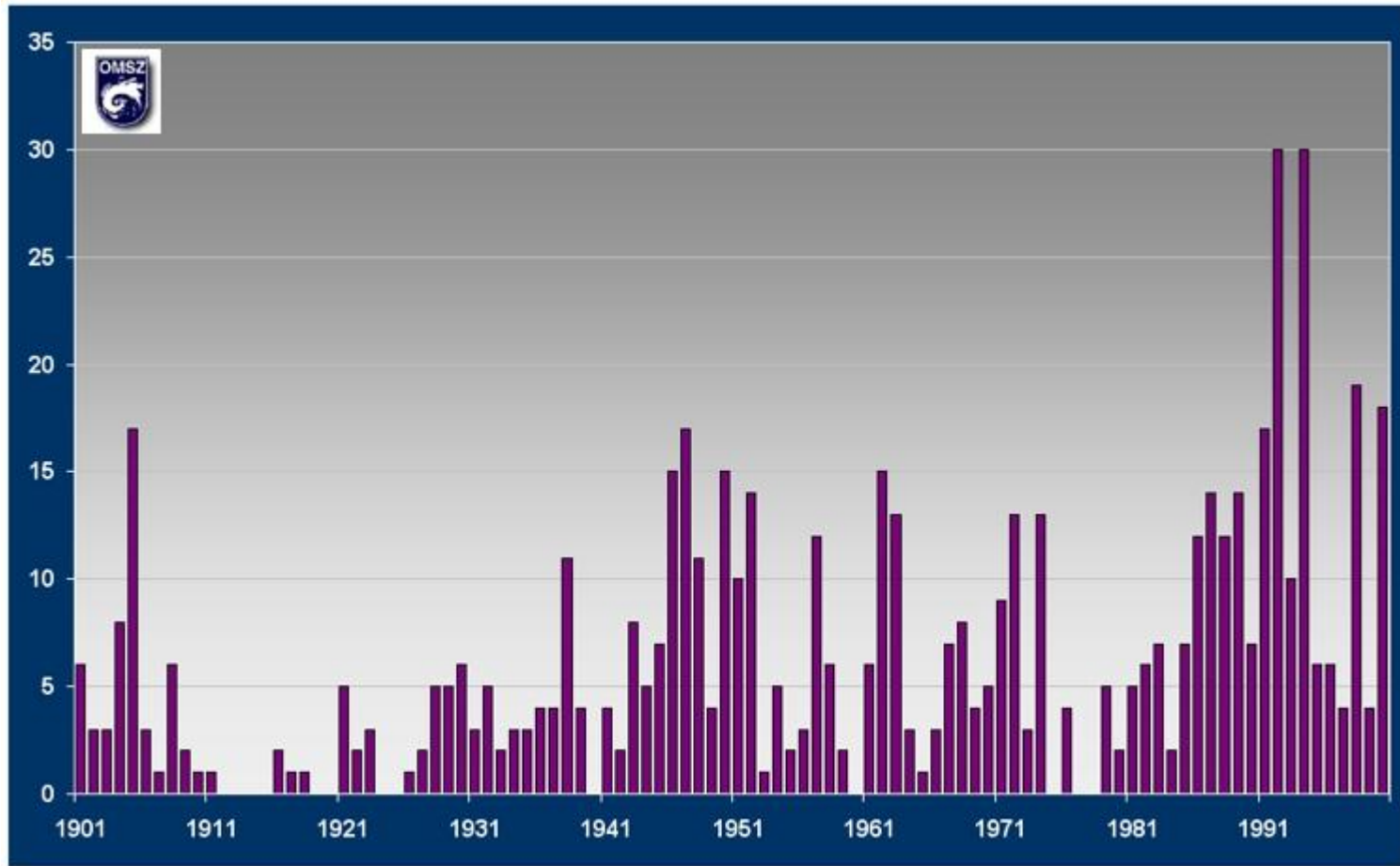
A hőségnapok ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) száma

A hőségnapok száma – Szombathely



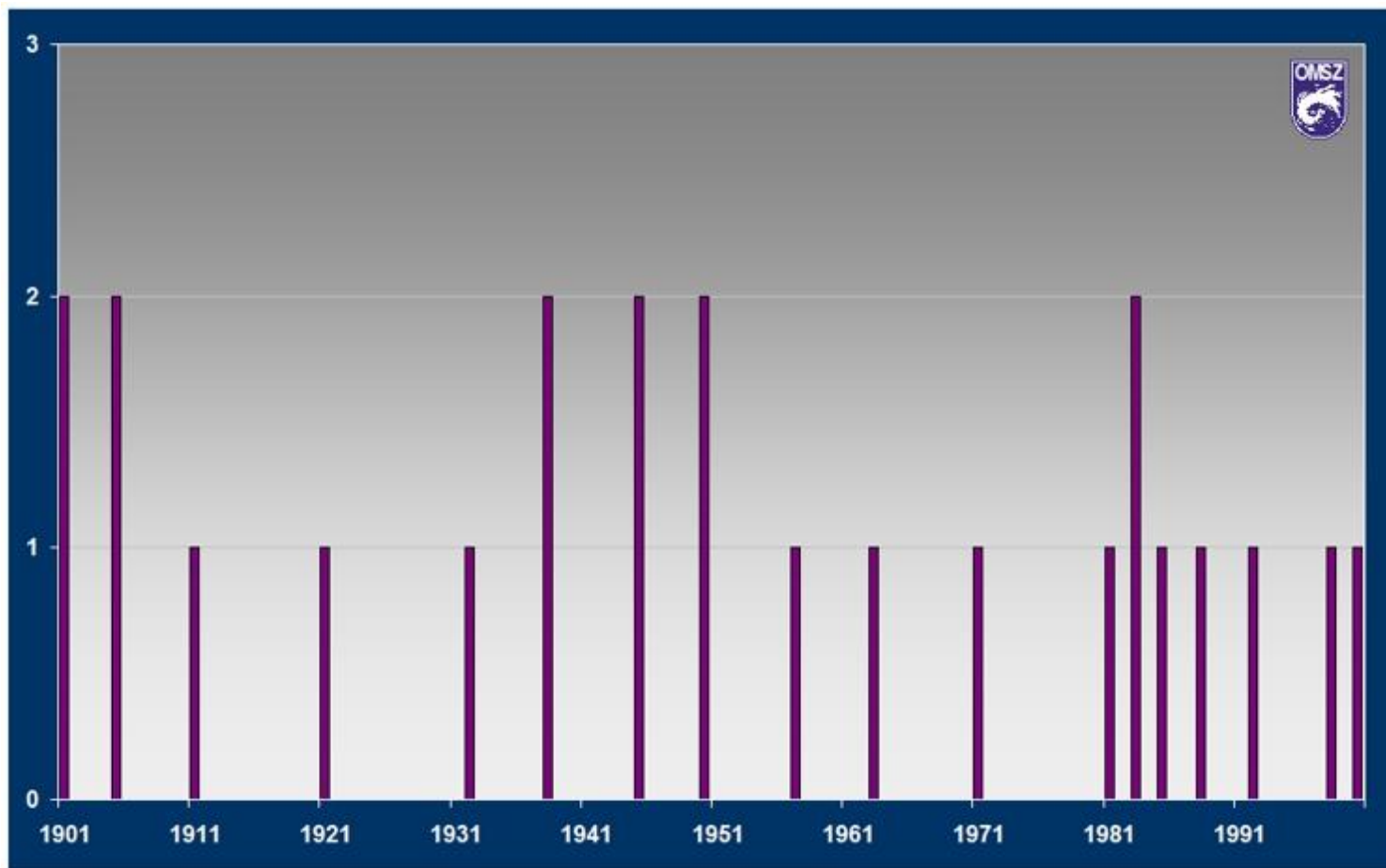
A hőségnapok ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) száma

A meleg éjszakák száma – Budapest



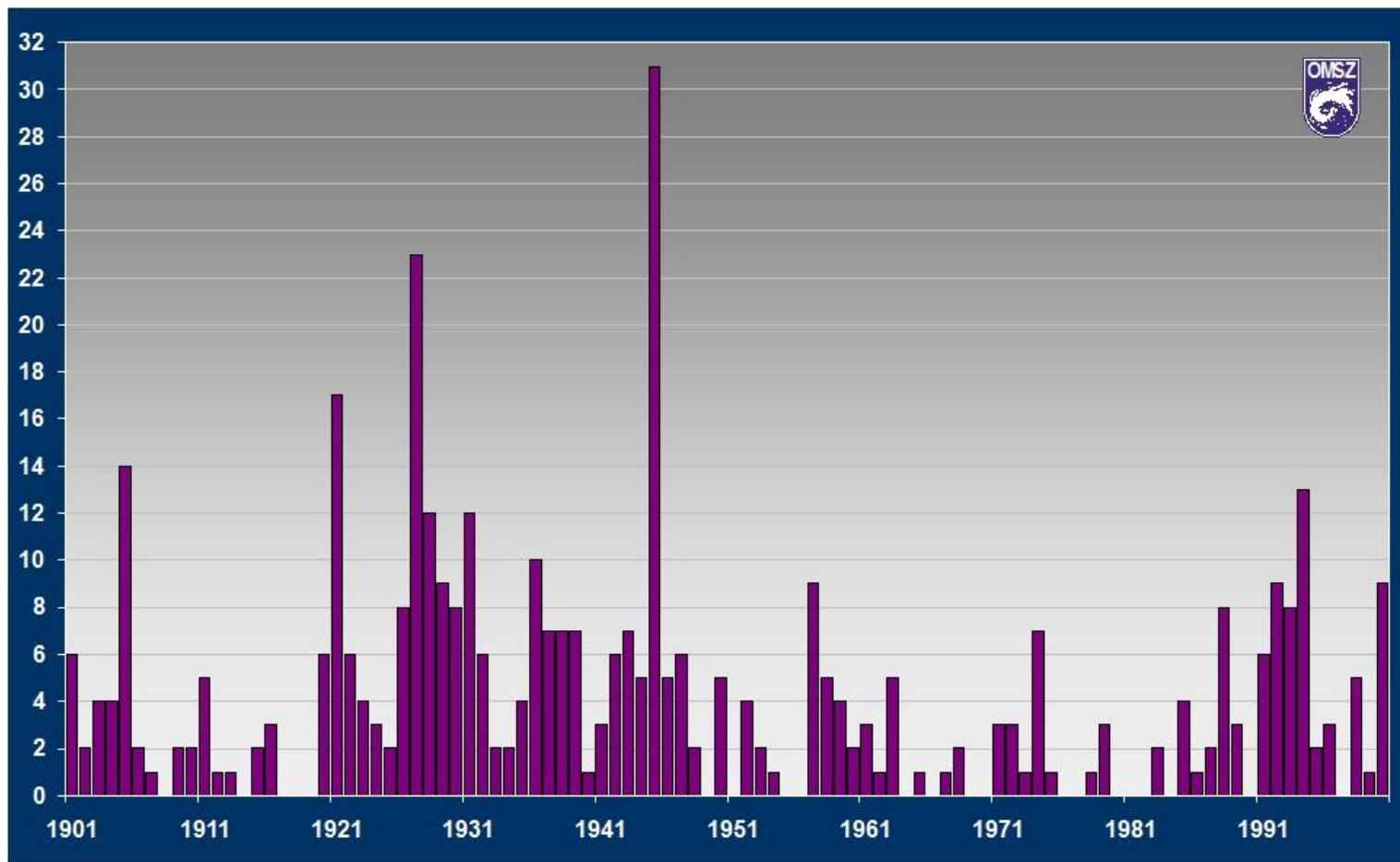
A meleg éjszakák ($T_n \geq 20^\circ\text{C}$) száma

A meleg éjszakák száma – Szombathely



A meleg éjszakák ($T_n \geq 20^\circ\text{C}$) száma

A meleg éjszakák száma – Pécs



A meleg éjszakák ($T_n \geq 20^\circ\text{C}$) száma

Az átlagos időjárási viszonyok hatása

▶ Nem egyenletes az átlagos évi

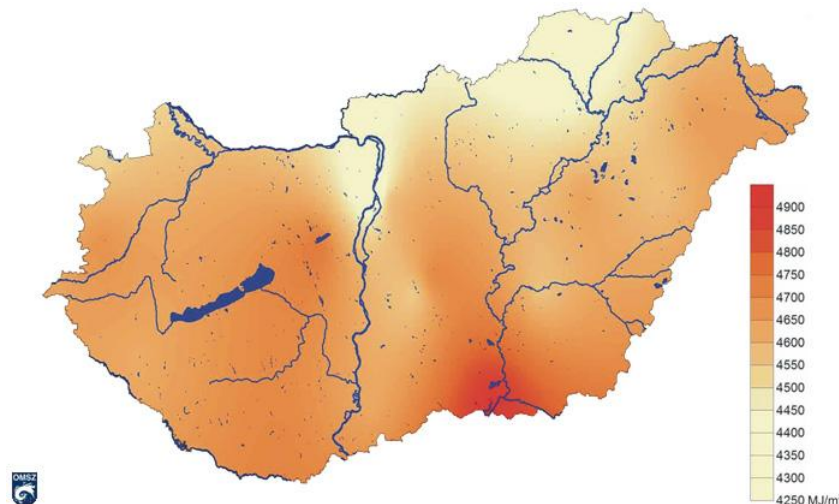
- besugárzás,
- napi középhőmérséklet,
- a meleg / fagyos éjszakák

eloszlása az országban.

▶ Az ugyanolyan névleges paraméterekkel rendelkező LED-es közvilágítási megoldás

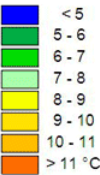
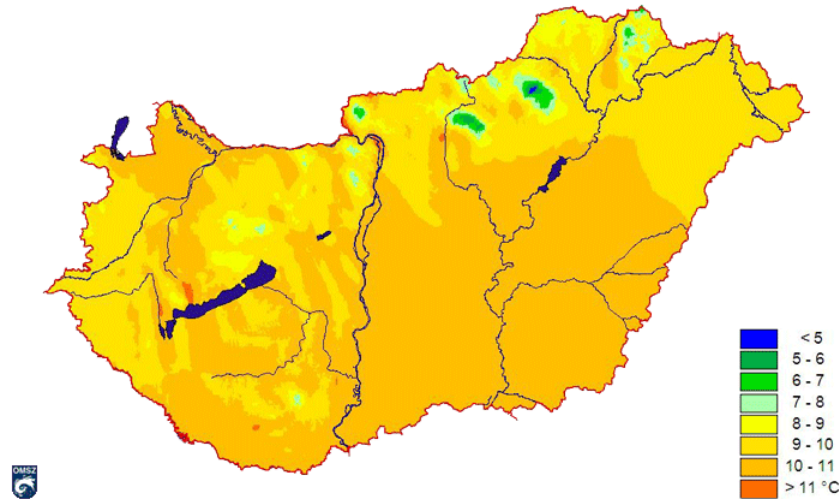
- várható élettartama,
- az általa biztosított átlagos megvilágítás és
- az elektromos energiaigény

is az ország különböző városaiban más és más lesz.



Az átlagos időjárási viszonyok hatása

- ▶ Az idézett példák szerint Budapest átlagosan melegebb, mint pl. Szombathely. (Miskolc még hűvösebb.)
- ▶ Ezért pl. Szombathelyen
 - hosszabb élettartam,
 - jobb átlagos megvilágítás de
 - nagyobb energiafogyasztás várható, mint Budapesten.
- ▶ Budapesten fontosabb a túlmelegedés elleni védelem, mint Szombathelyen



Szám példa (egy ~1W-os, 100 lm-es LED-re)

▶ LED paraméterek (adatlapai adatok pl. $T_J = 20\text{ °C}$ -ra): ,

- $\Phi_V(20\text{ °C}) = 100\text{ lm}$, $S_{\Phi_V} = -0.3\text{ lm/°C}$
- $V_F(20\text{ °C}) = 3\text{ V}$, $S_{V_F} = -2\text{ mV/°C}$
- $I_F = 350\text{ mA}$, $P_{el} = 1.055\text{ W}$
- $\Phi_e(20\text{ °C}) = 315\text{ mW}$, $S_{\Phi_e} = -1\text{ mW/°C}$
- $\eta_e(20\text{ °C}) = \Phi_e / (I_F \cdot V_F) = 315\text{ mW} / 1050\text{ mW} = 30\%$
- $\eta_V(20\text{ °C}) = \Phi_V / (I_F \cdot V_F) = 100\text{ lm} / 1.05\text{ W} = 95.24\text{ lm/W}$

▶ **Meleg nyári éjszaka: $T_J = 100\text{ °C}$** (pl. $T_{amb} > 30\text{ °C}$)

- $P_{el}(100\text{ °C}) = 0.350 \cdot (3 - 0.2 \cdot 80) = 0.994\text{ W}$
- $\Phi_V(100\text{ °C}) = 100 - 0.2 \cdot 80 = 84\text{ lm}$
- $\Phi_e(100\text{ °C}) = 315 - 1 \cdot 80 = 235\text{ mW}$
- $\eta_e(100\text{ °C}) = 235 / (350 \cdot (3 - 0.2 \cdot 80)) = 23\%$
- $\eta_V(100\text{ °C}) = 84 / (350 \cdot (3 - 0.2 \cdot 80)) = 84.5\text{ lm/W}$

Kiseb b fogyasztás

Kiseb fényáram

Rosszabb hatásfok

Rosszabb fényhasznosítás

▶ **Hideg téli éjszaka: $T_J = 60\text{ °C}$** (pl. $T_{amb} < 0\text{ °C}$)

- $P_{el}(60\text{ °C}) = 0.350 \cdot (3 - 0.2 \cdot 40) = 1.022\text{ W}$
- $\Phi_V(60\text{ °C}) = 100 - 0.2 \cdot 40 = 92\text{ lm}$
- $\Phi_e(60\text{ °C}) = 315 - 1 \cdot 40 = 275\text{ mW}$
- $\eta_e(60\text{ °C}) = 275 / (350 \cdot (3 - 0.2 \cdot 40)) = 26.9\%$
- $\eta_V(60\text{ °C}) = 92 / (350 \cdot (3 - 0.2 \cdot 40)) = 90.02\text{ lm/W}$

Nagyobb fogyasztás (2.8%)

Nagyobb fényáram (9.5%)

Jobb hatásfok

Jobb fényhasznosítás (8.9%)

De egyik paraméter sem az adatlapai érték...☹

Multi-domain szimuláció kéne

Összefoglalás

- ▶ LED-es világítástechnikai megoldásoknál fontos a jó hűtés. Kisebb LED hőmérséklet
 - hosszabb várható élettartamot,
 - nagyobb fényáramot és
 - jobb fényhasznosítást eredményez.
- ▶ A hűtés végső soron konvekciós hűtés lesz, ezért a szabad levegőáramlás biztosítása fontos
- ▶ A LED-ek fényárama akkor stabilizálódik, amikor a LED pn-átmenet hőmérséklete stabilizálódik
 - Ezt végső soron a LED hűtőborda (lámpatestház) termikus időállandója szabja meg
 - Nagyságrendileg 1..2 óra
 - A konvekciós viszonyok függenek a lámpa/lámpatest orientációjától is

Összefoglalás

- ▶ LED-es közvilágítás esetében a környezeti feltételek is befolyásolják a termikus viszonyokat
 - A felszerelési hely átlagos hőmérséklete
 - Egyéb környezeti feltételek (pl. madárürülék) és a lámpatest(ház) kölcsönhatása
- ▶ A hosszú távú működési paramétereket ezek együttese határozza meg