



# **Olaj-papír szigetelésű transzformátorok helyszíni szárítási lehetőségei**

**Csépes Gusztáv, Diagnostics Kft.**



## **Tartalomjegyzék**

- 1. Az előadás aktualitása**
- 2. Az olaj-papír szigetelés és az elnedvesedés**
- 3. Nedvesség mérése**
- 4. Nedvességeltávolítási lehetőségek**
- 5. Olajszárítás, olajkezelés, olajregenerálás, olajcsere**
- 6. Konklúziók**



## **Az előadás aktualitása: két előadás lesz a témával kapcsolatosan**

- **Transzformátorok alacsonyfrekvenciás fűtése a helyszínen**
- **Olajregenerálás**
- Mindkét témánál közös az olaj-papír szigetelés elnedvesedése és szárítása

Elengedhetetlen az alapvető folyamatok áttekintése, mint:

- Az elnedvesedés folyamatának főbb ismérvei,
- Az elnedvesedés következményei,
- Az elnedvesedés mérésének lehetőségei,
- Az elnedvesedés hatásának csökkentése



## Trafó szigetelőpapíros állapotjellemzői és romlása

### Transzformátor élettartama = Szilárd szigetelés élettartama

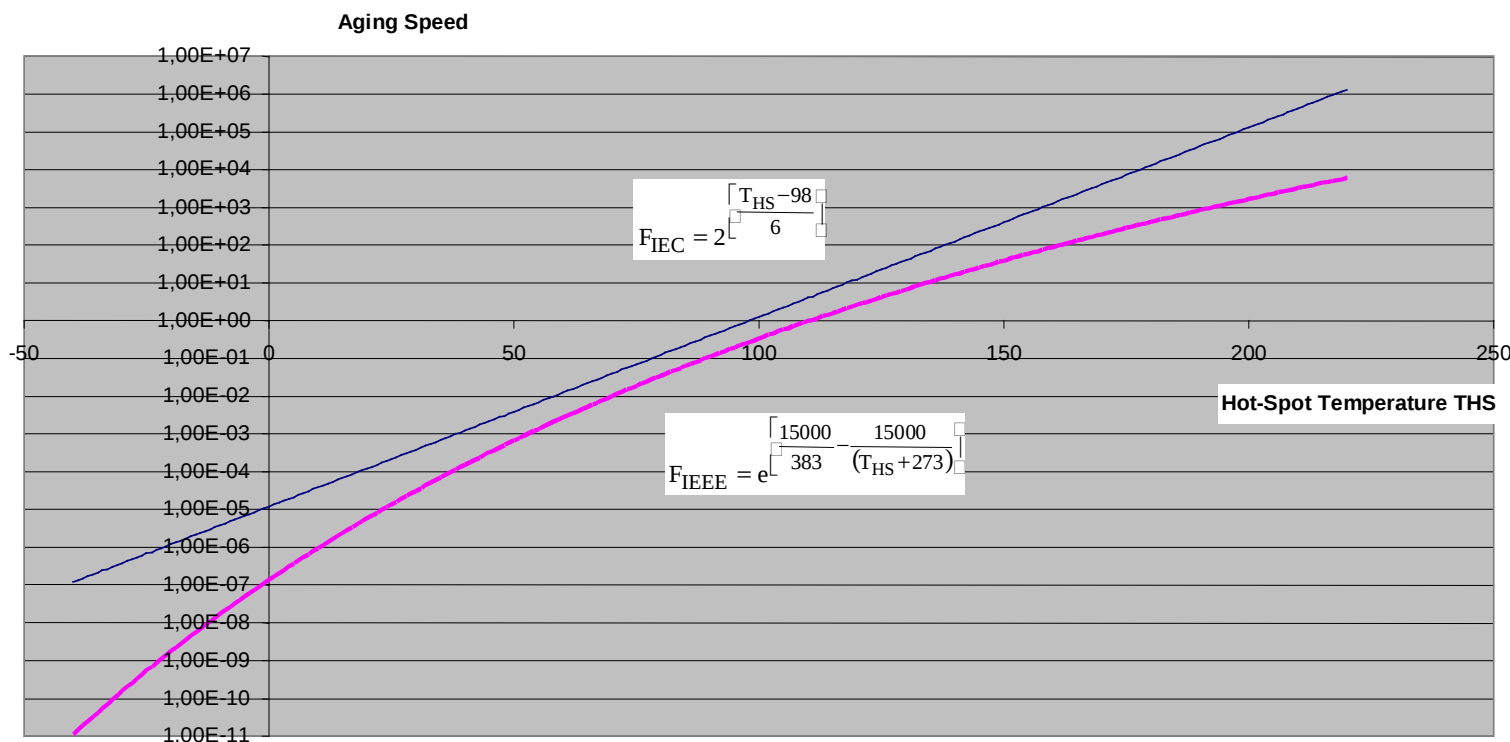
- **Cél:** olyan **vizsgálati rendszer** létrehozása, amely felvilágosítással szolgál a papíros anyagának **degradációjáról**, a **nedvességtartalomról** és a papíros aktív felületén **adszorbeált öregedési termékekről**.
- A transzformátor élettartamát tekintve a meghatározó tényező a **szilárd szigetelés, azaz az olajjal impregnált papír**.
- **A papír élettartama határozza meg a trafó élettartamát, ezért mindent el kell követni a papír állapotának megőrzésért.**
- Olaj-papír szigetelési rendszerek papírjára a nedvesség főképpen a következő formákban fejti ki a hatását:
  - gyorsítja a papír öregedését, degradációját,
  - növeli a szigetelési rendszer veszteségeit,
  - megteremtheti a részleges kisülések megindulásának a feltételeit,
  - gyors felmelegedés, hirtelen erős felterhelés esetén a nedvesség a papírból az olajba kerül, ahol átmenetileg vízcseppek formájában kicsapódhat.

## Olaj-papír szigetelés: a hőmérséklet hatásának elemzésére van szabvány

Olaj-papír szigetelés élettartama IEC szerint: 98°C hőfokon kb. 25 év

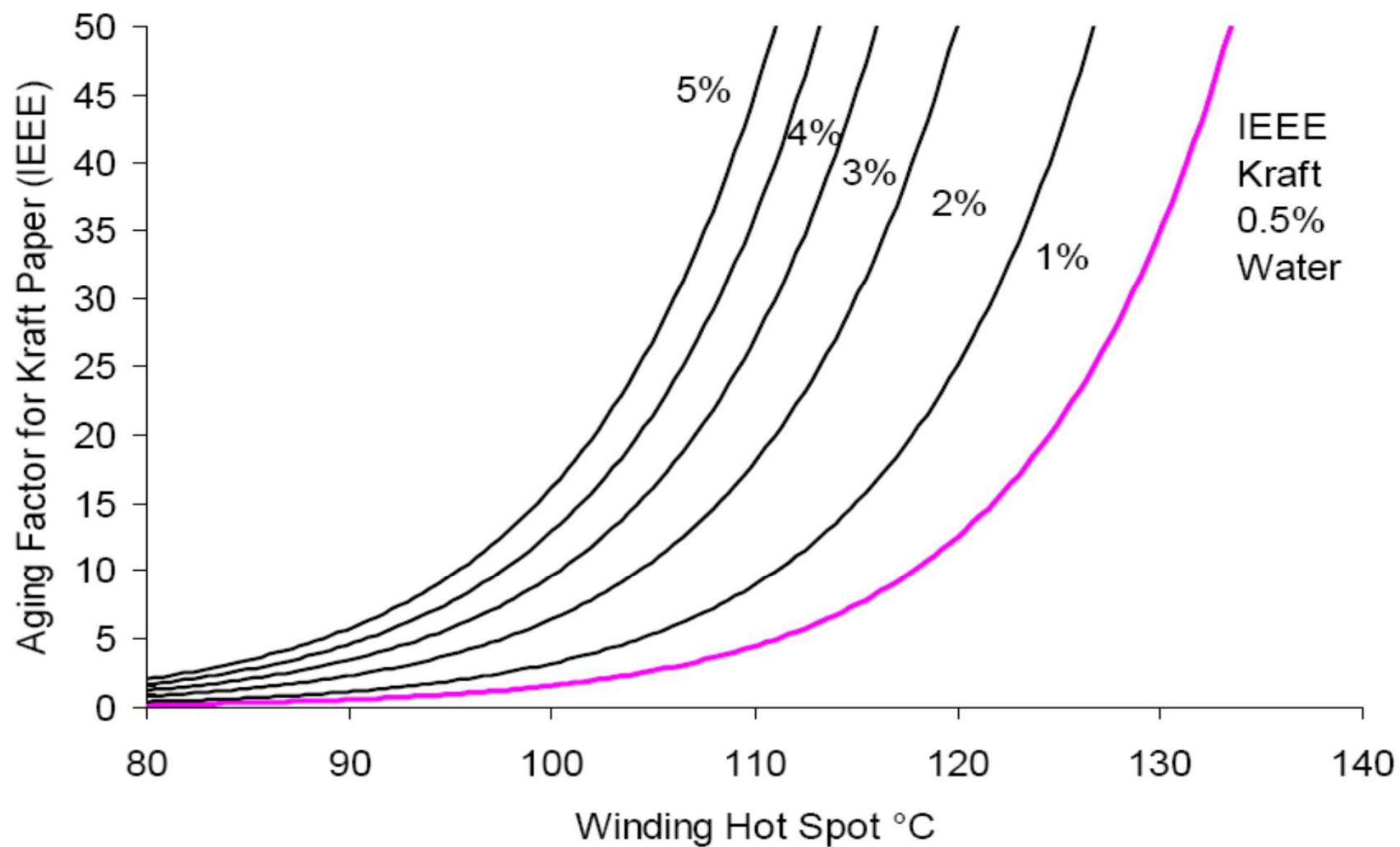
A szabványok **csak a hőmérséklet hatásával** foglalkoznak, de tudjuk, hogy a **nedvesség** és az **öregedési** termékek is gyorsítják a papír romlását.

### IEC and IEEE Aging

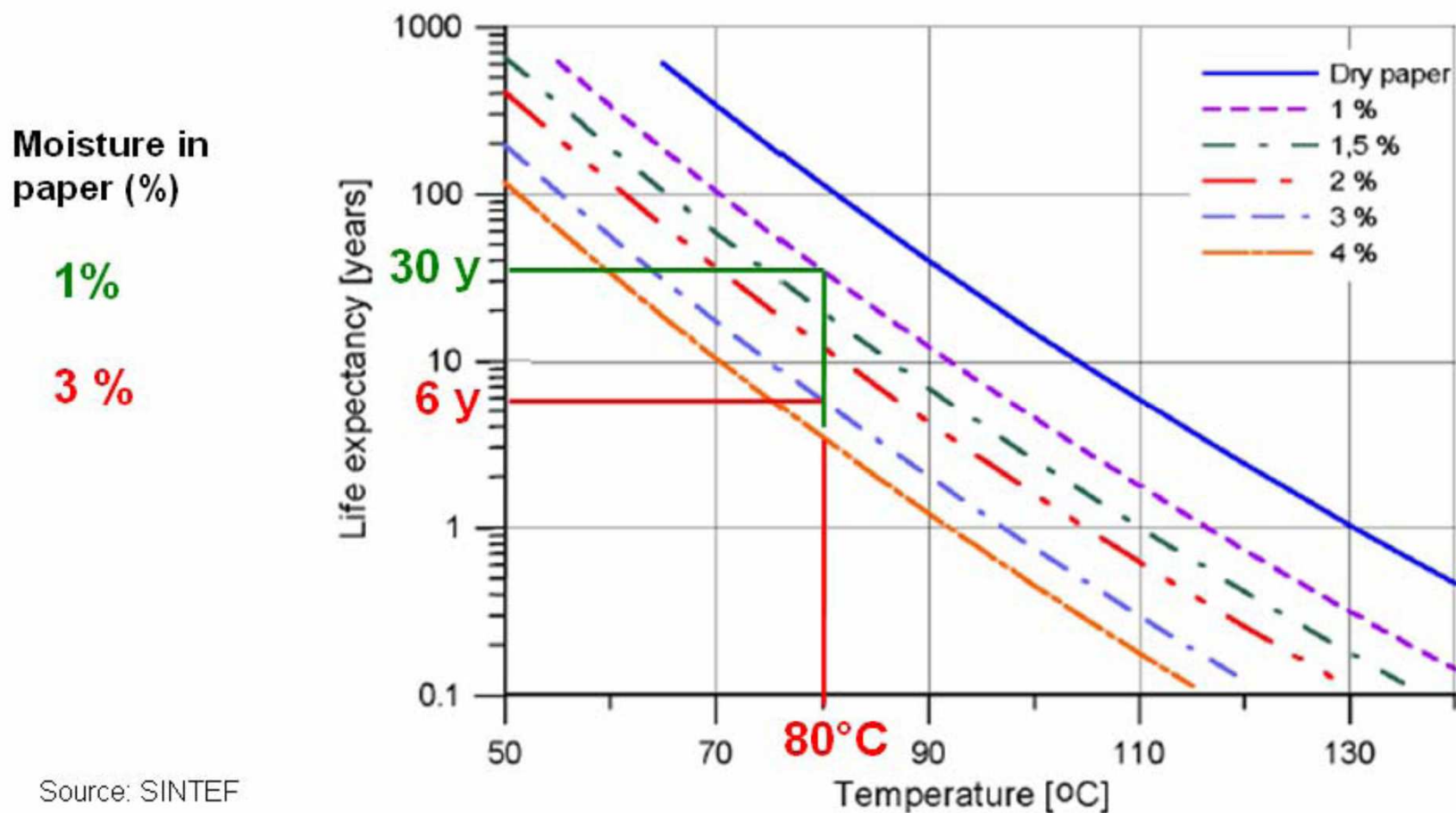




## Kraft papír öregedési tényezője (IEEE)



## Transzformátor élettartamának függése a hőmérséklettől és a nedvességtartalomtól



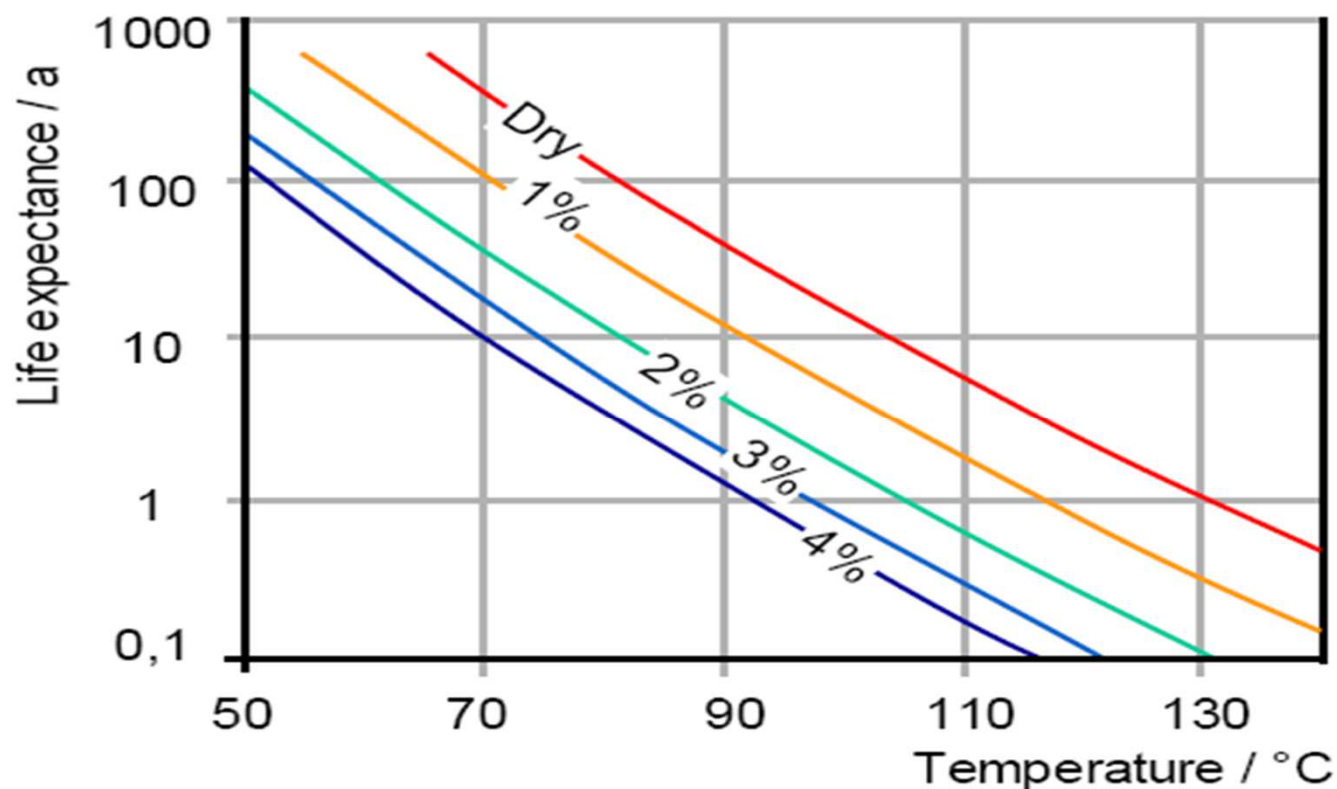
Source: SINTEF

80°C-on üzemeltetve a trafót 1% papír víztartalomnál a várható élettartam kb. 30 év.

Ha a víztartalom 3%-ra nőne, akkor a várható élettartam kb. 6 évre csökkenne.

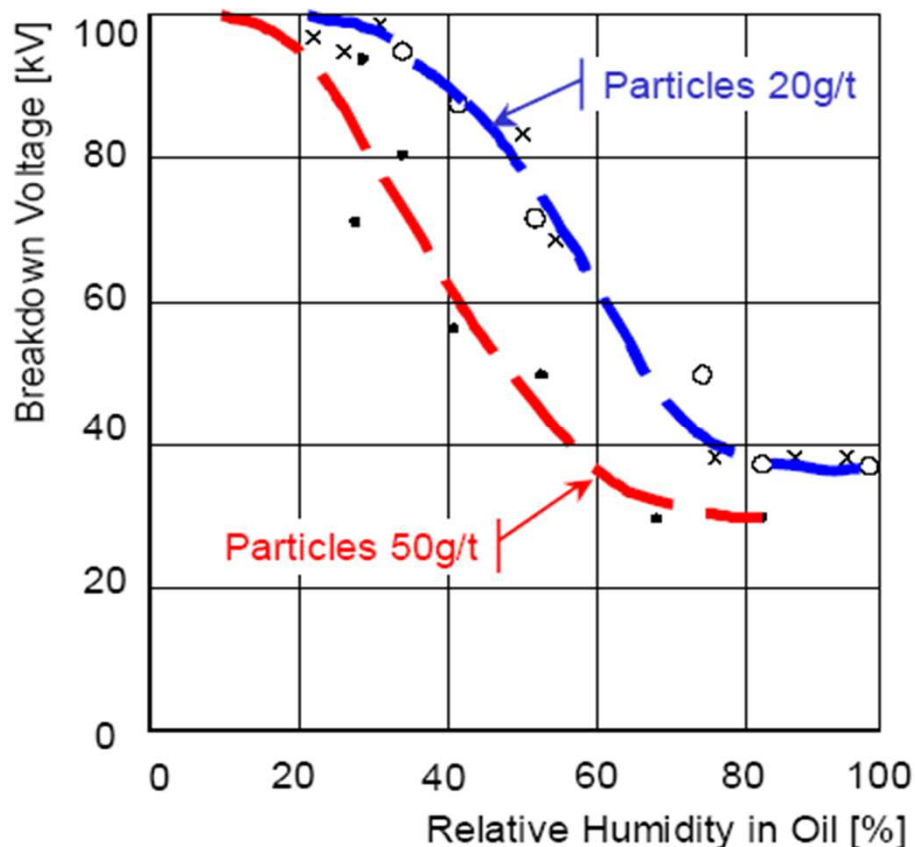
A víz hatására történő élettartam változásra még nincs IEC (IEEE igen) szabvány.

-Szabvány hiányában jelenleg **csak tanulmányok, útmutatók** állnak rendelkezésre. A technikailag száraz transzformátor élettartama **nedvesség növekedésre** úgy változik, **mintha növeltük volna a hőmérsékletet.**





## Olaj részecsketartalom vizsgálata



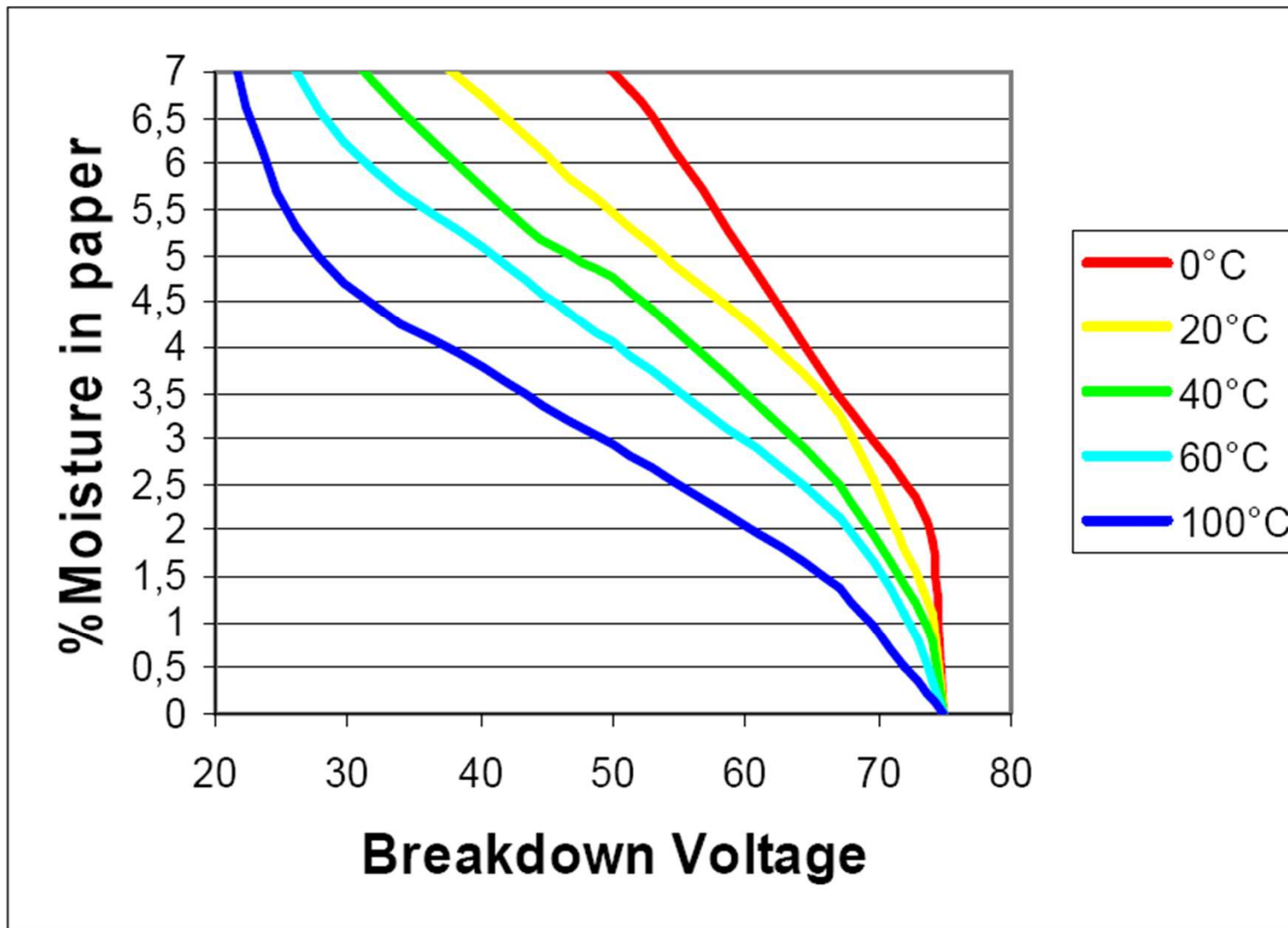
### Olaj részecske tartalom mérés

- Az olajban található **vezető és szigetelő részecskék jelentősen** ronthatják az olaj villamos tulajdonságait (főleg az átütési szilárdságot), különösen a jelentősebb a nedvességtartalom, ezért vizsgálni kell az olajban található kisméretű részecskéket.
- Különböző fajtájú méretű részecskék lehetnek jelen. Az olaj oxidációs termékei, különösen az üledék sötétebbé teszi az olaj színét.
- A papír degradációjából is jelenhet meg elszenesedett részecske az olajban. Vizsgálat az IEC 60970 és IEC 60422 szerint. (g/t=10mg/kg=10ppm)

**Az olaj relatív nedvességtartalmának és az átütési feszültségnek a kapcsolata: paraméter a részecsketartalom.**

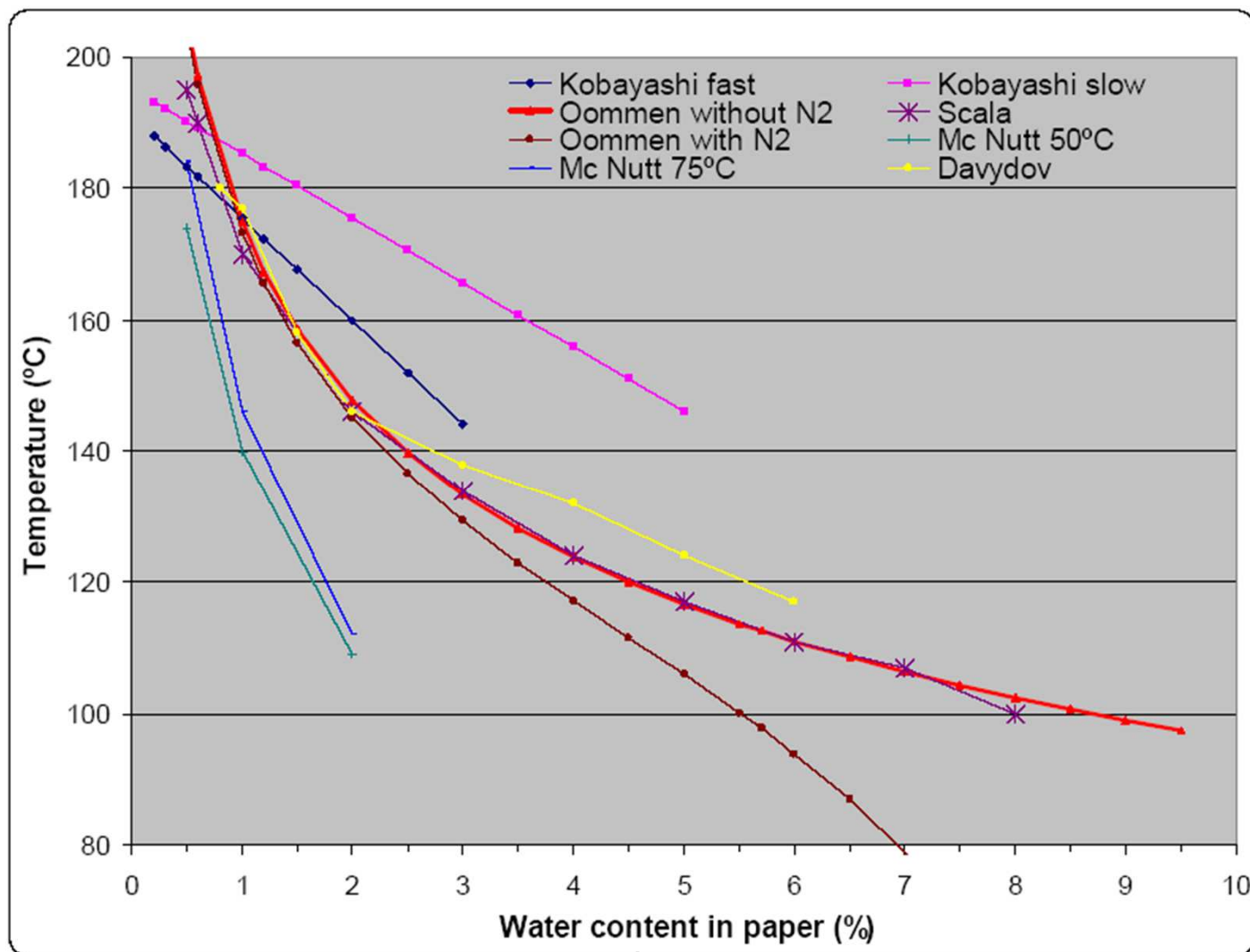


## Átütési feszültség és a papír víztartalma közötti összefüggés





## Buborékképződési küszöb hőmérséklet a papír víztartalma függvényében



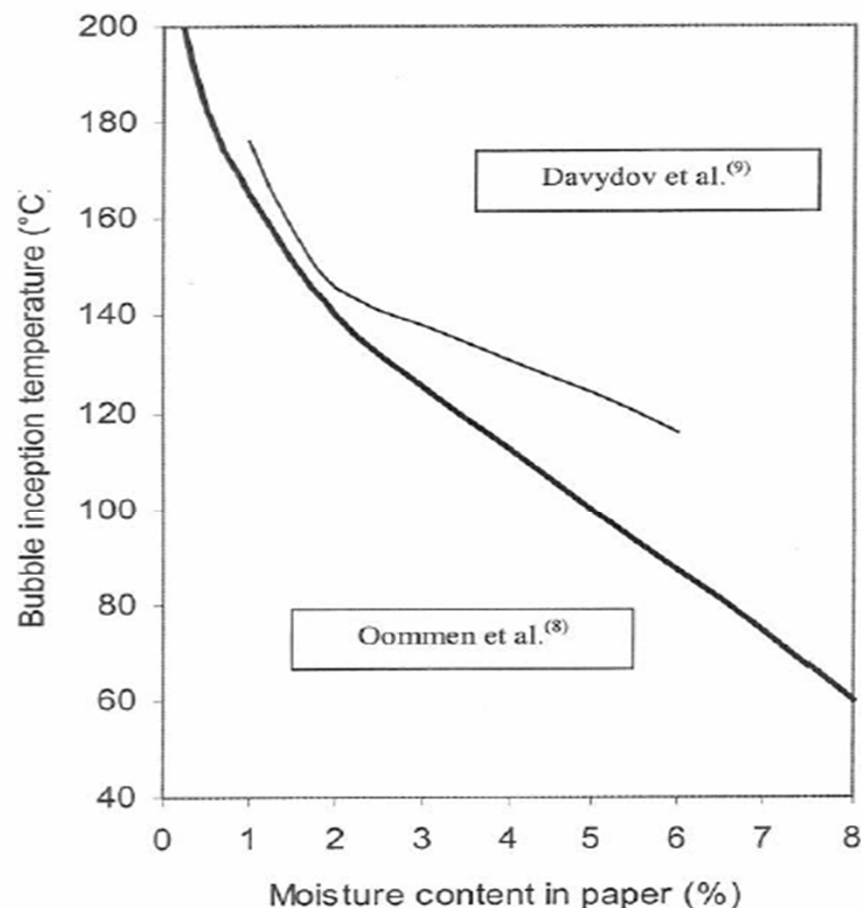


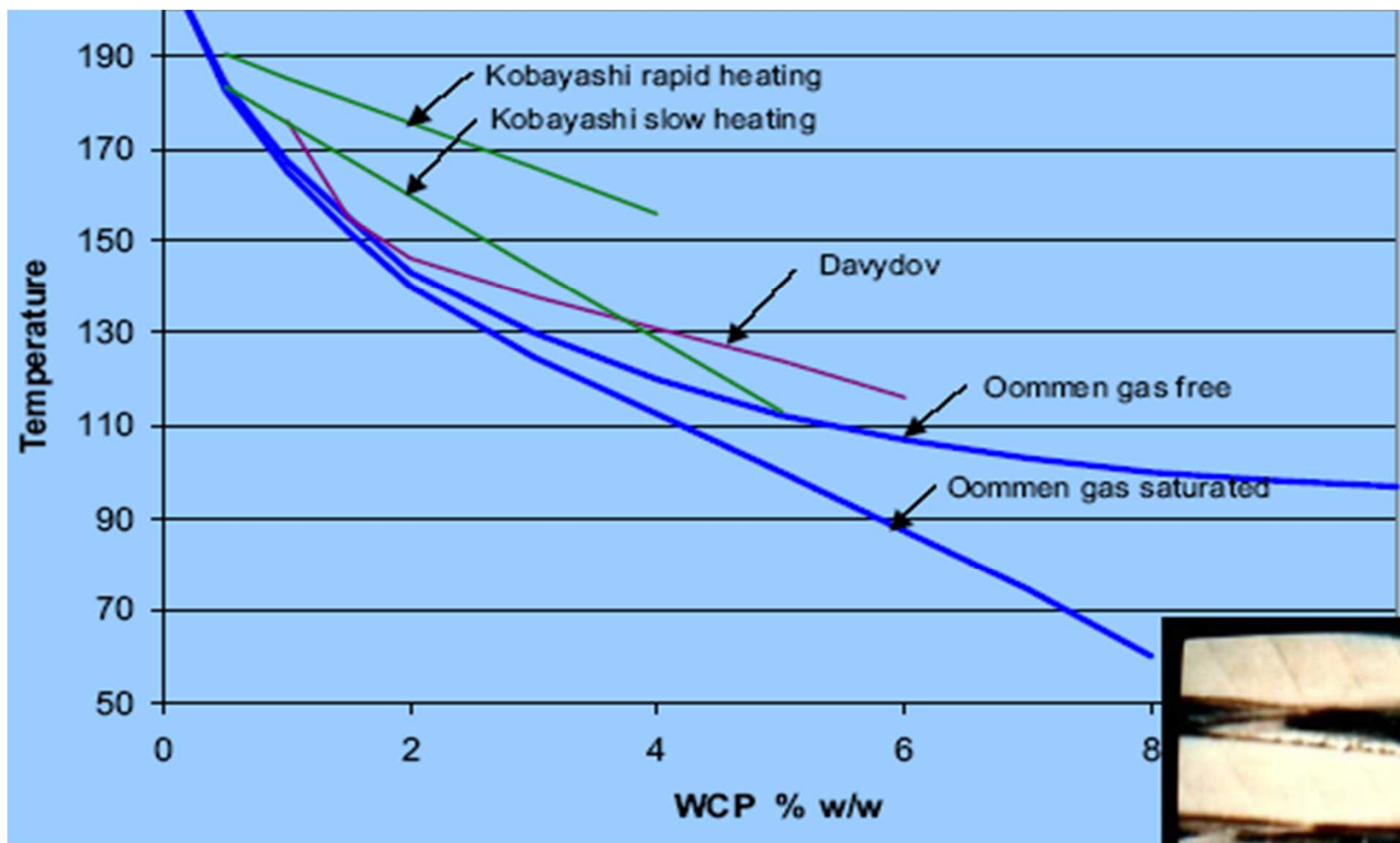
Figure 4 - Critical Temperature for Bubble Evolution

## Polarizációs spektrum, buborékképződés

- A teljes polarizációs spektrumot kell kiértékelni. Az elnedvesedés, öregedés és a hőmérséklet növekedésére csökken **a buborékképződés küszöbhőmérséklete**, gázok **szabadulnak fel, csökken** az átütési szilárdság.
- IEC 354 (Loading Guide for Oil-immersed Transformers) a hot-spot hőmérsékletet régebben **180, most 140°C-ban limitálta**, de látható nedves szigetelés esetén ezalatt is beindulhat a gázképződés.



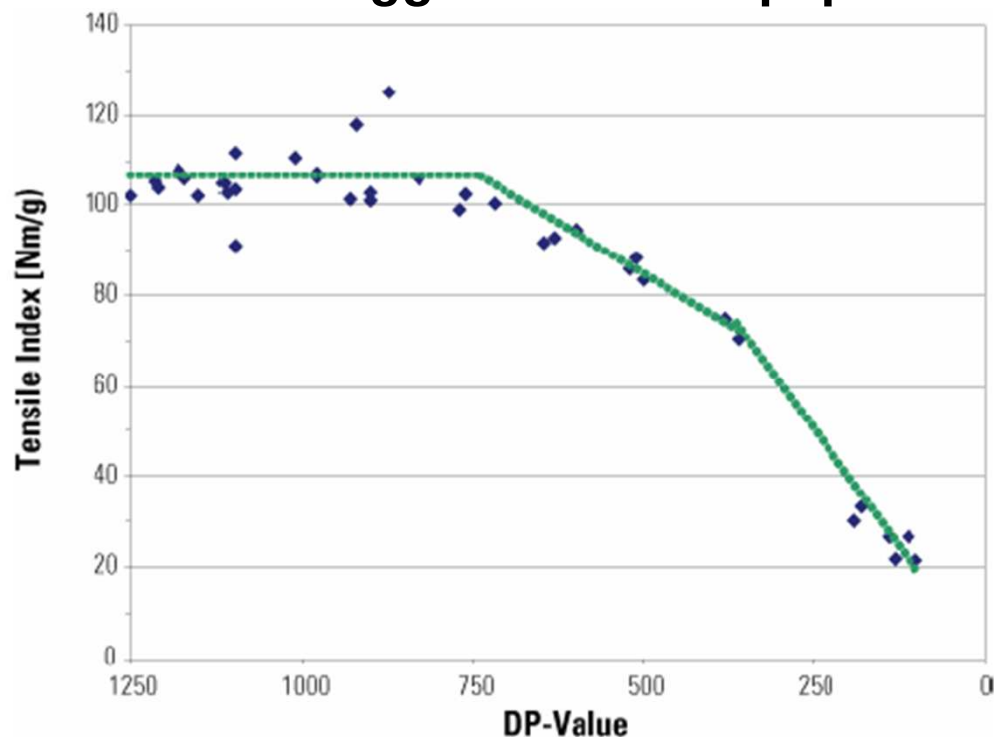
## Buborékképződés kritikus hőmérsékletei: Oommen, Davydov és Kobayashi görbék





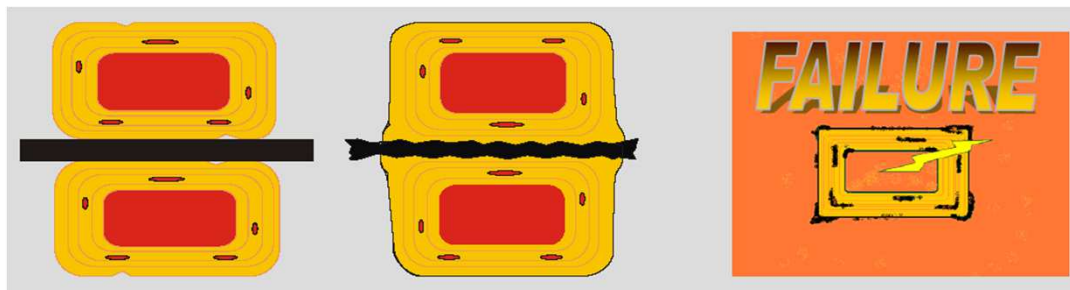
## Olaj-papír szigetelés tulajdonságai

### Összefüggés a DP és a papír szakítószilárdsága között



Kraft papír szakítószilárdsága és a de-polimerizációs tényező (DP) közötti korreláció: ha felszakad a lánc, csökken a mechanikai szilárdság

Öregedés, szárítás után a papír roskad és a deformáció miatt csökken a leszorító erő, Lazul a tekercs, egy zárlat hatására tekercselmozdulás jöhet létre.





- Az **olaj alapvető feladata**: jó villamos tulajdonság, hatékony hűtés biztosítása, és a **szilárd szigetelés (papír) védelme**.
- A szigetelési tulajdonságok **állandóan romlanak** a magas hőmérséklet, víztartalom és öregedési termék felhalmozódás, stb. miatt.
- Az üzemeltetési időszak alatt az **olajból és a papírosból öregedési termékek** (víz, savak, stb.) **képződnek**.
- A „**kezeletlen**” olajtulajdonságai rosszak és még **megtámadja a papírszigetelést** is és ezáltal drasztikusan csökkenti a trafó élettartamát.
- **Lehetséges megoldások**:
  - **olaj szárítás,**
  - **olajkezelés, kondicionálás,**
  - **olaj regenerálás,**
  - **olajcsere.**

## FONTOS KÉRDÉSEK

- A gyárból száraz trafó kerül ki, ott milyen szárítási folyamat kerül végrehajtásra, és mennyire száraz a trafó szigetelése?
- **A gyárban a teljes aktív rész vákuumkályhába kerül**, kerozin gőzzel vákuum alatt szárítják, majd még meleg állapotban kezelt olajjal feltöltik.
- Mennyire száraz a trafó? A **papír átlagos nedvességtartalma kb. 0,5%**.
- Hogyan ellenőrzik ezt az értéket?
- Igazán nincs ellenőrzés, nemzetközileg elfogadott „érték”, tapasztalat alapján azt mondják, ha egy adott szárítási ciklus lefut, akkor 0,5% alatt lesz a papír nedvességtartalma?

Hogyan kerülhet víz a gyárban jól kiszárított szigetelésbe?

- Lélegző rendszer esetén a légbeszívón keresztül,
- Öregedési termékként,
- Rossz tömítések mentén
- Fontos még, hogy tudjuk ellenőrizni az elnedvesedést?



## Szigetelőpapíros szorpciós tulajdonságai

- Azt szokták mondani, hogy az **olaj „vízhatlanná”** teszi a papírost.
- Az olaj szénhidrogén molekuláinak méretei **olyan nagyok**, hogy a cellulóza mikro kapilláris rendszerébe nem tudnak behatolni, amelybe a nedvesség még be tud hatolni, csak a **durva kapillárisok vízzel történő telítését nehezítik meg.**
- A víz után a **második fontosabb adszorbeálható** anyag a környezetből megköthető **öregedési termékek.**
- A cellulóza hidroxil csoportjának erősen poláros volta miatt, a **papíros főleg poláros komponenseket köt meg.**
- A cellulóza **oxidációs degradációja során nő** azon funkciós csoportok száma, ami **fokozza az adszorbeáló képességet**, így az **üzemben történő oxidáció után több vizet és öregedési terméket tud megkötni.**



## Papír nedvességtartalom meghatározás

- A papír nedvességtartalom meghatározása két különböző módszerrel történik.
- Az egyik esetben a papír nedvességtartalma az olaj nedvességtartalmából kerül meghatározásra „egyensúlyi görbék” alapján.
- A másik esetben pedig a papíros nedvességtartalma off-line módon bevitt, az RVM vizsgálat alapján meghatározott nedvességtartalom.
- Az utóbbi esetben, először az első gyári off-line RVM mérés során kapott nedvességtartalmat kerül bevitelre adatként.
- Ezt követően mindig a legfrissebb RVM mérési eredményeket kell rögzíteni és az összes bevitt RVM mérési eredményt le kell tárolni, archiválni.



A gyakorlatban az olaj-papír rendszerben a termikus egyensúlyt nem lehet elérni. A hőmérséklettel az egyensúlyi görbék mentén változik állandó a papír és az olaj víztartalma, ezért lehetetlen pontosan becsülni a igazi víztartalmat.

Egy adott pillanatban vett olajminta lapján végzett Karl-Fisher módszerrel mért víztartalom is közelítő értéket adhat.

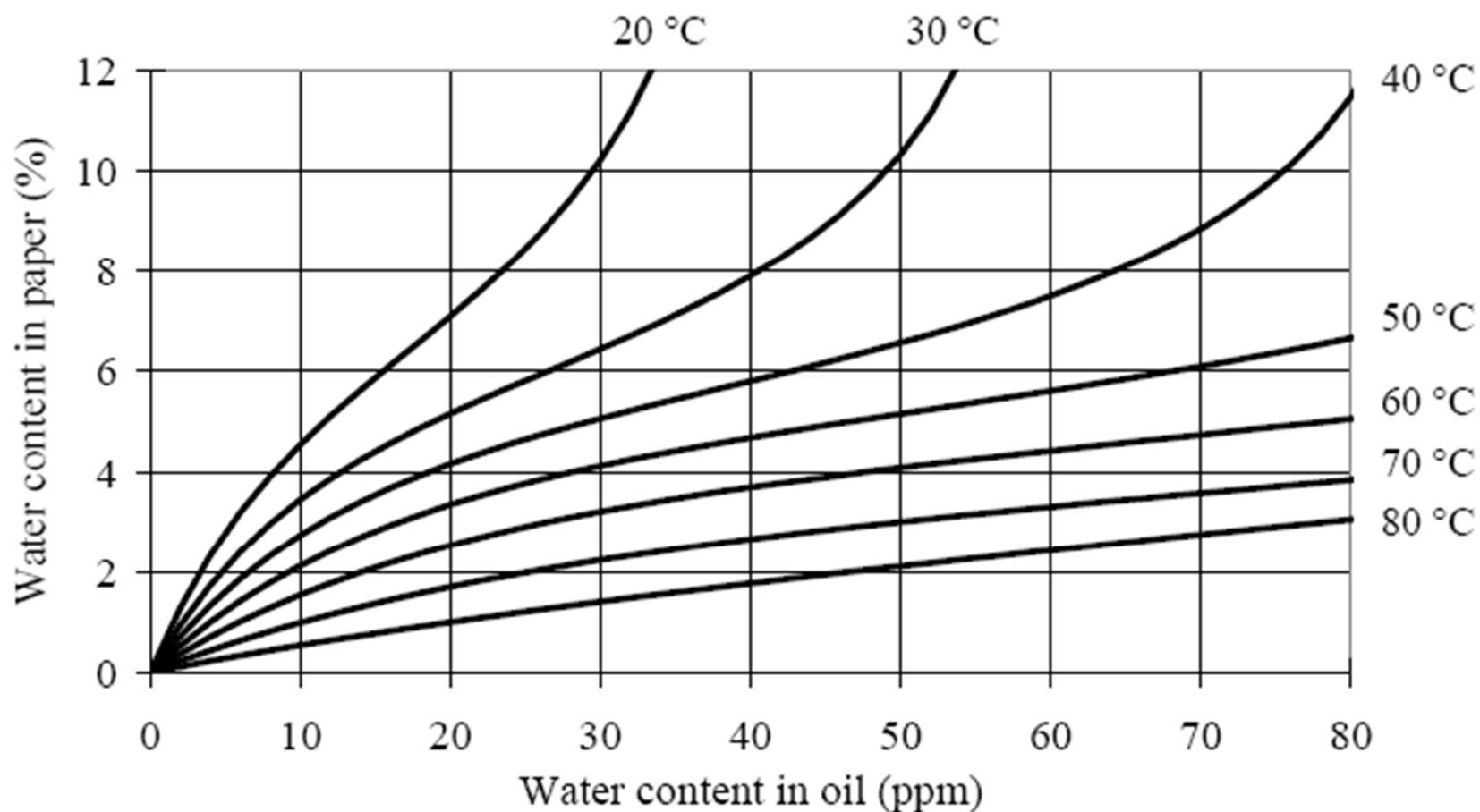
A hőmérséklet változás nedvesség elmozdulást hoz létre a papír és az olaj között.

A diffúziós állandó függ az olaj-papír határfelület hőmérsékletétől, a papír vastagságától, nyomástól (táblázat).



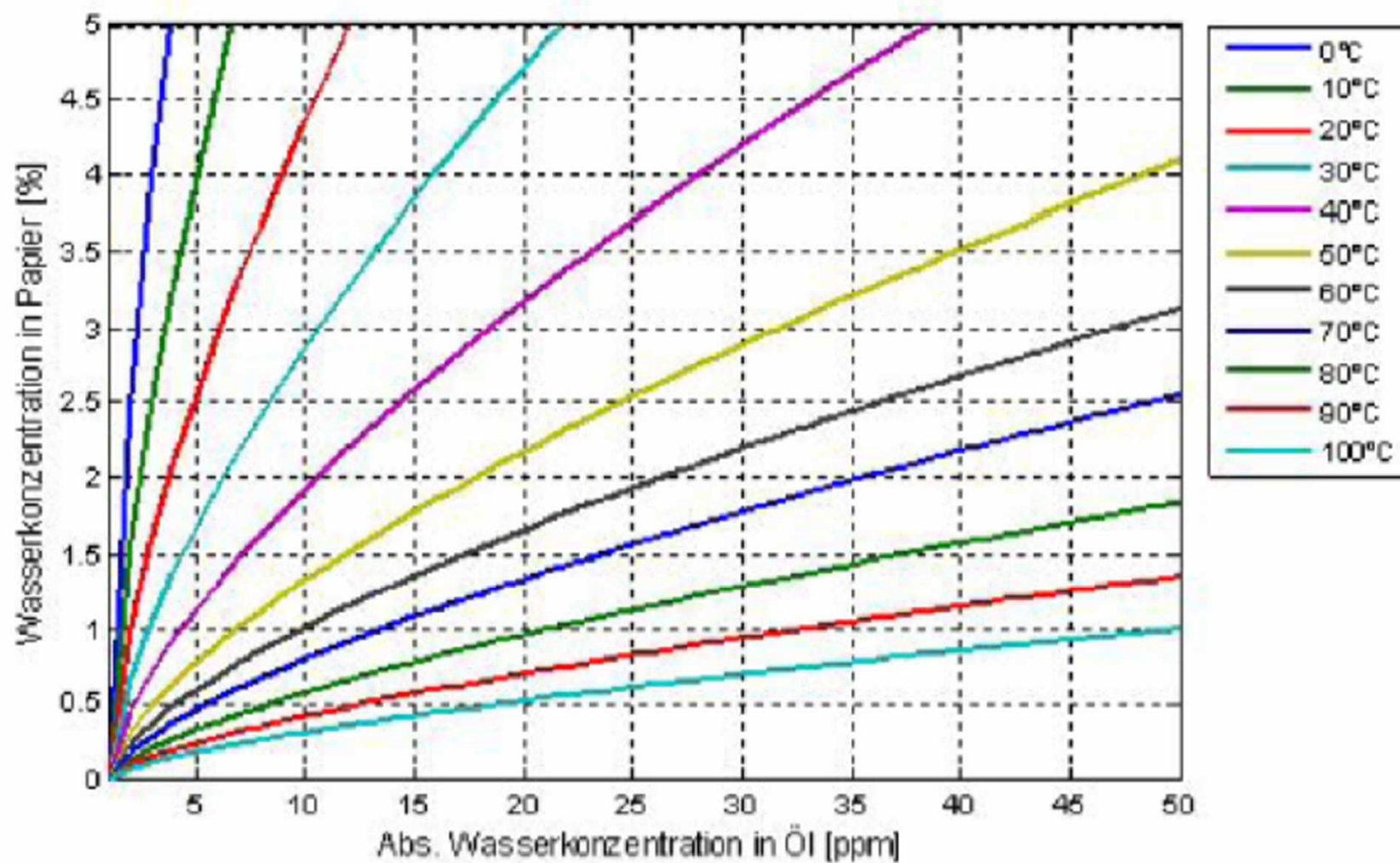
## Víztartalom eloszlás olaj-papír szigetelésben

Az olaj-papír rendszerben a víz fő tároló helye a papír, mert a papír több százalék vizet tud felvenni, az olaj azonban csak legfeljebb néhány néhányszor tíz ppm- et.





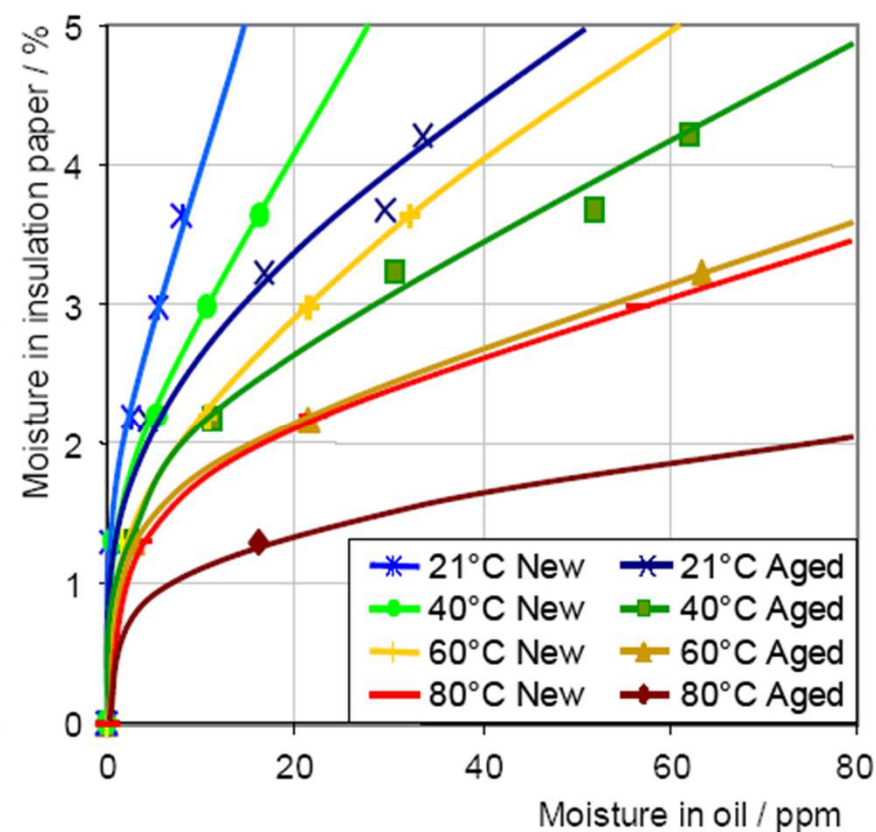
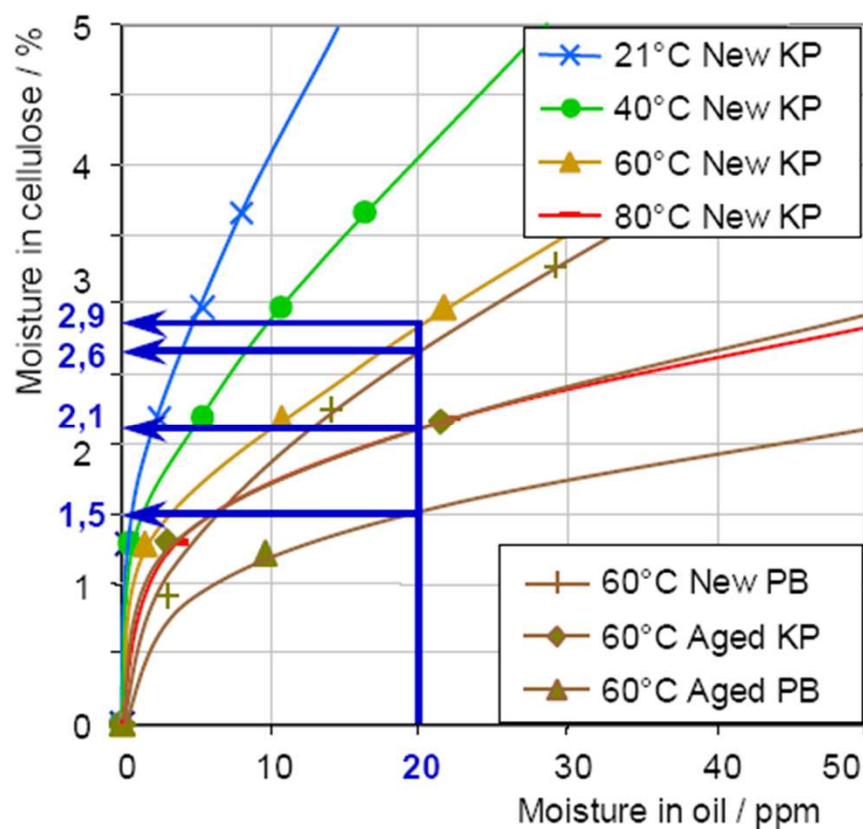
## Olaj-papír szigetelés egyensúlyi görbéi



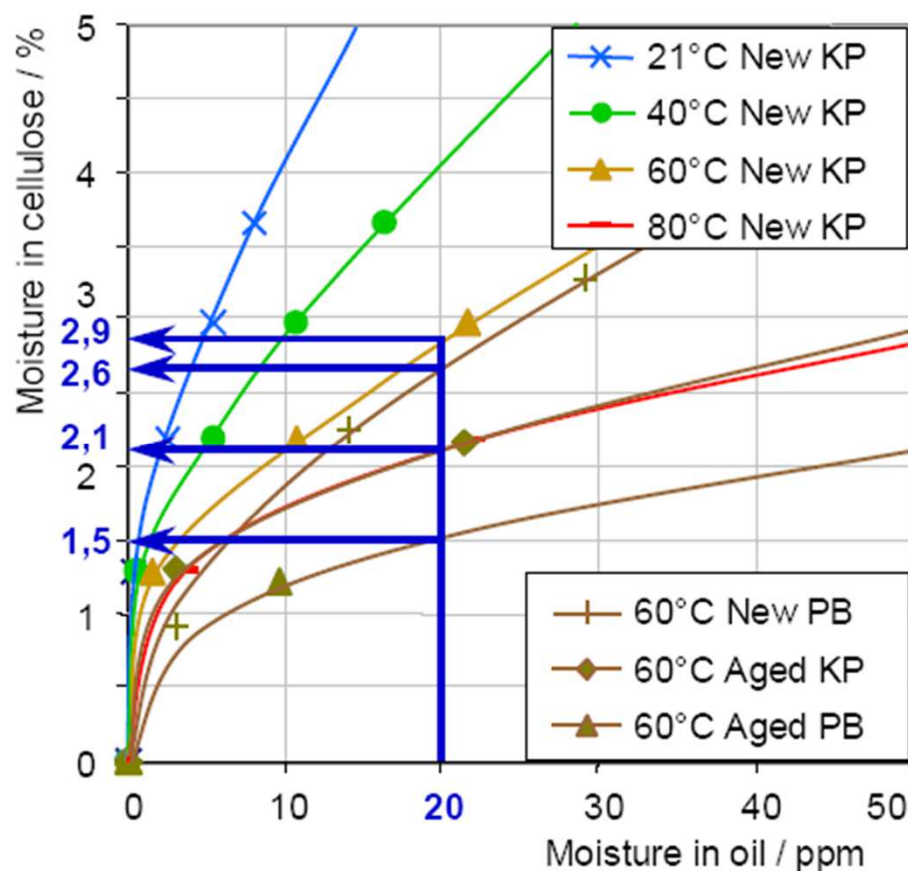
## FONTOS MEGJEGYZÉSEK

- Az egyensúly függ a víz olajban oldhatóságától, a cellulóza adszorbeáló képességétől, tehát egy-egy egyensúlyi görbesereg **arra az anyagra érvényes, amire felvették.**
- Természetesen a **tendencia érvényes** marad a többi esetre is.
- Az **öregedés** is jelentősen megváltoztatja a **víz felvevőképességet.**
- Lásd az öreg és fiatal papír egyensúlyi ábráit.
- Új olaj, új Kraft (lágy trafó papír) (KP), 20, 40, 60, 80 fokon.
- 60 fokon látható egy másik görbeserek új papír új olaj, öreg KP öreg olajban.
- Ha feltételezzük, hogy 20ppm az olaj víztartalma, akkor az új papírban 2,9%, új presbord (kemény szigetelés) 2,6%, öreg papír és öreg olaj 2,1 és öreg presbord öreg olaj 1,5%.
- Nehéz egy konkrét esetre az egyensúlyi diagramokat használni.
- Kérdés: lehet **papír víztartalmat meghatározni a csapolt olajmintából?**

- A baloldali ábrán Kraft papír új és öregedett állapotban felvett egyensúlyi diagramjai láthatóak. Bal oldalon termikusan kezelt új és öregített papír új olajban ábrái láthatóak.



Adott 20 ppm olaj víztartalom mellett **különböző papírok esetén más és más papír víztartalmat kaphatunk, tehát az olaj víztartalma és az egyensúlyi görbék alapján csak az adott rendszerre felvett görbék alapján lehet számolni, akkor, ha tényleg egyensúlyi állapot áll fent.**



Hol van a víz a szigetelésben? Milyen a megoszlás a papír és az olaj között?

## Where is the Water?

Most of the water is contained in the cellulose!  
->>> More important to measure the water  
content in paper than oil

Mass of the oil:  
100000 kg



Water content at 60 °C:  
40 ppm



Mass of the water, desolved in the  
oil:

4 kg

Mass of the solid insulation:  
13000 kg



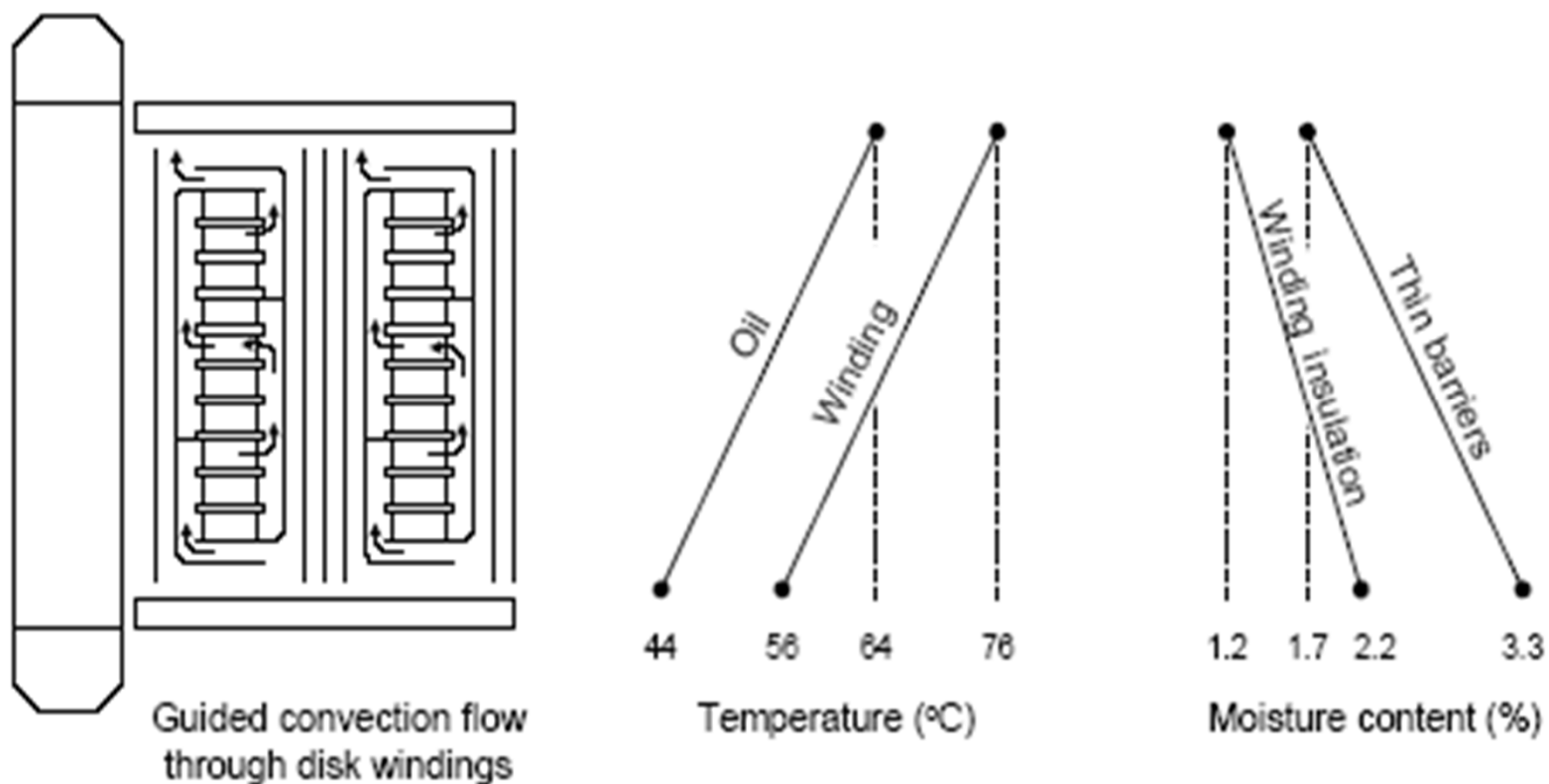
Water content at 60 °C:  
4 %



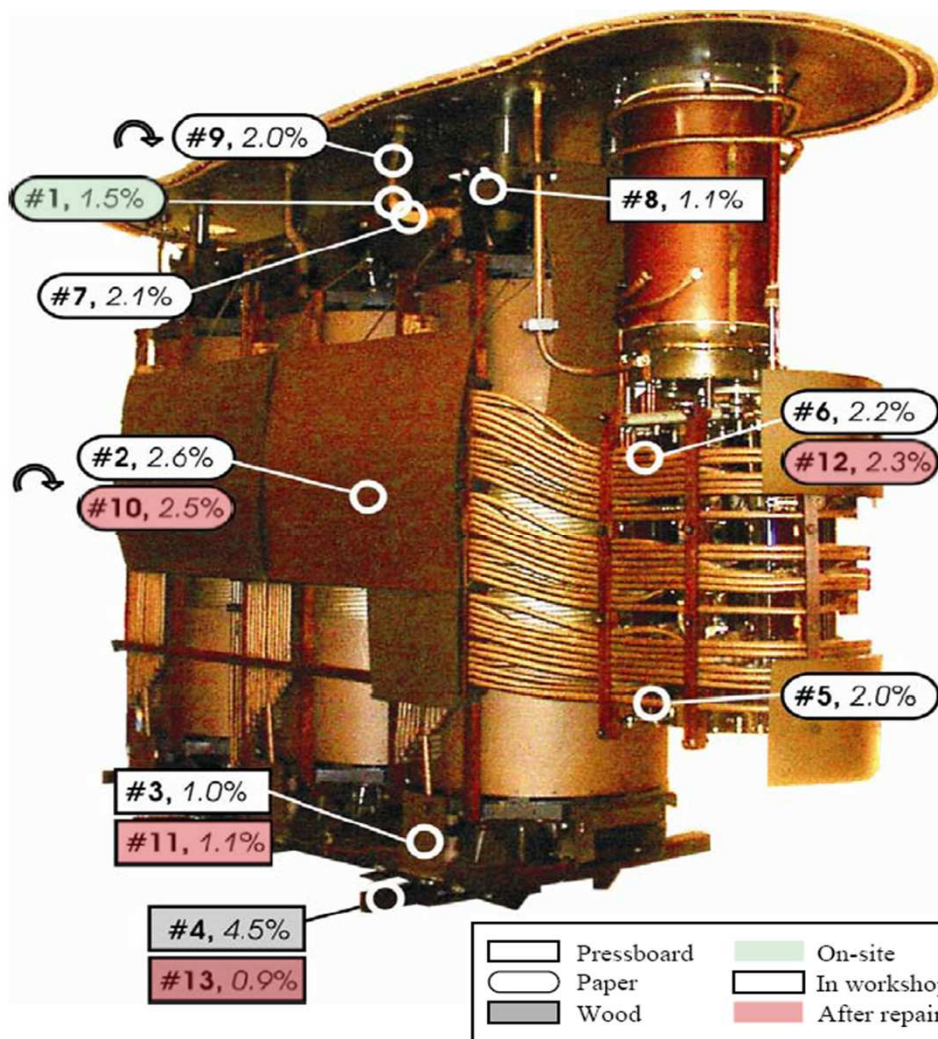
Mass of the water contained in the  
paper:

520 kg

## Milyen hőmérsékletet használunk az olaj-papír szigetelésekénél?



## Nedvességtartalom a trafó szilárd szigetelésének különböző helyeiről vett mintákból



- Karl Fischer technikával (KFT) becsült nedvességtartalom
- A szilárd szigetelésének különböző helyeiről vett mintákból.  
presspan, lágypapír  
-keményfa

### Inhomogén nedvességeloszlás a trafó szigetelésében

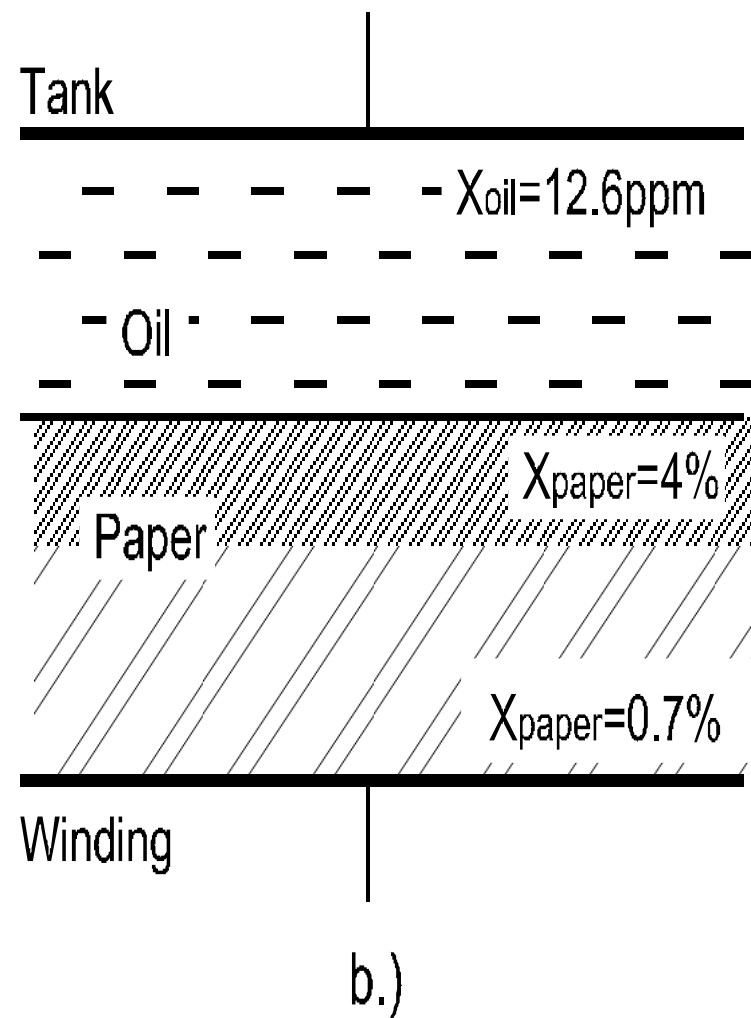
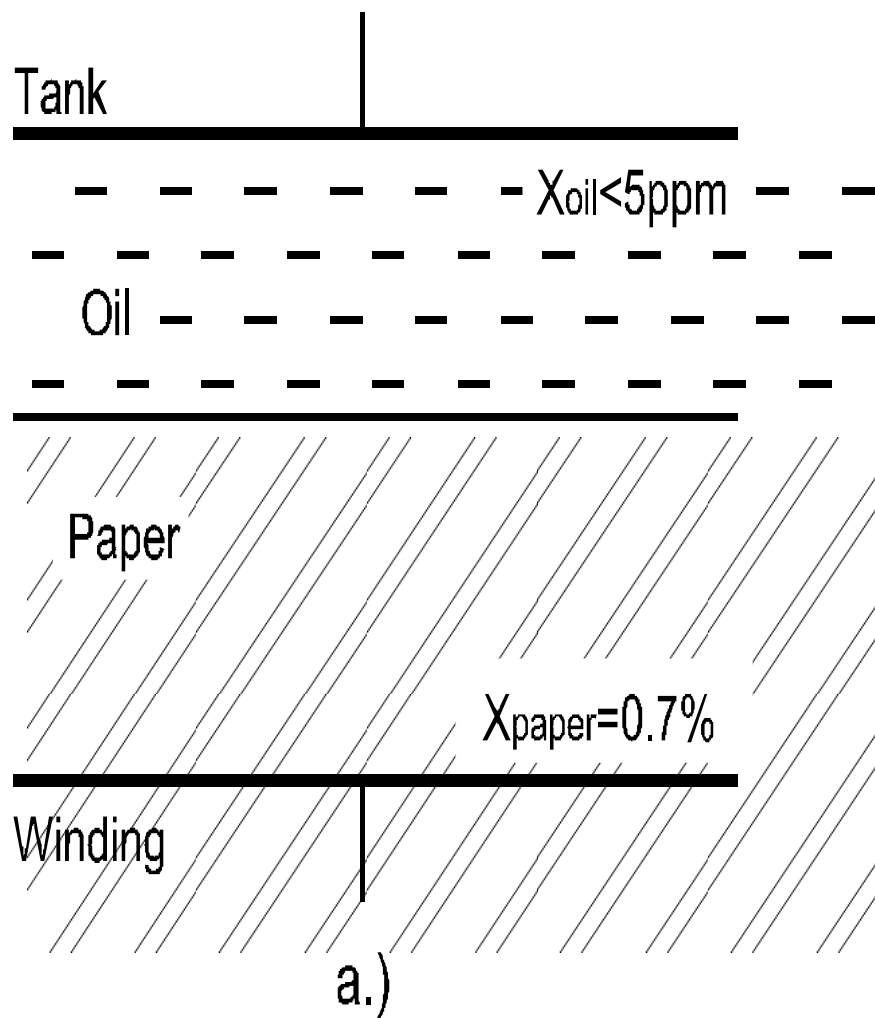
Kerek fehér keret: papír

Négyszögletes fehér keret: prespán

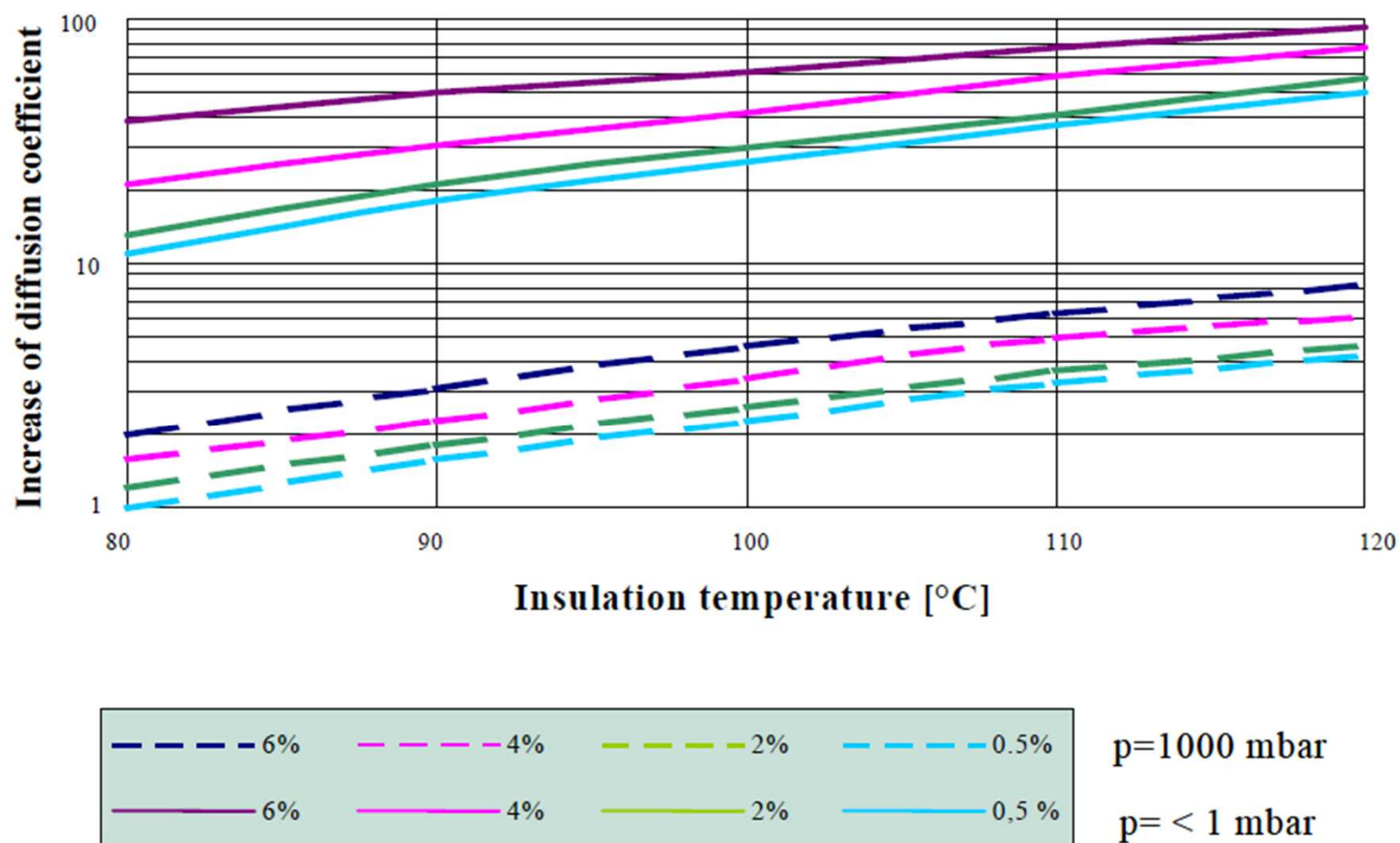
Négyszögletes szürke keret: fa

## Szárítás utáni állapot ellenőrzés mérés technikai különlegessége

- Az olaj betöltése előtt **olajkezelést** (szárítást) kell végezni és magas hőmérsékleten **vákuum alatt kell betölteni** a kiszárított papírszigetelést tartalmazó trafóba.
- Általában a kezelt, betöltésre szánt olaj víztartalma **5ppm körül** szokott lenni.
- Az egyensúlyi görbék alapján a jól kiszárított, kb. **0,5%** nedvességtartalmú papíros esetén az egyensúlyi állapotban az olaj víztartalma **1-2 ppm**, tehát még a **kezelt olajban is több víz van, mint ami az egyensúlyi állapot** megkövetelne.
- Ekkor olyan folyamat indul, ami az **egyensúlyi állapotot kívánja elérni**.
- Amikor az **olaj érintkezik a papír felületével**, akkor a papír felülete annyi vizet vesz át az olajtól, amennyi az **egyensúlyi állapothoz** szükséges, de ekkor a papír felületén nagyobb lesz a nedvességkoncentráció, mint a belsejében.
- A papír belsejébe történő vízbevándorlás **diffúzió** útján történik, ami erősen hőmérsékletfüggő (és még függ magától a nedvességtartalom mindenkori szintjétől is).



Diffúziós együttható relatív növekedés függése a hőmérséklettől, a nedvességtartalomtól, és a nyomástól.



Diffúziós időállandó, olaj-papír szigetelés, az érték napban megadva

|                               | Oil               | Thick Insulation | Thin Barrier     | Winding Insulation | Total Water Content |
|-------------------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|---------------------|
| <b>Total Mass</b>             | 45,000 kg         | 2,250 kg         | 900 kg           | 1,350 kg           |                     |
| <b>Full Load Conditions</b>   | 26 ppm<br>1.2 kg  | 2.4 %<br>54.0 kg | 2.4 %<br>21.6 kg | 1.6 %<br>22.0 kg   | 98.8 kg             |
| <b>Off Service Conditions</b> | 1.3 ppm<br>0.1 kg | 2.2 %<br>49.4 kg | 2.2 %<br>19.8 kg | 2.2 %<br>29.5 kg   | 98.8 kg             |

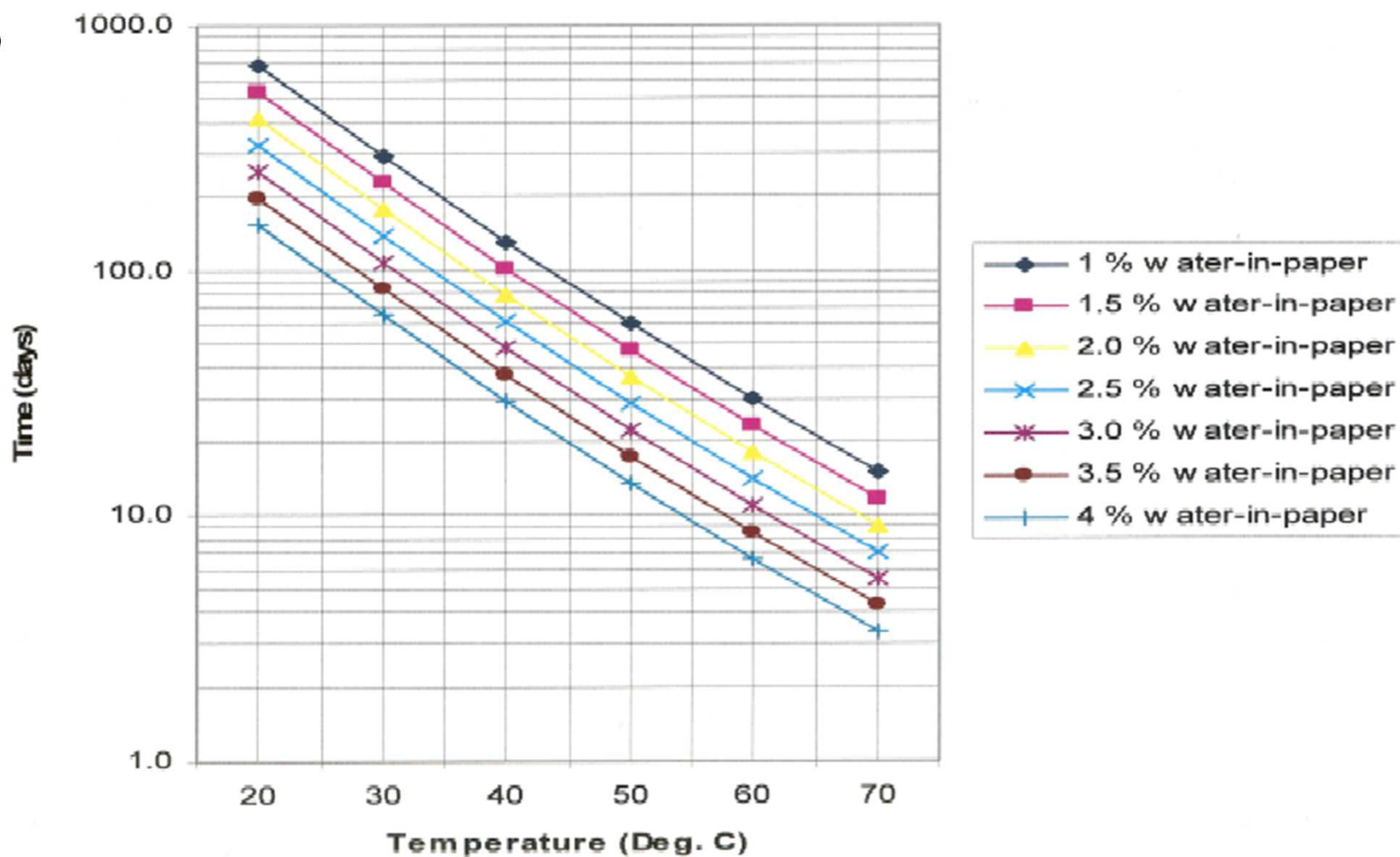
| Temperature | Insulation Thickness |      |      |
|-------------|----------------------|------|------|
|             | 1 mm                 | 2 mm | 4 mm |
| 80°C        | 0.9                  | 3.6  | 14   |
| 60°C        | 4.2                  | 17   | 67   |
| 40°C        | 20                   | 79   | 317  |
| 20°C        | 93                   | 373  | 1493 |

Diffúziós időállandó hőmérsékletfüggése napokban mérve 1, 2 és 4mm-es szigetelőanyagokra

| Temperature | Insulation Thickness |      |      |
|-------------|----------------------|------|------|
|             | 1 mm                 | 2 mm | 4 mm |
| 80 °C       | 0.9                  | 3.6  | 14   |
| 60 °C       | 4.2                  | 17   | 67   |
| 40 °C       | 20                   | 79   | 317  |
| 20 °C       | 93                   | 373  | 1493 |



## Diffúziós időállandó hőmérsékletfüggése kb. 6.3mm vastagságú olajjal impr

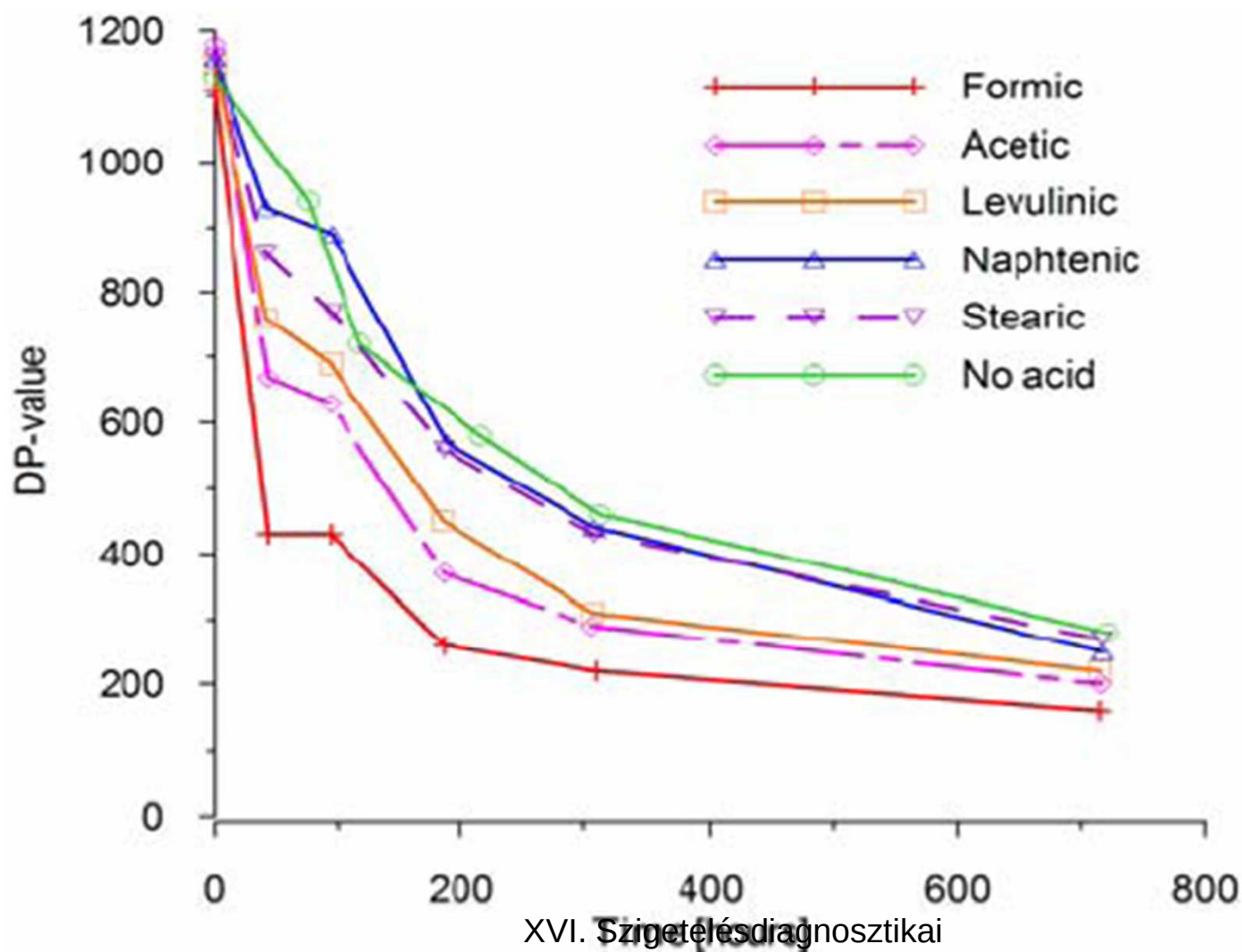




## A sav hatása látható a papír öregedésére.

- Az öregítést 130°C-on végezték öt különböző sav hozzáadásával.
- Látható, hogy a kis molekula (nedvesítő) súlyú, papír oxidációval keletkező savak (formic, acetic, levulinic) jobban öregítenek, a nagy molekula súlyú, amelyek az olaj öregítési termékei, víztaszító savak (stearic, naphtenic) kevésbé gyorsítják az öregedést.
- A kisebb molekula súlyúak könnyebben kötődnek a papírhoz, ugyanúgy, mint a víz. Ez a tulajdonság a karbantartáskor fontos. A kis molekula súlyúak jobban kötődnek a papírhoz, mint az olajhoz, ezeket kell eltávolítani. Tehát az olajban kevés van. Olaj regenerálás egy részét eltávolítja, de van más jobb módszer is az eltávolításra.
- Fontos most beszélni a semlegesítési szám mérésről (IEC 6062021-1, amely főleg az olaj öregedéséből származó savakat méri. A kis molekula súlyú savak detektálásához más módszer kell. Víz mosással az olaj mintából eltávolítható a kis molekula súlyú sav. Így le kell mérni mind a két olajminta savtartalmát és a különbség a kis molekula súlyú sav.

## Kis és nagy molekula súlyú sav hatása a papír öregedésére





## Különböző szárítási technológiák

- Kerozingőzös vákuumkályhás szárítás (csak gyárban)
- Olajon keresztüli szárítás
- Melegítés és vákuum
- A következő két ábra mutatja, hogy mi a különbség közöttük. Mindegyik használható a helyszínen, kivéve a kerozingőzös vákuumkályhás megoldást.
- Az első ábrán látható, hogy közvetlenül az olajon keresztüli vízelvonás nagyon lassú ( $<1\%$ ). De nem kell leállni a trafóval. Az online szárítás alatt gáztalanítás, HGA nem értékelhető.
- Lesz-e tekercs rövidülés, roskadás? Új trafónál a leszorítástól függ. LFH-nál ugyanúgy szükséges, mint más szárításnál.

## Mobil kezelő rendszerek

- A transzformátorok olajtöltésének cseréje és regenerálása közötti választás során a műszaki szempontok mellett a költségeket is vizsgálni kell.
- Az új olaj árának egyértelmű emelkedésén túl számításba kell venni az időszakos kikapcsolás, a használt olaj ártalmatlanítása, valamint az üzemeltető személyi költségeit is, mindenek előtt az üzemszünet által okozott károkat.
- A jövőben a transzformátorok helyszíni karbantartását, szárítását, az olaj kezelését lehetővé tevő mobil rendszerek elterjedése várható.
- A jól bevált, kisfrekvenciás hevítő (LFH = Low Frequency Heating) eljárással 7–14 nap alatt ugyan kiváló, a kemencés szárításával meg-egyező eredményeket lehet elérni, azonban erre az időtartamra a transz-formátort le kell kapcsolni a hálózatról.
- Az áthidaló vezetékes (bypass) szárító rendszer működése ugyan sokkal lassúbb, azonban a transzformátor a kezelés közben tovább működhet, sőt adott esetben még a rendszer felszereléséhez sem kell leválasztani a hálózatról.
- Esetenként célszerű lehet a két eljárást úgy kombinálni, hogy egy tervezett leállítás alatt gyors szárítást végeznek kisfrekvenciás hevítéssel, majd ezt követi az utószárítás vagy az állapot tartós fenntartása kerülő-vezetékes rendszerrel.



## **Gyári szárítás**

A teljes aktív rész vákuumkályhába kerül, kerozin gőz kerül a befűzésre, bizonyos ideig bizonyos hőmérsékleti profil mellett.

## **Helyszíni szárítás**

Legtöbbször használ a forró olajos szárítás. Bizonyítottan jó eljárás, kb. 2-4 hét a szárítási idő. Csökkenthető a szárítási igény a forró olaj spray (hot-spot-spray) alkalmazásával.

Mindkét esetben a tanknak vákuumállósnak kell lenni. Ha nem az, akkor megnő a szárítási idő, a maradó nedvesség magasabb lesz.

Leghatékonyabb, LFH (Low Frequency Heating) módszer a forró olaj módszerrel kombinálva.

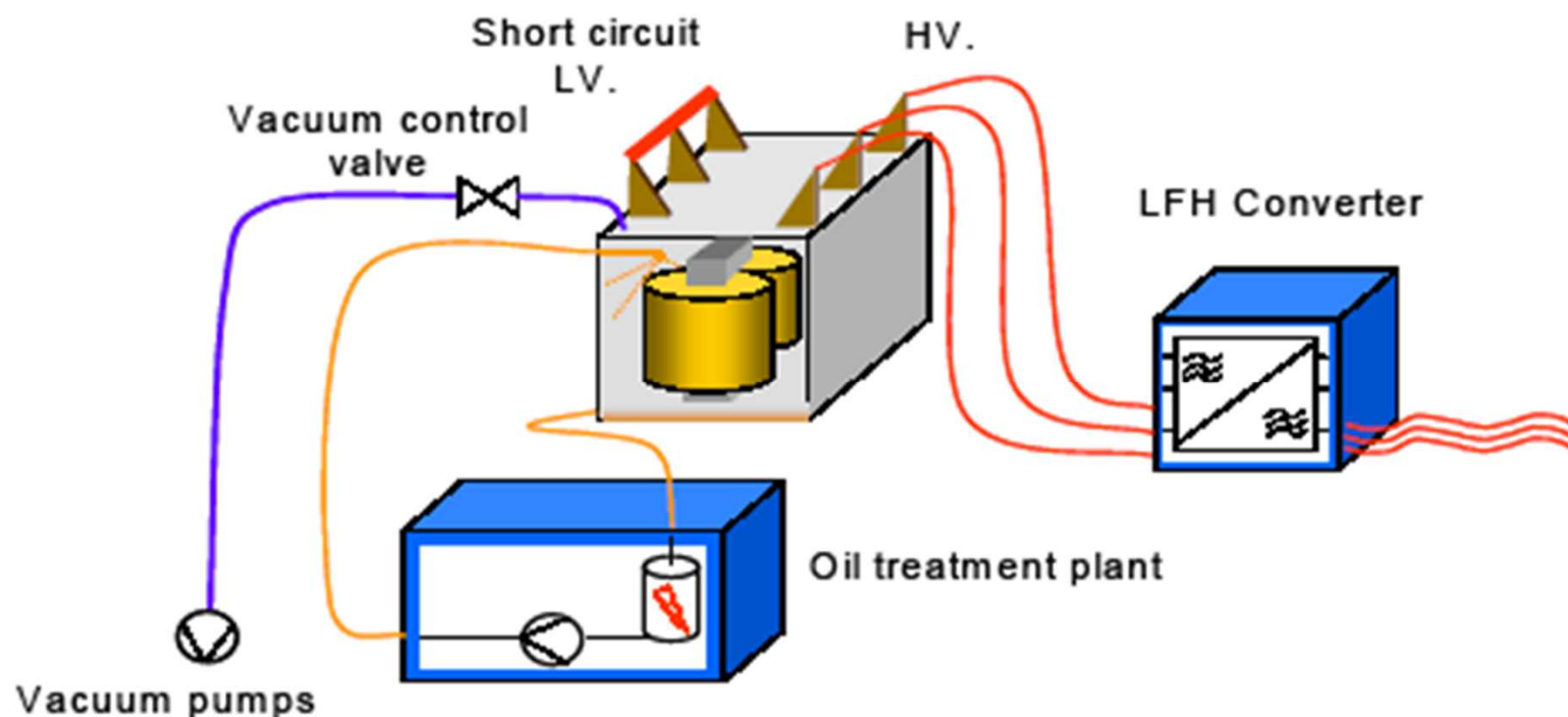
Az NF tekercset alacsony frekvenciás árammal táplálják mialatt a KF tekercset rövidrezárják.

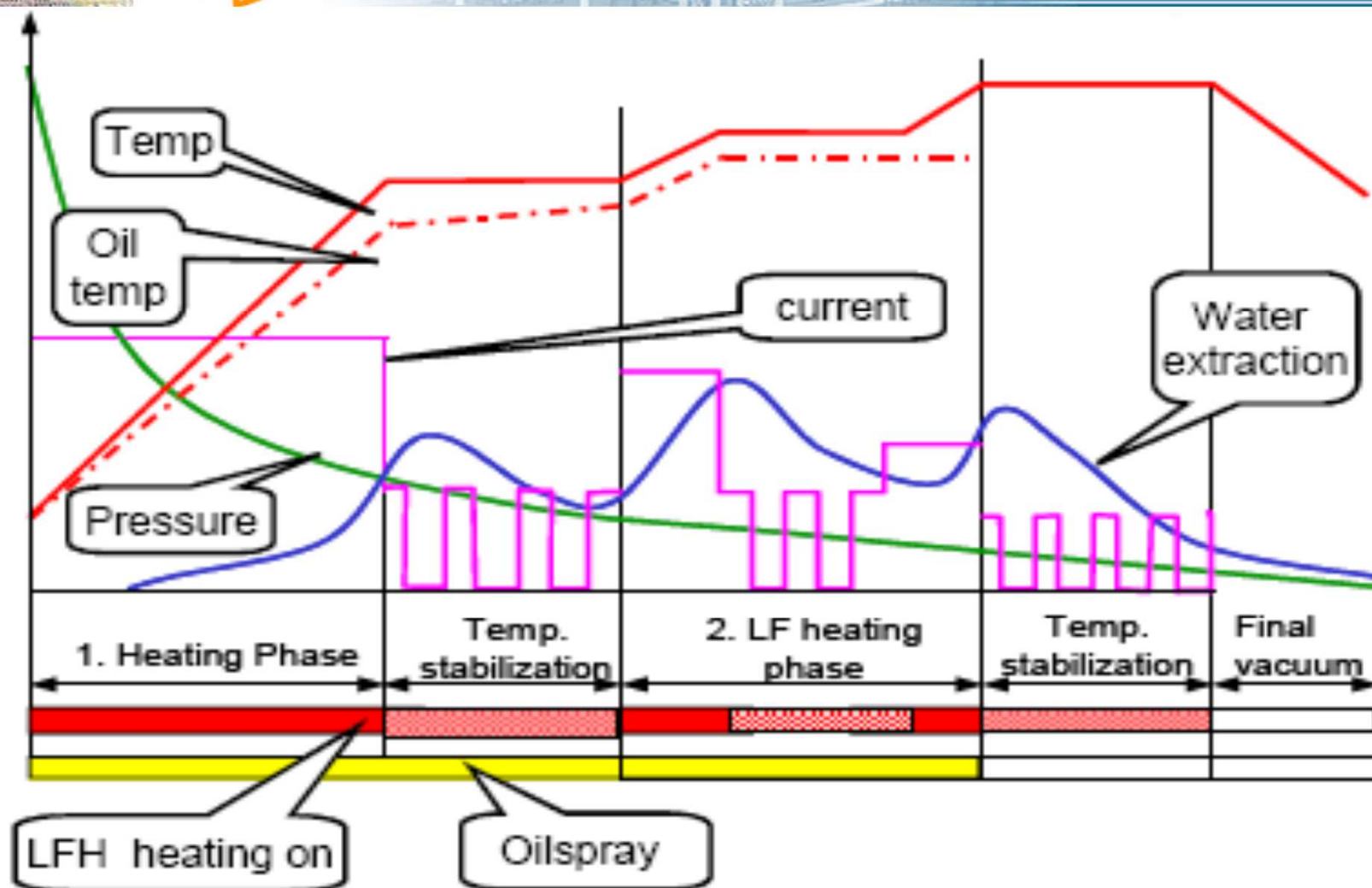
## Helyszíni trafó karbantartási munkák, on-site szárítások:

LFH=Low Frequency Heating (0,001-5 Hz, átl. 0,5 1 Hz)

olajkeringtetés módszer, Hot-oil-spray módszer

Az LFH és a másik két módszer kombinációja: majdnem gyári szárítási minőség érhető el rövid idő alatt, Tekercsleszorítás, ha szükséges,



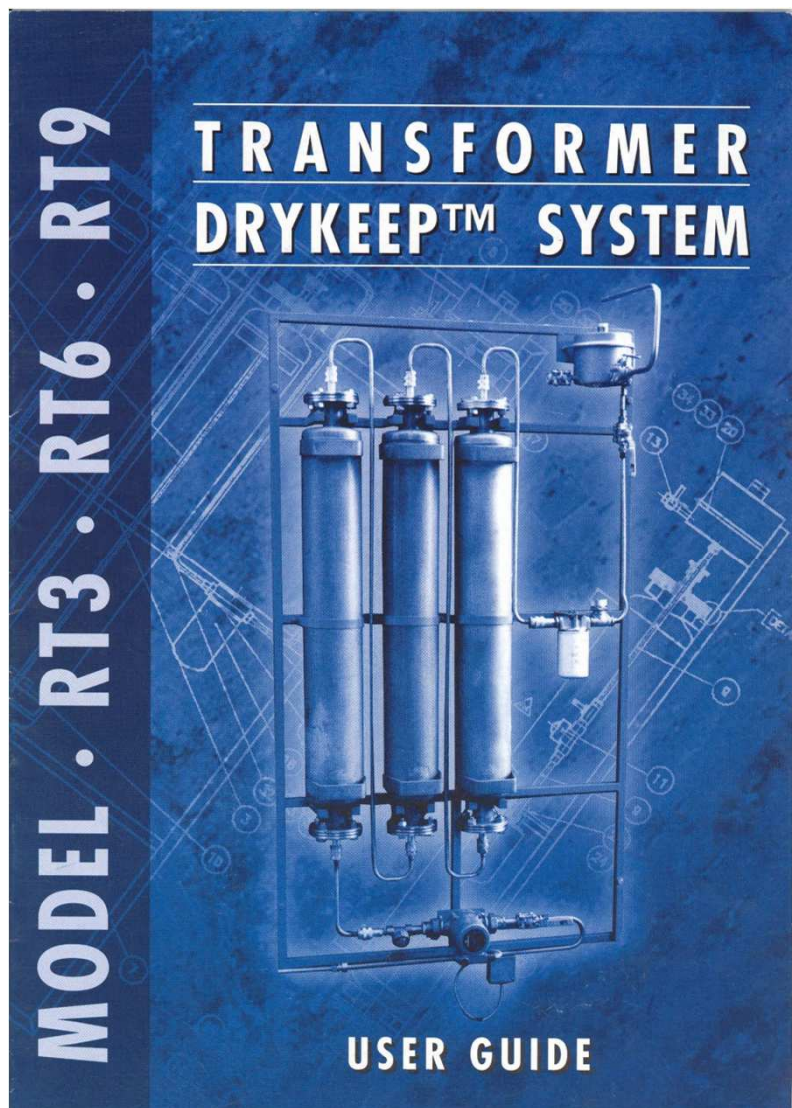


## LFH és hot oil spray szárítás

XVI. Szigetelésdiagnosztikai  
Konferencia, Sümeg, 2016.  
október 19-21



**diagnostics**



A DRYKEEP online patronos szárító rendszer



Online patronos  
szárító rendszer  
töltete

## "Dry Keep" rendszer

- Egy dél-afrikai társaság a "Dry Keep" rendszere lényegében **egy on-line rendszer**, a lélegző típusú trafók olajából nedvességet eltávolító berendezése.
- Mint ismeretes az olaj-papír szigetelésű transzformátorok öregedését ill. élettartamát legnagyobb mértékben a nedvesség befolyásolja, így alapkövetelmény a szigetelési rendszer **nedvességtartalmának minél alacsonyabb szinten tartása**.
- A lélegző transzformátoroknál az oxigén és nedvesség rendszerbe kerülése lényegében "adottság,,.
- A lélegző rendszernél légbeszívó van, amelyben valamilyen nedvességmegkötő anyag van.



## "Dry Keep" rendszer

- A gyakorlati tapasztalatok alapján megállapítható, hogy olajos rendszerrel kb. 2-3 % eredő nedvességtartalom "érhető el" 15-25 év üzem után.
- Ez a viszonylag magas érték már veszélyeztetheti a trafó működését.
- **A szokásos megoldás, hogy gyárban, 10-15 év után felújítják és - többek - között szárítják is a szigetelést**
- Ha a szigetelést az üzem behelyezéstől folyamatosan alacsony víztartalmon tartjuk, akkor a berendezés - megfelelő diagnosztikát feltételezve hosszú ideig üzemben tartható.
- Előny **nemcsak új trafóknál jelentkezik, a már meglévőknél is hasznos lehet**, mert 20-30 éves transzformátorra felszerelve az ilyen jellegű szárító berendezést, az addig elért "romlás" "konzerválható", és egy száraz, közepesen öregedett szigetelés még 20 évig üzemben tartható, azaz nem kell új berendezést vásárolni (beruházási megtakarítás).



## **Szárítás olajkezeléssel trafó felújítás után**

- Helyszíni trafó felújítás utáni szárítás: rövid ideig van nyitva a trafó, rövid ideig van szabad levegőn az olaj, ill. a papír, közvetlenül nem hatol be a víz a papírba (olajjal impregnált), csak a felületen kismélységben.
- Többszörös meleg olaj keringtetés és vákuum kszedi ezt a kis mennyiségű vizet. Ehhez leveszik az átvezetőket, a nyílásokat vákuumállóan lezárják, szelepeket elzárják, hőszigetelik a trafót.

## **Szárítás helyszíni trafó felújítás után**

Felmelegítés olajkeringtetéssel ponyvás takarással





# Trafóolaj regenerálása

## Trafóolaj kezelése

## Transzformátor olaj regenerálása

- Ha az **olaj tulajdonságai** annyira **megváltoznak**, hogy veszélyezteti a trafó folyamatos üzemét, jelentősen csökkenti a trafó élettartamát, ekkor az olaj nem tudja betölteni a feladatát, ilyenkor pl. az **olajregenerálás a megoldás**.
- Az olaj regenerálásra **több angol szót** használnak: **Regeneration**, Reclamation, Recycling.
- Mind a három szó azt a folyamatot jelöli, amikor a használt, öreg, szennyezéseket tartalmazó olajat olyan kezelésnek vetik alá, amely alatt **visszaállítják az új állapotát**.
- A folyamat alatt eltávolítják a trafóban lévő a vizet, az oldott gázokat, savakat, oxidációs termékeket, **fém és más részecskéket**, adalékanyagokat (amit pótolni kell).
- Ez a felújítási technika felmelegíti az olajat, szűri, vákuum technikával szárítja, gáztalanítja, **Fuller-földdel** megköti az öregedési termékeket.
- A regenerált olaj **lassabban öregszik**, ezért **kiterjeszti** az olaj, ezáltal a papír, végső soron a transzformátor **élettartamát**.
- A technika több mint **30 éve létezik**, de a régebbi módszernél a szennyezett Fuller-földet meg kellett semmisíteni, ezért nem volt környezetbarát és növelte a költségeket.

## Transzformátor olaj Fuller-földes regenerálása

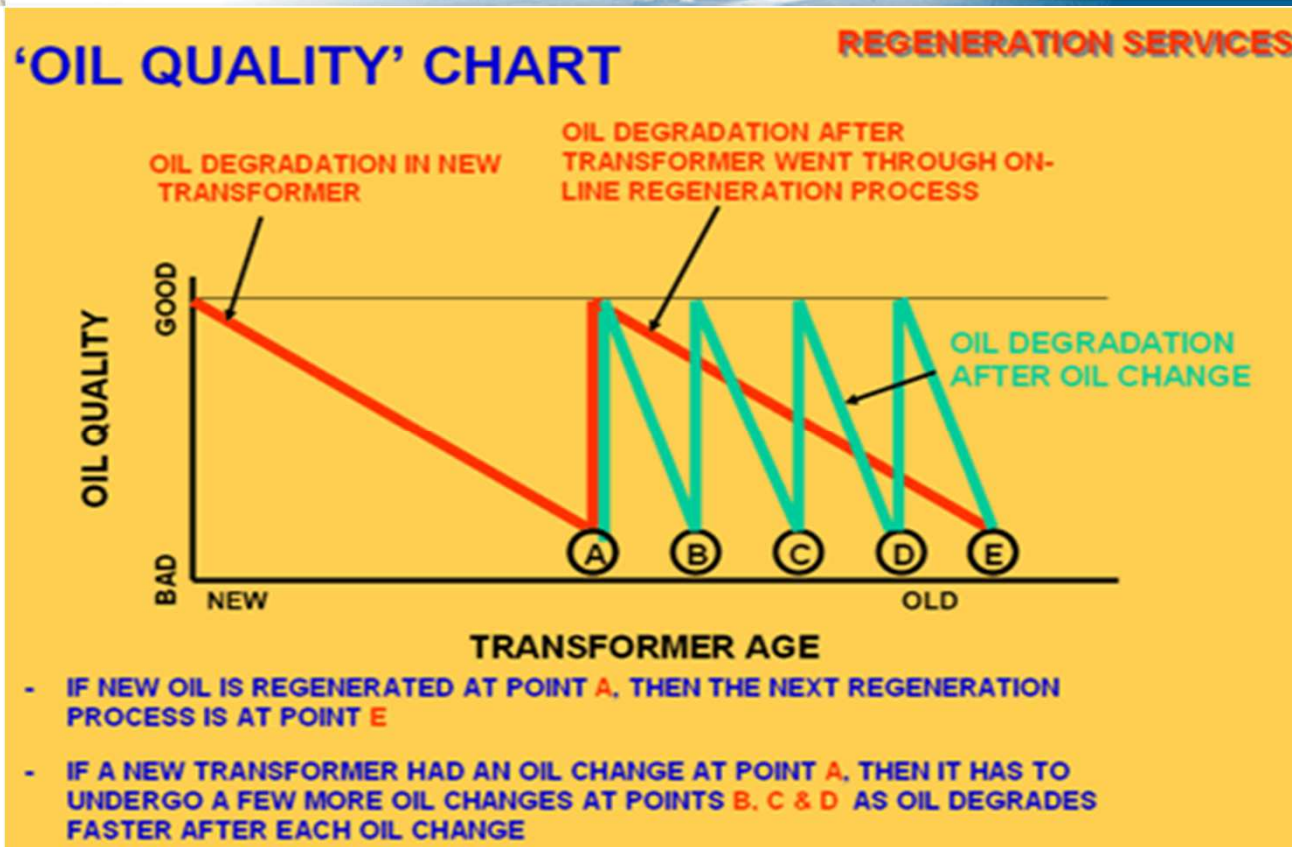
- Az itt bemutatandó szlovák **REOIL® eljárás** költséghatékony, mert a Fuller-földet is regenerálják (re-adszorpció folyamat).
- A **Fuller-föld általános kifejezés** azokra az iparilag felhasznált „anyagokra”, amelyek nagy felülettel rendelkeznek és **erős abszorbens tulajdonságúak**.
- A **Fuller-föld** manapság számos anyag keveréke, lényegében **egy granulátum**. Ilyenkor a Fuller – föld kifejezést főleg az olaj regenerálással kapcsolatban használják, jelentése az, hogy finomszemcsésű anyag, megköti a vizet, az olaj öregedési termékeit.
- Az olaj regenerálás lényegében az **olaj új állapotát állítja vissza de hatékonyabb, mint az olajcsere**.
- A teljes olajmennyiség többször átcirkulál a trafón, a **papírrétegek között, átöblíti a szilárd szigetelést**.
- **Költséghatékonysági** tulajdonság, hogy **on-line végezhető**: módszer rendkívül gazdaságos, mert nem **kell le- és felszerelni, szállítani**, az üzemelő trafót nem kell kikapcsolni.



- A regeneráló eljárást alapvetően megelőző jelleggel kell alkalmazni, mert a szilárd szigetelés károsodása irreverzibilis.
- Az eljárás ugyan nagymértékben előregedett trafókra is alkalmazható, azonban a szilárd szigetelés **irreverzibilis károsodásának elkerülése érdekében célszerű időben** használni.
- A szigetelés állapota így mindenképpen javul. A trafóbeli nedvesség esetéhez hasonló a helyzet, amennyiben az olaj és a szilárd szigetelés közötti anyagkoncentrációk egyensúlyi állapota alakul ki.
- A szilárd halmazállapotú szigetelés az olaj bomlástermékeit is tárolja. Figyelembe véve azt, hogy olajcsere esetén a teljes olajmennyiség 10–15%-a a transzformátorban marad, nyilvánvaló, hogy az olajcsere tisztító hatása csak nagyon kicsi lehet.
- Ezzel szemben az olajtöltés regenerálása következtében az egyensúlyi viszonyok eltolódnak, és azonnal megindul valamennyi beépült bomlástermékek a szilárd szigetelőanyagból a környező olaj felé irányuló diffúziója.

## Olajcsere vagy Fuller földes kezelés

- Üzemelő trafónál hatékonyabb az eljárás, mert az állandó 100Hz-es rezgés elősegíti, hogy a papír rétegei közül minél több öregedési termék kerüljön „kimosásra”.
- Az olajcsere és olajregenerálás: trafó élettartamának kiterjesztésére **olajregenerálással egyértelműen hatékonyabb, gazdaságosabb és környezetkímélőbb eljárás.**
- Ez azért van, mert az öregedési termékek nagy része (kb. **9/10 része**) **a papírosban** vagy annak felületén halmozódik fel, és csak **1/10 öregedési termék van az olajban.**
  - Az „**egyszerű olajcserével**” csak ez az **1/10 öregedési termék** kerül eltávolításra, az öregedési **termékek 9/10 része a papírrétegek között marad** és az újra bekapcsolás után az öregedési termékek egy része „kimosódik” a papírrétegek közül és az olaj paraméterei rövid időn **belül hasonló rossz értékekkel fognak rendelkezni, mint olajcsere előtt voltak.**
- Az öregedés során a papíros villamos paraméterei kevésbé romlanak a papír mechanikai szilárdságához képest, de ha **a papír mechanikai szilárdsága egy adott érték alá csökken,** az lényegében a transzformátor élettartamának a végét jelenti.



## Regenerálás vagy olajcsere

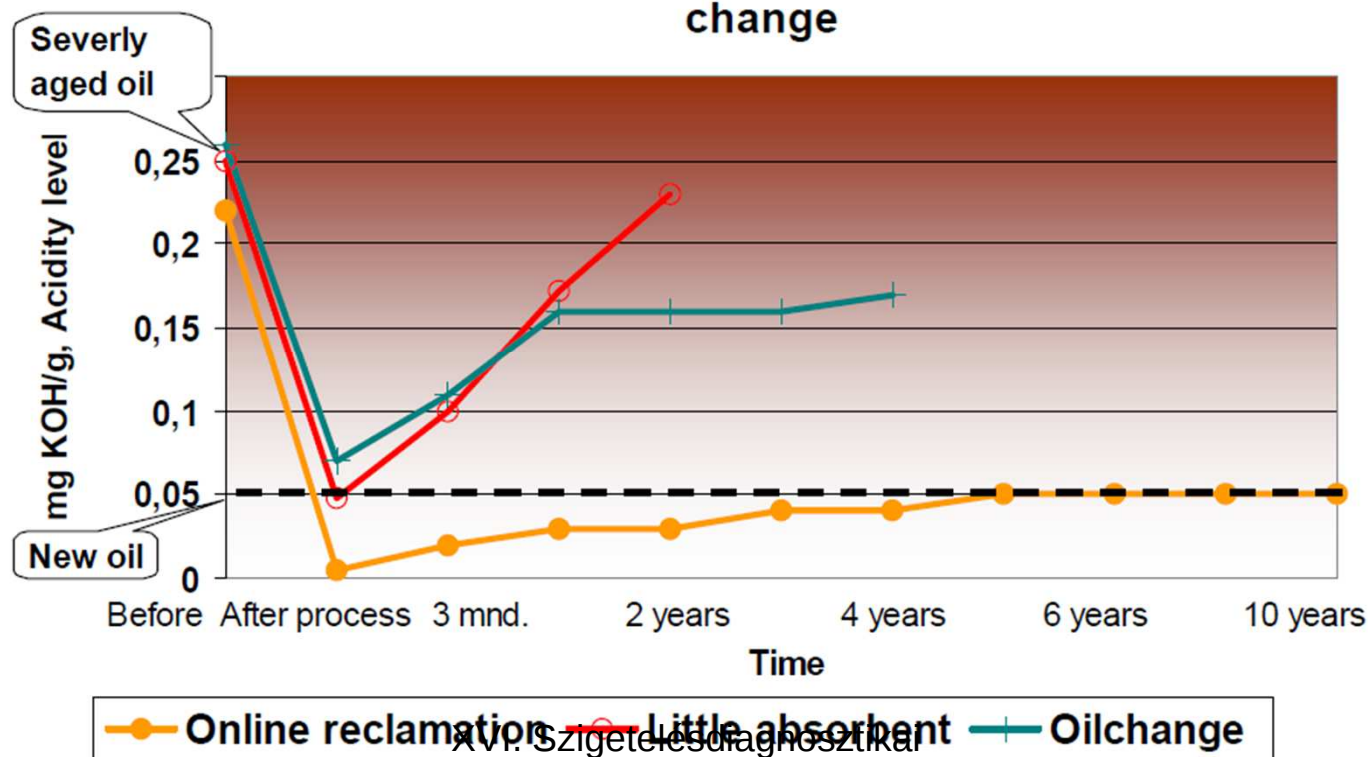
**Piros vonal:** az olaj romlása egy új állapotból és egyszer volt egy olajregenerálás, legközelebb E időpontban kell majd regenerálni.

**Zöld vonal:** az olaj romlása, amikor az A időpontban olajcsere volt, de azután mindig gyorsabban romlik az olaj, ezért kell még cserélni a B, C, D időpontokban is.

## Az olaj savtartalmának változás az idő függvényében.

A olajok hosszú távú és oxidációs stabilitása: Normál regenerálás, kis mennyiségű abszorbens használata (régi rendszerek), olajcsere. Láthatjuk annak a hatását, hogy nem távolították el megfelelő mennyiségben a papírból a öregedési terméket és vizet, nagyon rövid időn belül erőteljesen öregedni kezd a papír

**Aging of transformer oil after reclamation and oil change**



XVI. Szigetelésdiagnosztika

Konferencia, Sümeg, 2016.

október 19-21

## Olajregenerálás hatékonyság ellenőrzése RVM diagnosztikával

- A regenerálást gyakran olajfinomítóban végézik, de végezhető a **helyszínen is akár működő trafón feszültség alatt is.**
- Az olaj regenerálás lényegében az **olaj új állapotát állítja vissza**, tehát **hatékonyabb, mint az egyszerű olajkezelés, ill. az olajcsere.**

### Miért jobb regenerálás, mint az olajcsere?

- Az öregedési termékek nagy része (savak esetén akár **9/10** része) a papírosban vagy annak felületén halmozódik fel, és csak **1/10** öregedési termék van az olajban.
- Az „egyszerű olajcserével” csak ez az **1/10** öregedési termék kerül eltávolításra, az öregedési termékek **9/10** része a papírrétegek között marad és az újra bekapcsolás után az öregedési termékek egy része „kimosódik” a papírrétegek közül és az olaj rövid időn belül hasonló **rossz értékekkel fognak rendelkezni, mint olajcsere előtt voltak.**
- Regeneráláskor a teljes olajmennyiség többször átcirkulál a trafón, a papírrétegek között, átöblíti a szilárd szigetelést.
- **Költséghatékony, on-line végezhető:** módszer rendkívül gazdaságos, mert nem kell le- és felszerelni, szállítani, az üzemelő trafót nem kell kikapcsolni.

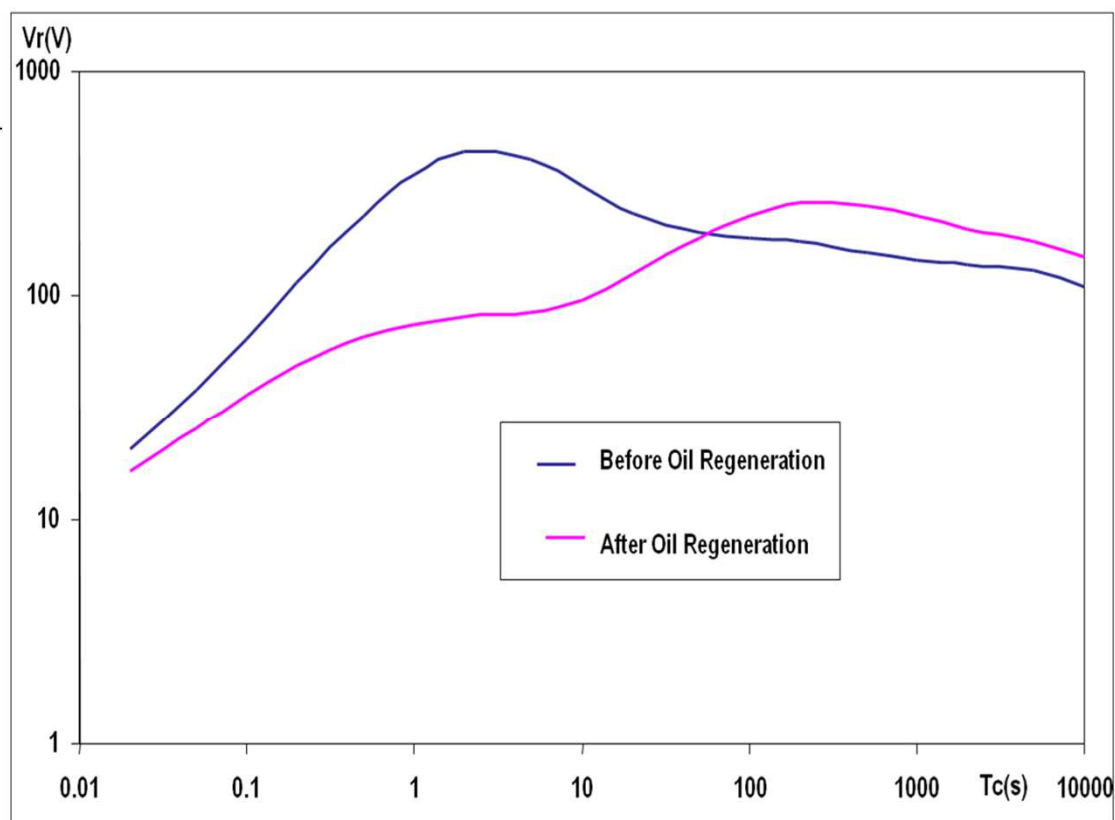
## Olaj regenerálás hatékonyság ellenőrzése RVM diagnosztikával

- Tehát jelentős különbség van mind műszakilag, mint költségben **az olajcsere, olaj „kezelés” és az olaj regenerálás között**, hogy tudhatja megkülönböztetni a megrendelő, hogy mit kap?
- Hogyan tudja **biztonsággal eldönteni**, hogy az **olaj regenerálás megfelelő hatékonysággal folyt le?**
- A „**hagyományos**” **diagnosztikai módszerek** (veszteségi tényező, abszorpció tényező, stb.) csak **egy paramétert használnak** a szigetelés jellemzésére.
- Ezek a szigetelésjellemzők mind **erősen függnek a hőmérséklettől**, de azt pedig nagyon **nehéz meghatározni**.
- Egy **több tonna szigetelőanyagot** tartalmazó trafóban **hőmérséklet eloszlása, elnedvesedése ill. öregedése erősen inhomogén**, hogyan lehetne **egyetlen diagnosztikai értékkel jellemezni**, ezért rengeteg **anómália** van használatukkal.
- Tehát a „**hagyományos**” **diagnosztikai módszerek egyedül nem alkalmasok** egy ilyen bonyolult szigetelési rendszer **korrekt diagnosztizálására**.



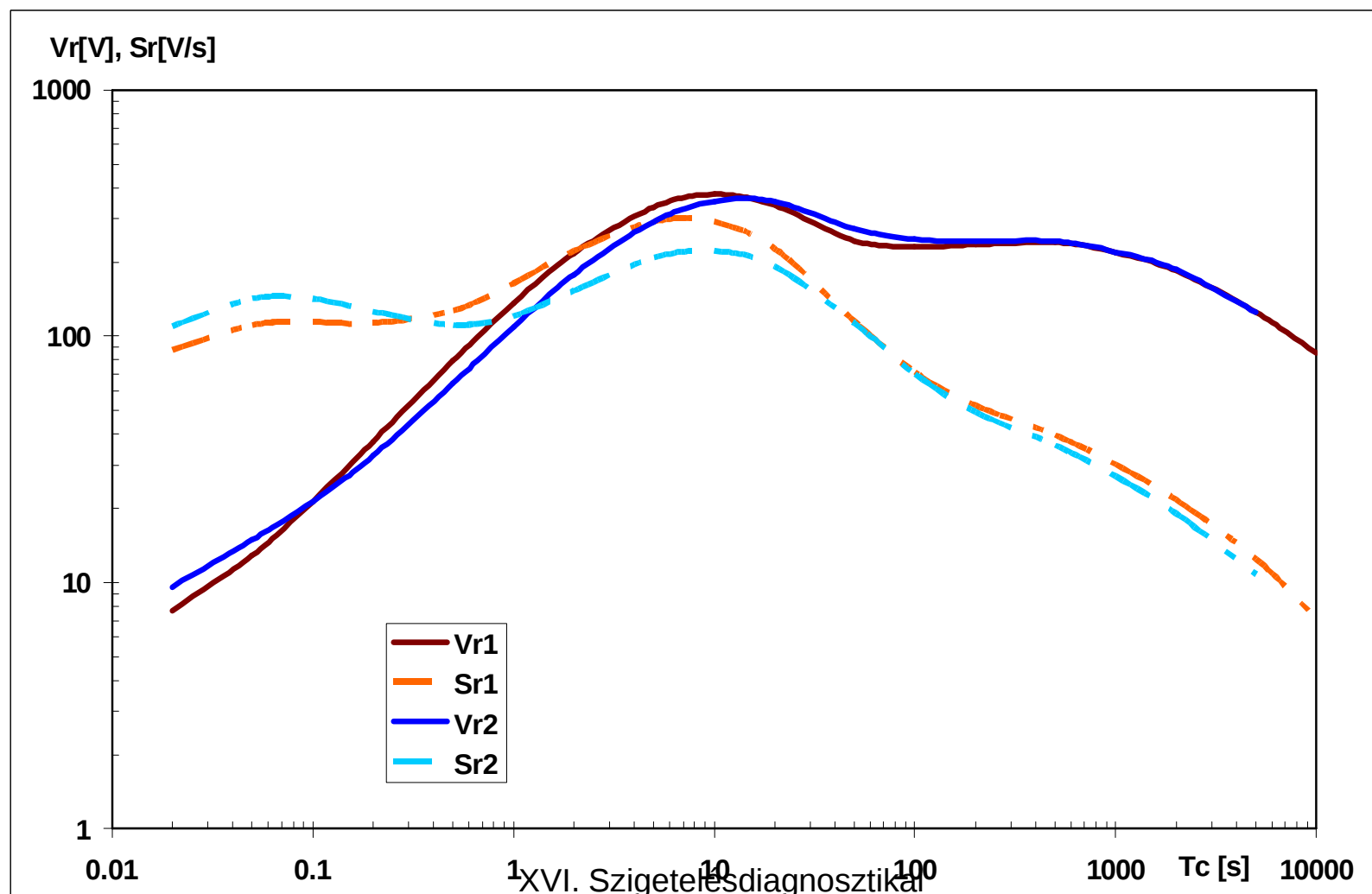
## Olaj regenerálás hatékonyság ellenőrzése RVM diagnosztikával

### Olaj regenerálás hatása az RVM polarizációs spektrum görbékre



Kék görbe: RVM spektrum regenerálás előtt  
Píros görbe: RVM spektrum regenerálás után

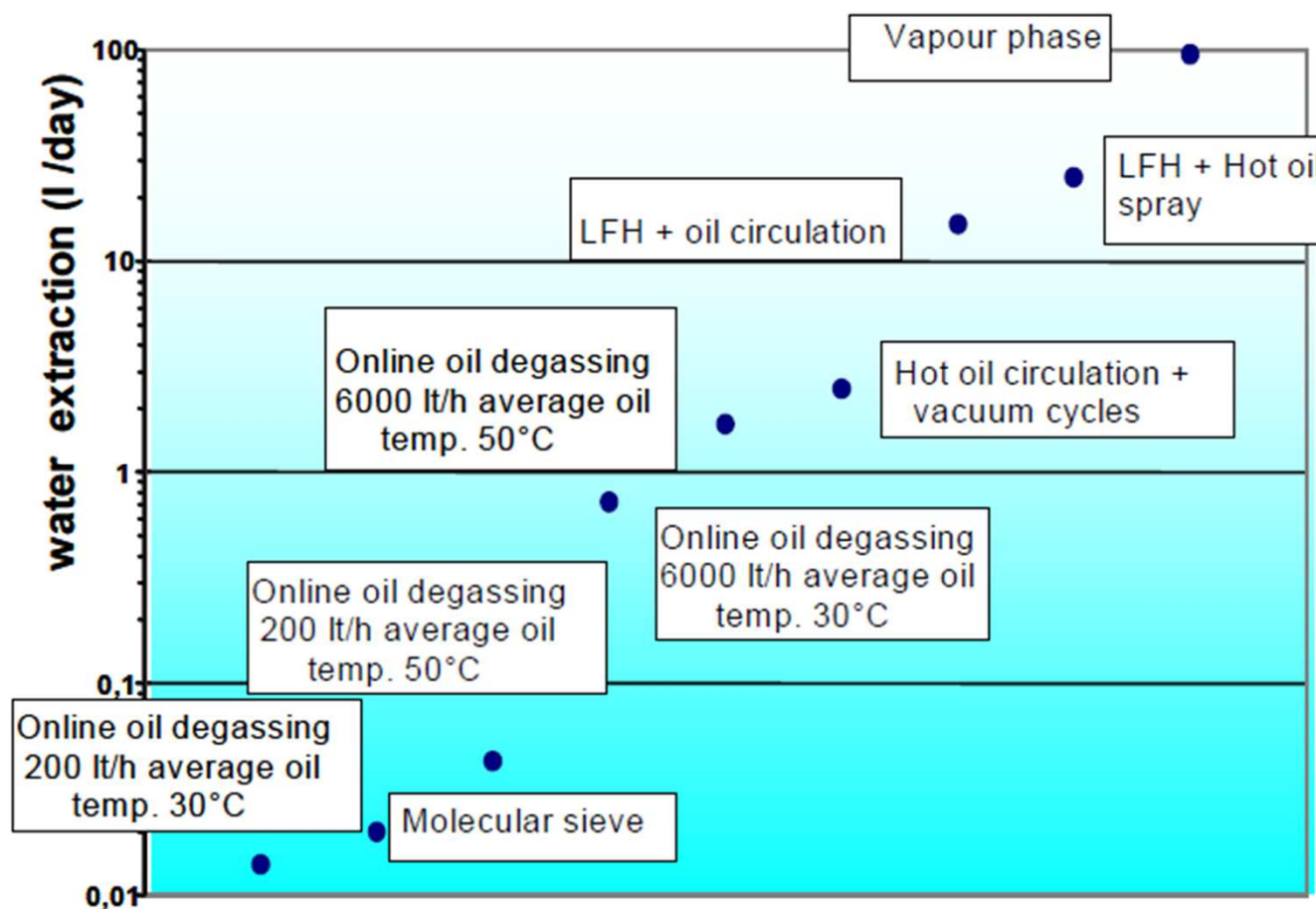
**Trafó felújítás előtt és után mért RVM görbék. Enyhén nedves de sok öregedési termék felhalmozódva. Nem volt olajcsere sem regenerálás**



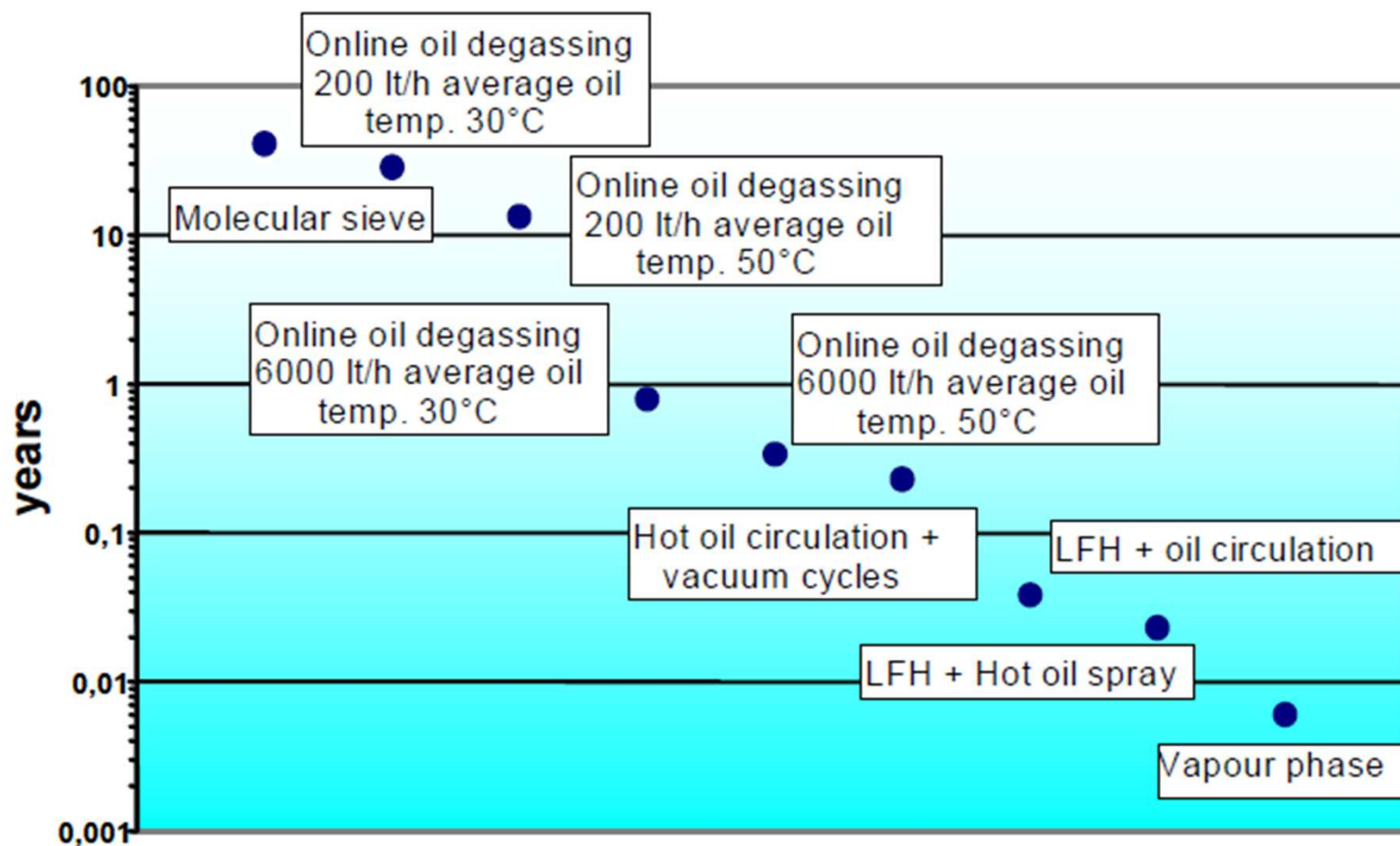


## Száritási eljárások összehasonlítása

Különböző szárítási folyamatok összehasonlítása a vízelvonás/nap mutatón keresztül: közvetlenül az olajon keresztüli vízelvonás nagyon lassú (<1%).



Különböző szárítási folyamatok összehasonlítása a vízelvonási paraméteren keresztül, amikor 3%-ról 1,5%-ra csökkentjük a vizet.





## Tekercs leszorítás

### **Kérdés: szárítás után újra kell préselni a tekercseket?**

- Az újra leszorítás kritikus része lehet a szárítási folyamatnak.
- A vízkivonással csökken a méret (roskadás), csökken a leszorító erő.
- A csökkenés függ a kivett víz mennyiségétől, a gyártásnál használt leszorítástól, a DP értéktől, a maximális üzemi hőmérséklettől, stb.
- A megfigyelés az volt, hogy ha 1,5% alatt van a teljes vízkivonás, akkor nem volt jelentős tekercsrövidülés.
- Ha a gyári szárítás után a tekercs rendszeren leszorításra kerül, akkor a helyszíni szárítás nem okoz rövidülési problémát.
- Ha a papír DP-je kicsi, ott már lehet roskadás, új papírnál ez jelentéktelen.
- Jó tudni: a leszorító erő 0°C-on kb. egyharmaddal kisebb, mint 90°C-.
- Vigyázni a 0 fokon történő bekapcsolással (még ehhez jön az un. hidegindítási effekt.



## Konklúziók

- Lényeg: preventívnek kell lenni.
- A magas víztartalom gyorsítja az öregedést, csökkenti az átütési szilárdságot, rövidíti a trafó élettartamát, buborék képződést okoz, stb.,
- Tehát igen fontos a víztartalom alacsony szinten tartása.
- Helyszíni szárítás előnye: Alacsony költség, nincs trafó elszállítás, leszerelés, helyszínen lehet végezni, viszonylag alacsony víztartalom érhető el, rövidebb kisesés, stb



**Köszönöm a figyelmet**



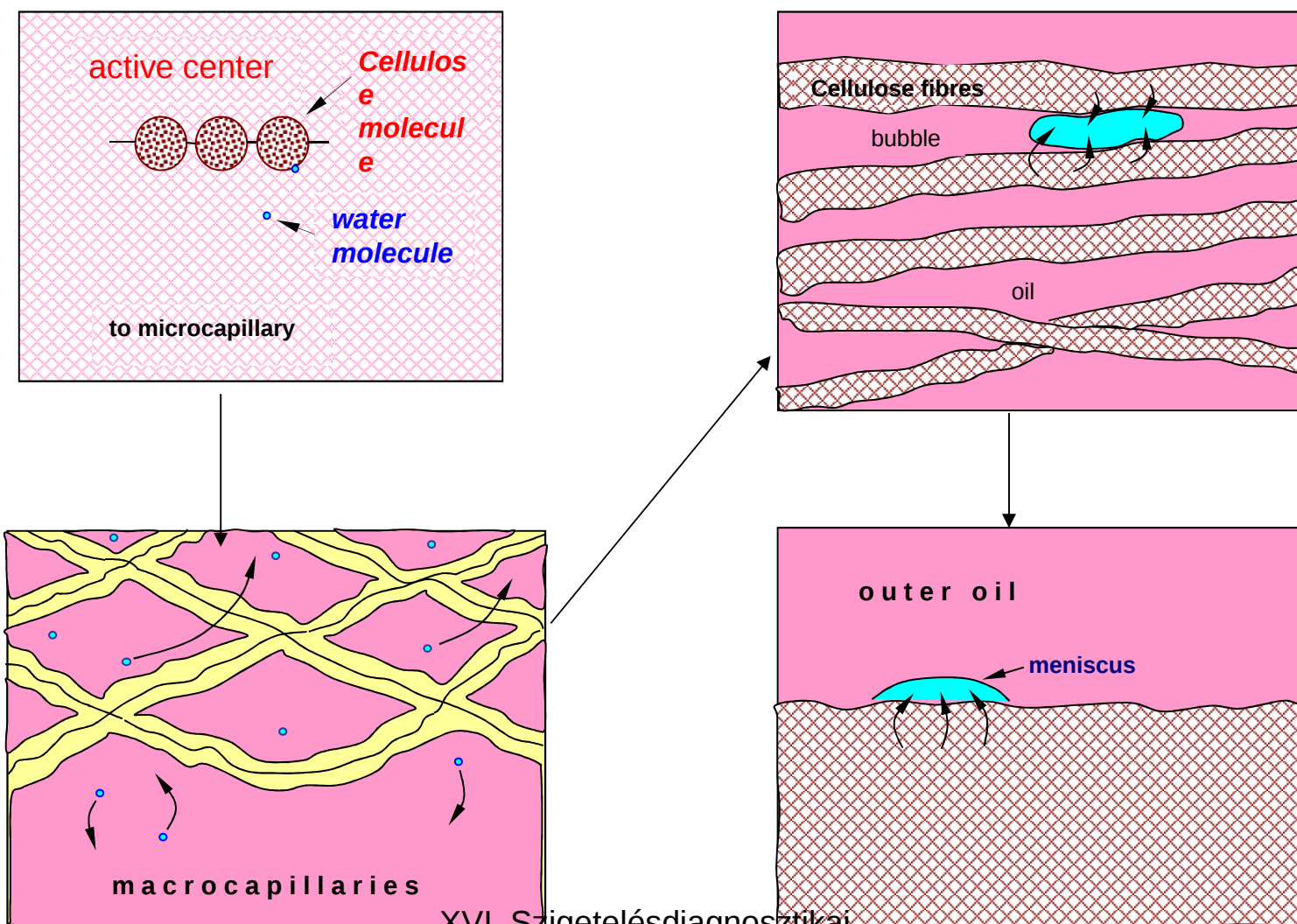
**a**



## Szigetelőpapíros szorpciós tulajdonságai

- A cellulóza különleges **szorpciós** tulajdonságai az **üregrendszerű rostos** felépítésből erednek.
- A papíros valóságos, **aktív felülete** a rostok mikroszkopikus és szubmikroszkopikus üregei következtében **nagyságrendekkel nagyobb, mint a körvonalméretekből adódó felület.**
- Az üregek **legkisebb méretei  $3\mu\text{m}$** , a finom kapillárisok  **$10\mu\text{m}$**  méretűek, a makrofibrillák  **$100\mu\text{m}$**  nagyságúak.
- Ezen a **nagy felületen a cellulóza** a környező közeg arra alkalmas anyagaiból jelentős mennyiséget képesek **megkötni (adszorpció)** és azt csak meghatározott körülmények között adja le ismét (**deszorpció**).
- Az **adszorbeálható** anyagok között **legfontosabb a víz.**
- A víz mértékadó átmérője kb.  **$0,5\mu\text{m}$** , tehát a cellulóza legkisebb üregeibe is be tud hatolni.
- A Kraft típusú lágyműanyag papír **telített állapotban 15-25** súlyszázalék vizet tud megkötni.
- A **relatív telítettsége** **azonossá** válik a környező közegnek az adszorbeált anyagra vonatkozó relatív telítettségével.
- Tehet a műanyag papír **mindaddig vizet vesz fel** a környező olajból, amíg az **olaj és a papíros relatív telítettsége meg nem egyezik.**

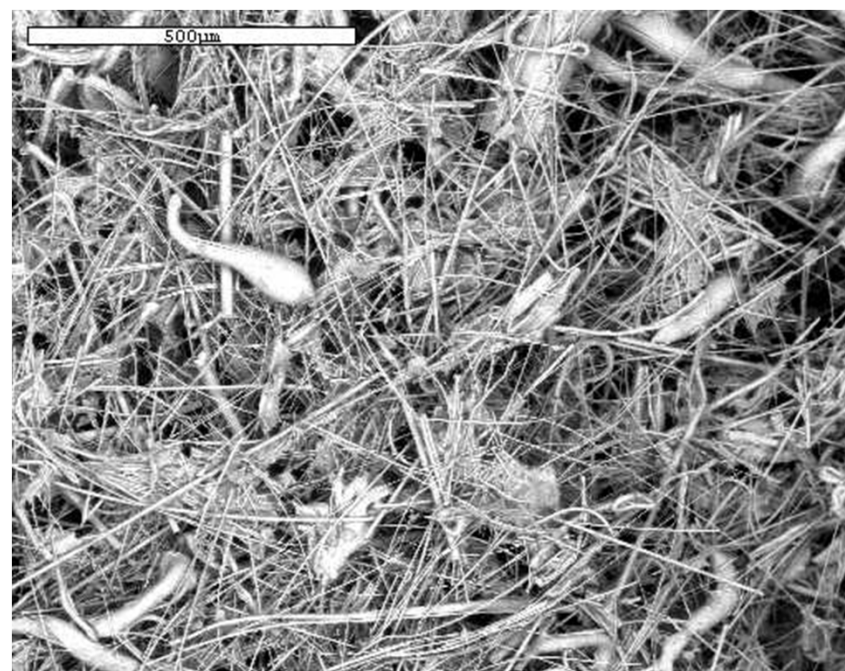
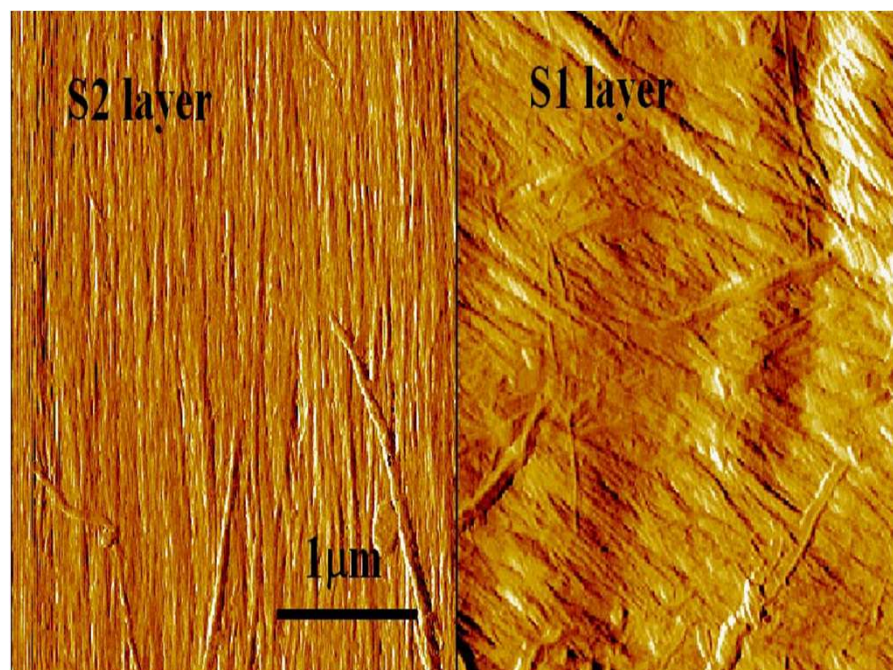
## Papír kapillárisai, víz kötődése a papírban, víz eltávolítása



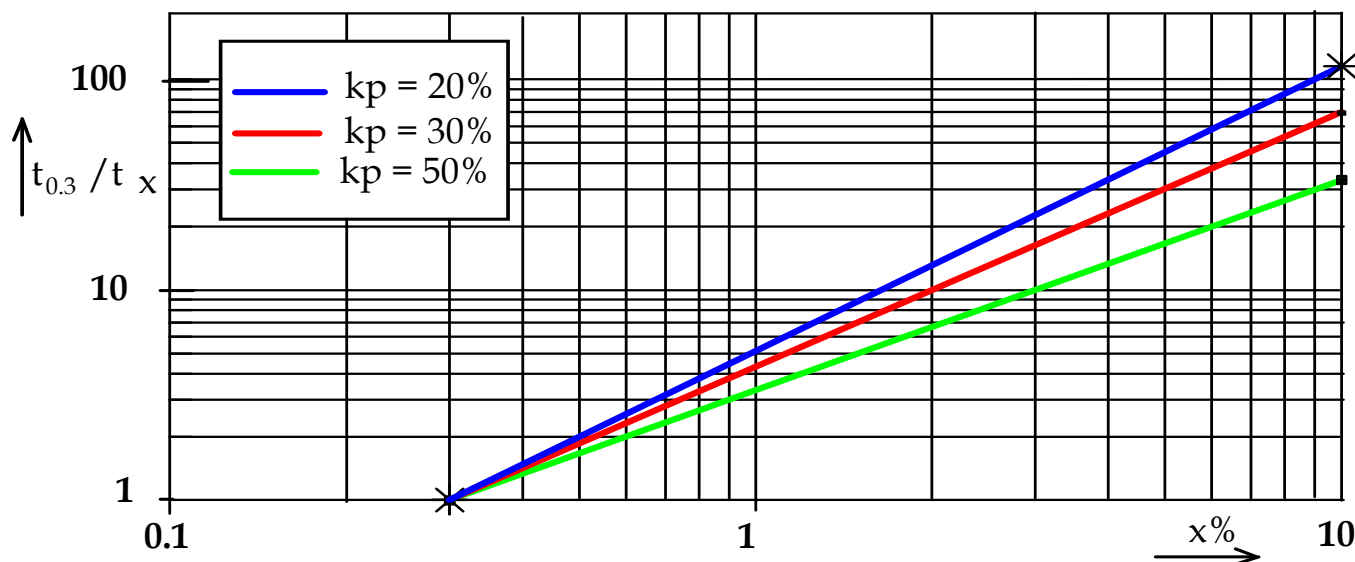


### Papíros szerkezeti felépítése:

- Üregrendszerű rostos felépítésű, mikro kapilláris rendszerrel,  $3\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  és  $100\mu\text{m}$  nagyságrendű üregek,
- A papíros valóságos, **aktív felülete** a rostok mikroszkopikus és szubmikroszkopikus üregei következtében **nagyságrendekkel nagyobb, mint a körvonalméretekből adódó felület.**



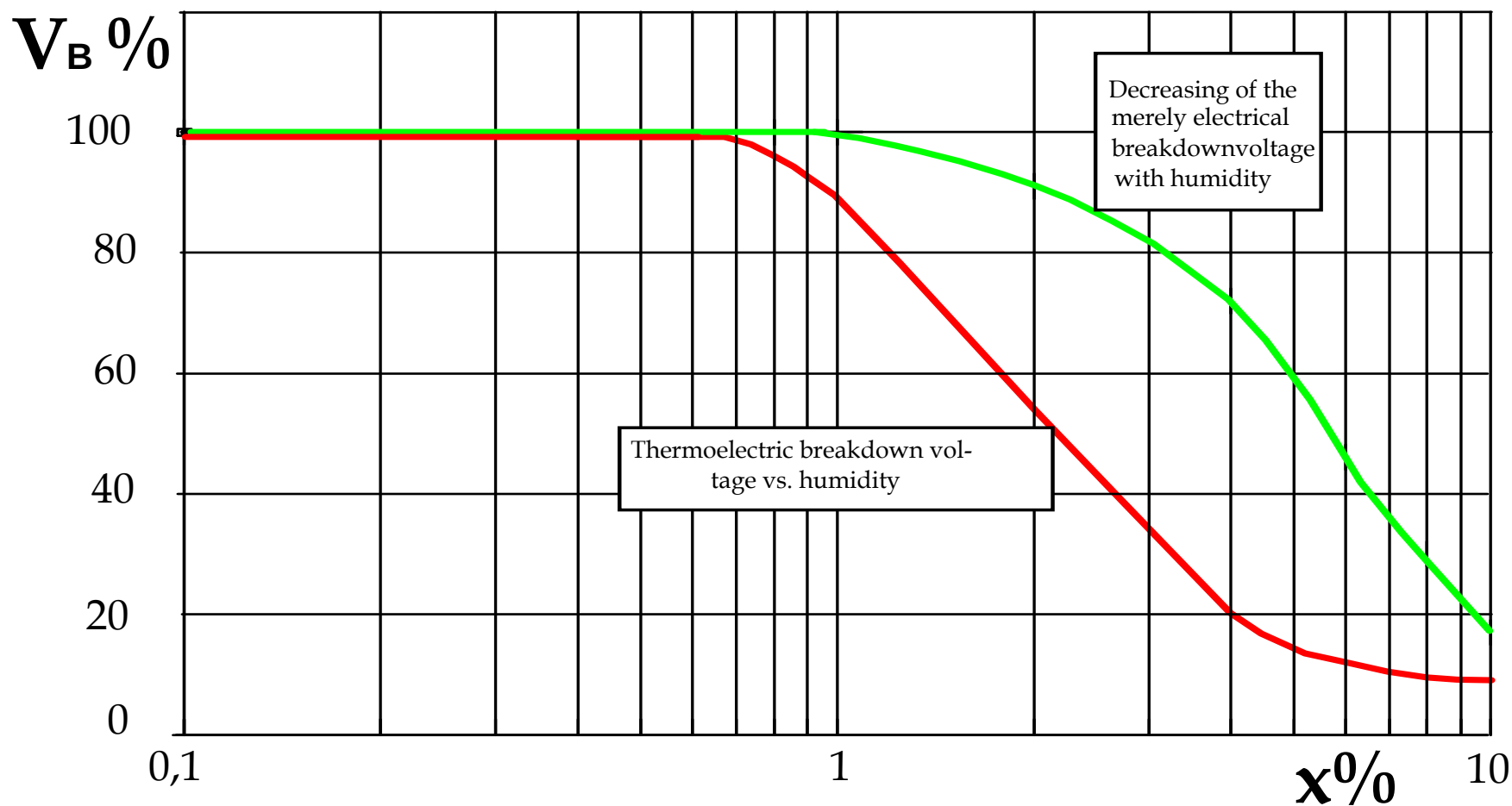
## A nedvesség hatása a cellulóz de-polimerizációjának sebességére



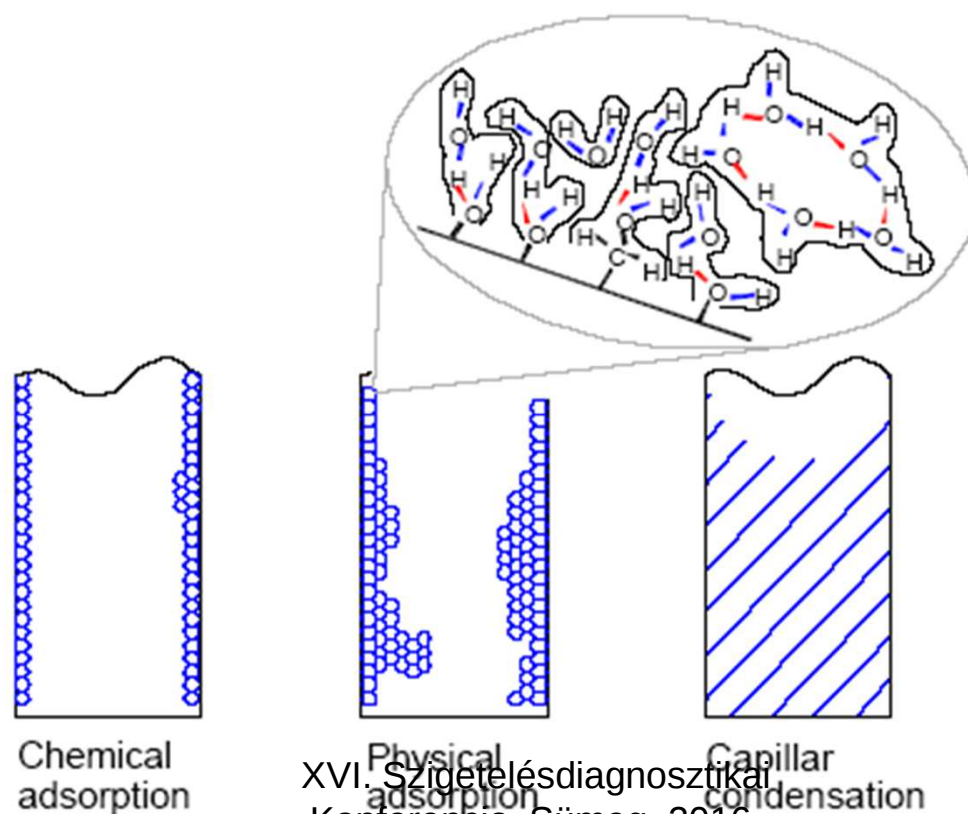
- A nedvesség és az olaj öregedési termékek a de-polimerizációs folyamatokat gyorsítja (ábra)
- A vízszintes tengelyen a cellulóz nedvességtartalma súlyszázalékban ( $x\%$ ), a függőleges tengelyen a  **$t_{0.3}/t_x$  arány** szerepel.
- A  $t_{0.3}$  a 0,3% nedvesség mellett, egy adott polimerizációs együttható  $k_p$  értékre való csökkenési ideje,  $t_x$  az  $x\%$  nedvesség esetében - egyébként azonos körülmények között - ugyanazon  $k_p$  értékre való csökkenésnek az ideje. A  $k_p$  számszerű értéke az eredeti, kezdő érték %-ában van megadva (20, 30 és 50%).



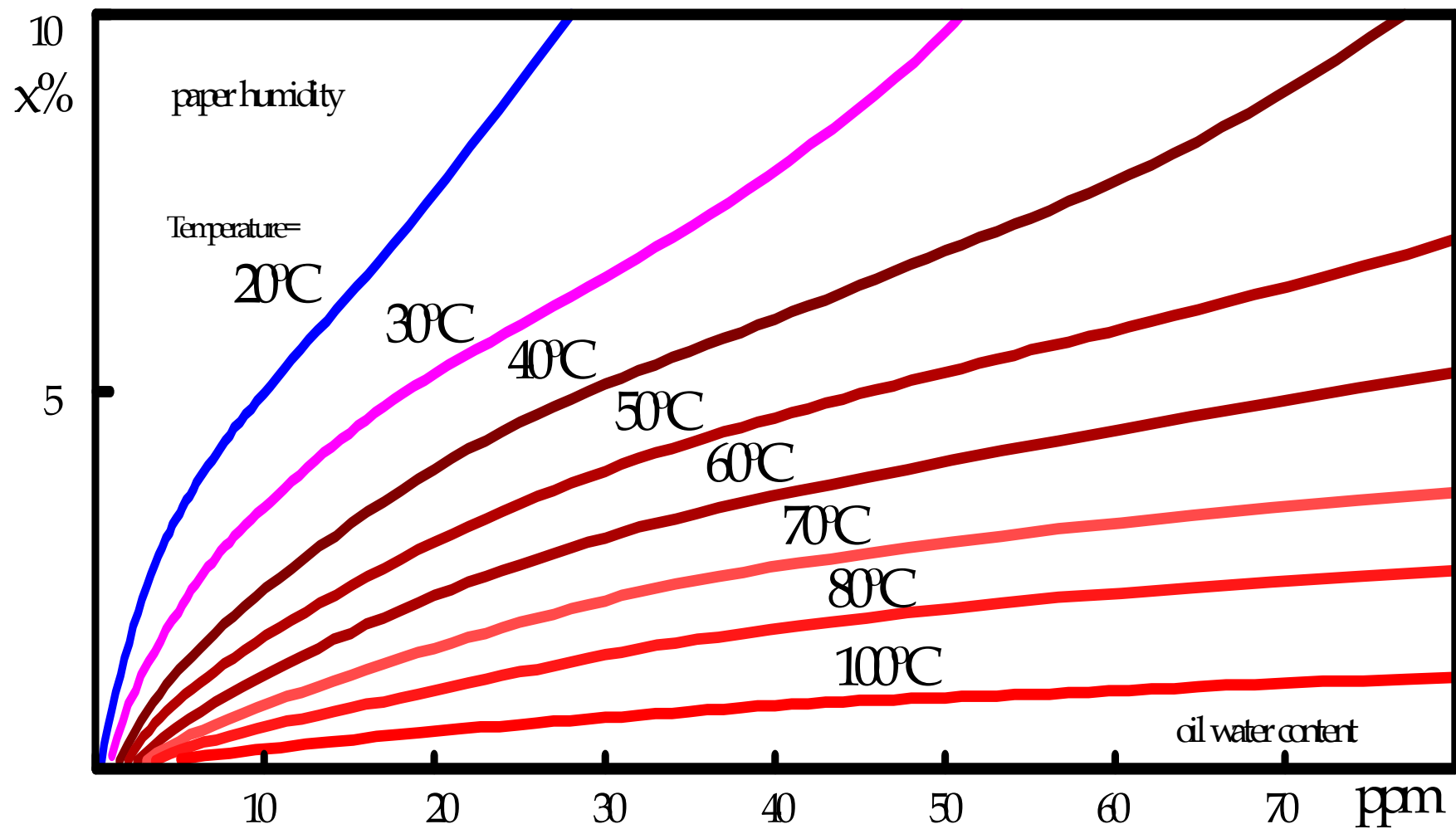
## Olaj-papír szigetelés tisztán villamos- (zöld), és hő-villamos (piros) átütési viselkedése a nedvesség tartalom függvényében 80°C-on



- Főleg a cellulóza makro **kapillárisaiban lévő vízből** keletkeznek a buborékok, de az öregedés során keletkező **CO** ugyancsak hozzájárul a buborékképződéshez.
- Buborék képződést befolyásolják: **hőmérséklet, víztartalom, a poláros szennyezések, öregedési termékek, cellulóza szerkezete és minősége.**
- A különböző tanulmányok azt mutatják, hogy a kapillárisok átmérője **0,01 – 7μm** között változhat. A buborék keletkezését okozó felületi feszültség függ a hőmérséklettől,

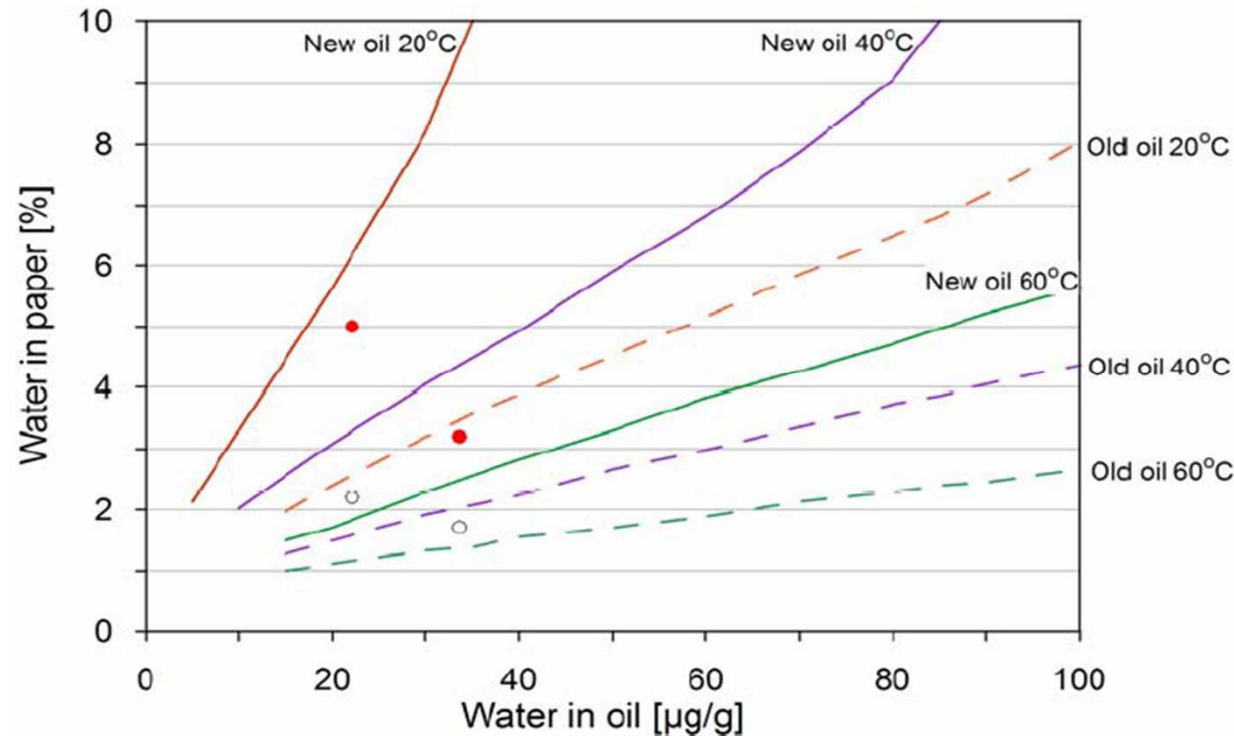


## Olaj-papír szigetelés egyensúlyi görbéi





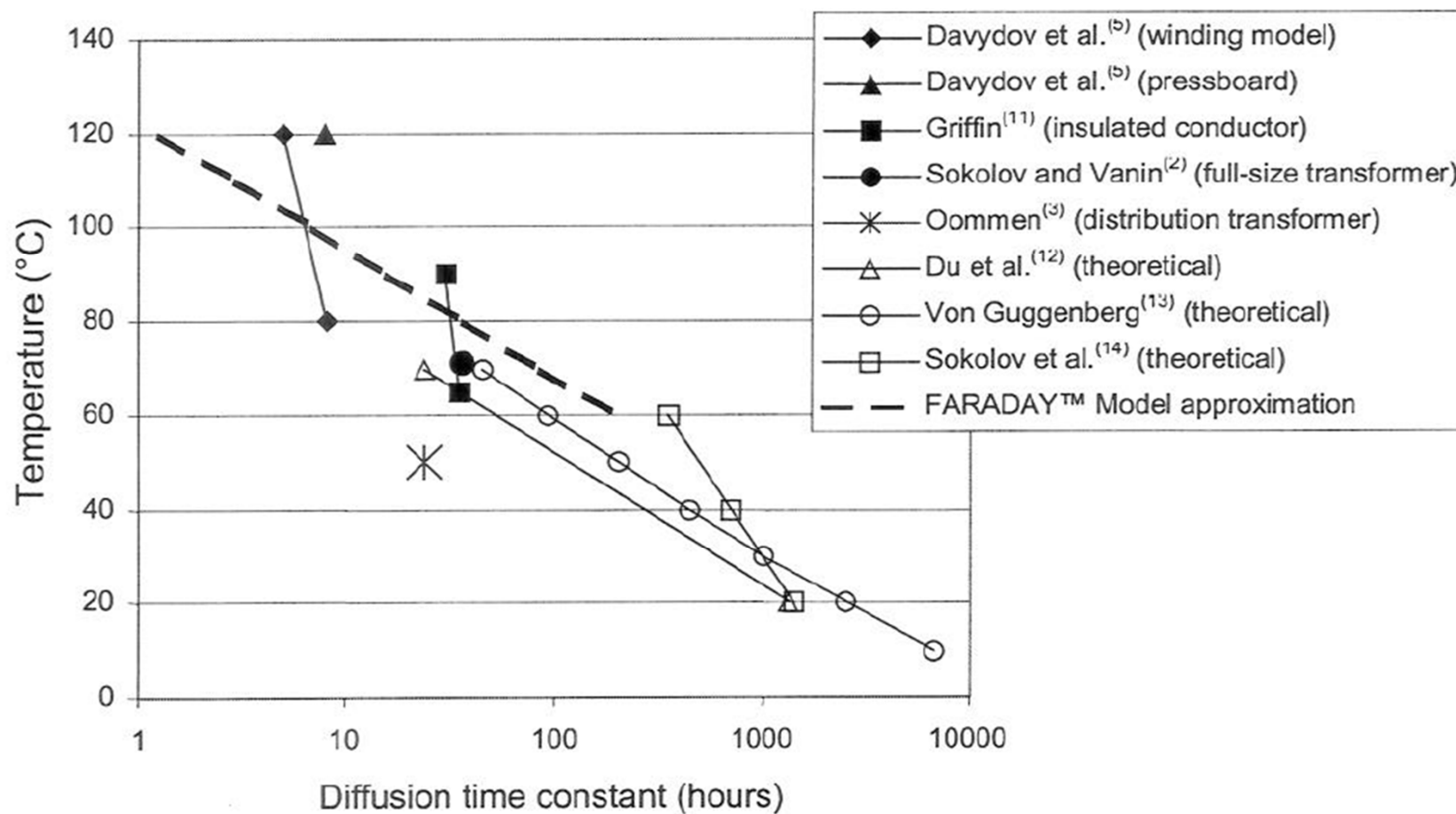
## Olaj-papír (víz) egyensúlyi állapot különböző hőmérsékleten



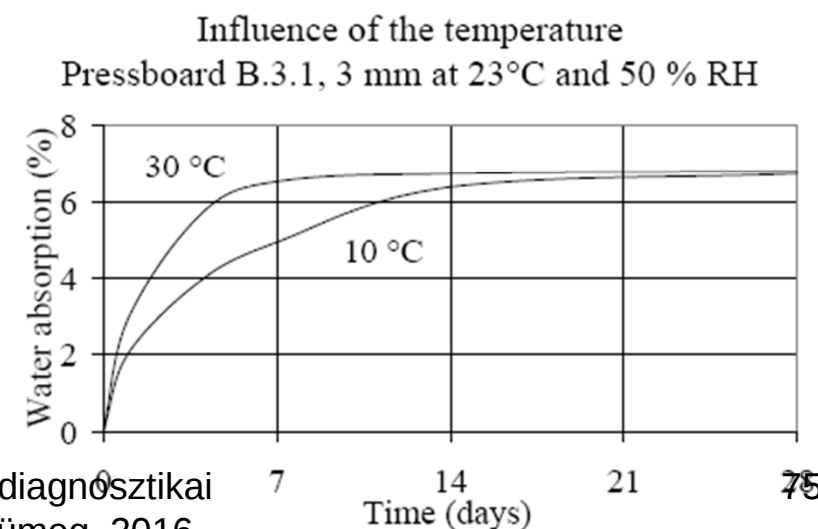
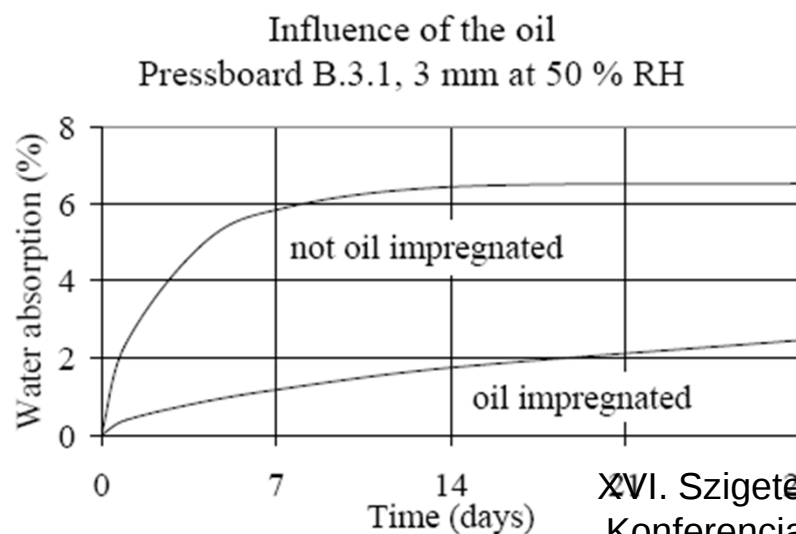
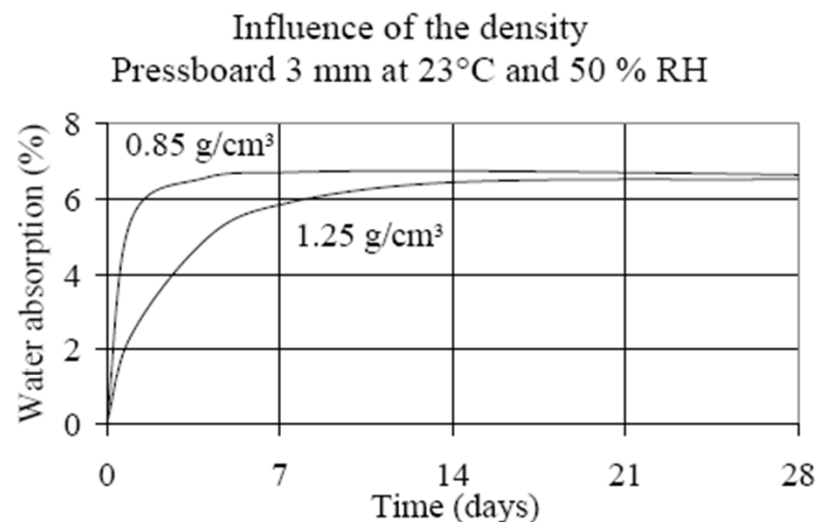
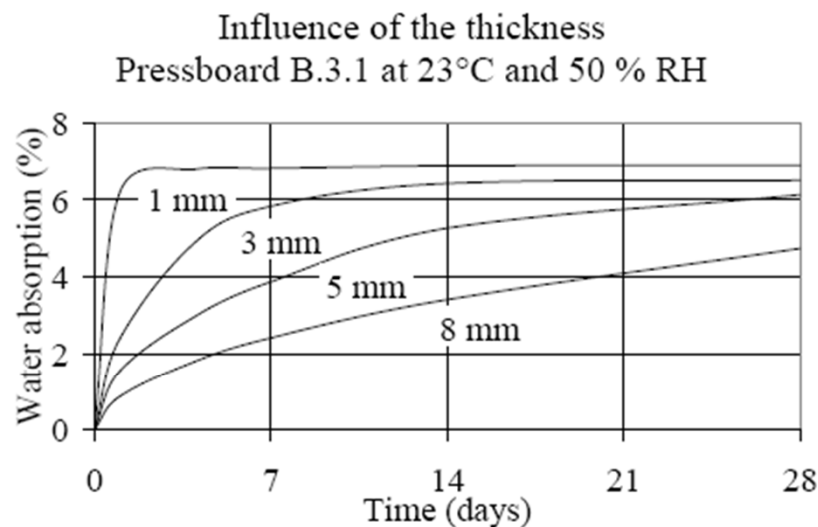
- **Öregedés** közben az olaj nedvesség **felvevő képesség változik (növekszik)**.
- **Nem kellően kiszáritott** új trafónál **gyors** felmelegedéskor a **papír** nagy mennyiségű **vizet ad le**, amelyet az olaj a leadás ütemében **nem tud "oldatba"** vinni, ennek következtében vízcsepp kiválásra kerülhet sor, ami közvetlen átütési veszélyes.
- Ezt a folyamatot még az is erősíti, hogy a terhelés miatti **gyors felmelegedés során az olaj hidegebb**, mint a papír nagy része



## Elméleti és tapasztalati diffúziós időállandó vékony szigetelő anyagokban.



## Kiszáritott papírszigetelések levegőn történő vizesedési folyamata (súlynövekedés)



## **Buborékképződés „küszöb hőmérséklete” az olajban**

- Ha ismert a papír nedvességtartalma, abból pedig becsülhető az olaj buborék képződésének kezdeti hőmérsékletét.
- A papír nedvességtartalma vagy az olaj nedvességtartalmából számolható (egyensúlyi görbék), vagy pedig rendelkezésre állhat az RVM off-line mérés alapján is.
- A buborékképződés kezdeti hőmérsékletének számítására több görbesereg áll rendelkezésre,
- Ha összehasonlítjuk a Hot-Spot hőmérsékletet és a buborékképződés mindenkor kezdeti hőmérsékletével, akkor meghatározhatjuk mekkora „túlterhelési (hot-spot hőmérsékleti) tartalékunk” van még a rendszerben az adott pillanatban.
- A buborékképződés bonyolult folyamat eredménye, legfontosabb befolyásoló tényezők a nedvességtartalom és a hőmérséklet, de függ még az olaj típusától, öregedésétől is.

- **Buborék képződési küszöbhőmérséklet meghatározása**
- Hőmérsékletnövekedés hatására – többek között – gyorsul az öregedés és az olaj-papír szigetelésben gázok szabadulnak fel, ami miatt csökken az átütési szilárdság.
- Főleg a fentiek miatt az IEC 354 (Loading Guide for Oil-immersed Transformers) a hot-spot hőmérsékletet  $140^{\circ}\text{C}$ -ban limitálta (a régebbi IEEE loading guide ezt a hőmérsékletet  $180^{\circ}\text{C}$ -ban adta meg).
- A pontosabb mérések kimutatták, hogy a gázképződés „határhőmérséklete” függ a nedvességtartalomtól is.
- Az eredmények azt mutatják, hogy nagyobb nedvességtartalom esetén az IEC által megadott  $140^{\circ}\text{C}$  határhőmérséklet alatt is megindulhat a gázképződés.
- **Számítandó mennyiség:** buborékképződési küszöbhőmérséklet
- Felhasználandó adatok: átlagos papír víztartalom, „buborékképződési küszöb hőmérséklet - papír víztartalom jelleggörbe”
- A fenti adatokból és az alábbi jelleggörbékből számítandó a buborékképződési küszöb hőmérséklet és összehasonlítandó a számított átlagos papír hőmérséklettel.

## Buborék képződés problémája

Nagyobb víztartalom, alacsonyabb buborék megjelenési kezdeti hőmérséklet, majd megjelenik a PD, kisebb átütési feszültség, stb.

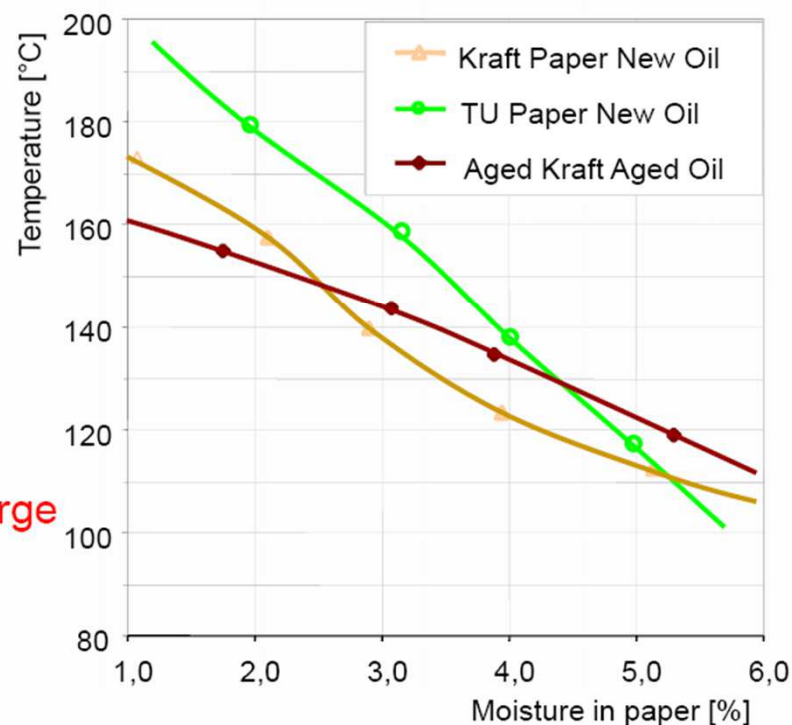
### Effect 1: Bubbling

#### Effect:

Bubbling inception temperature will decrease with higher moisture content

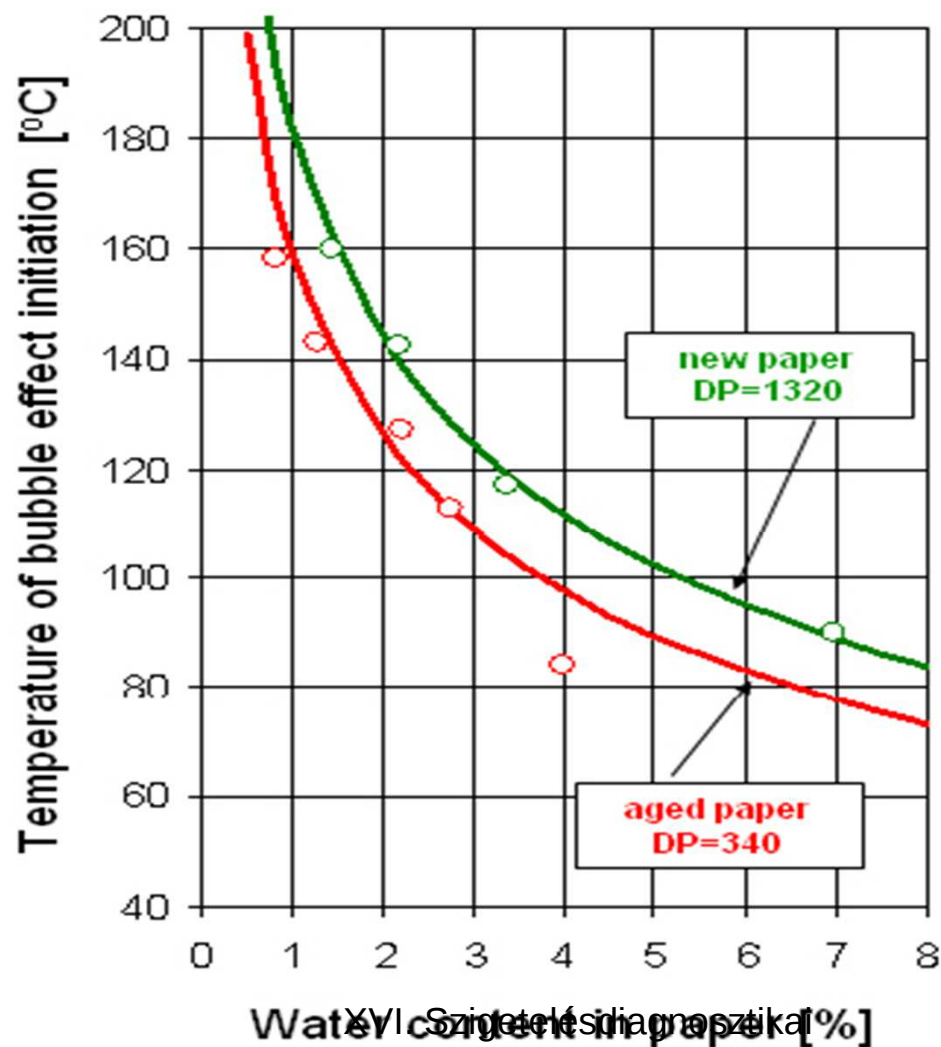
#### Risks:

- Inception of Partial Discharge
- Lower Dielectric Strength
- Short-Circuit of Windings





## Buborékképződés küszöbhőmérséklete a papír víztartalma függvényében új (DP=1320) és öregedett papír (D=340) esetén



Öregedés, nedvesedés, hasonló hatást fejt ki: csökkenti a szigetelés élettartamát

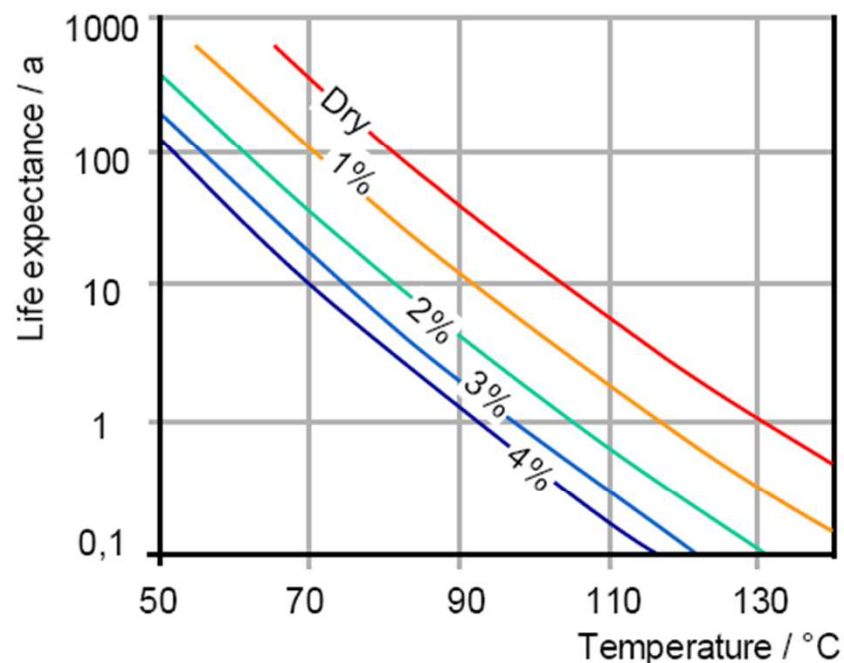
## Effect 3: Aging

### Effect:

High temperature and moisture content will dramatically lower the mechanical strength of paper insulation

### Risks:

- Lower the expected life of transformer
- Run transformer at lower rating

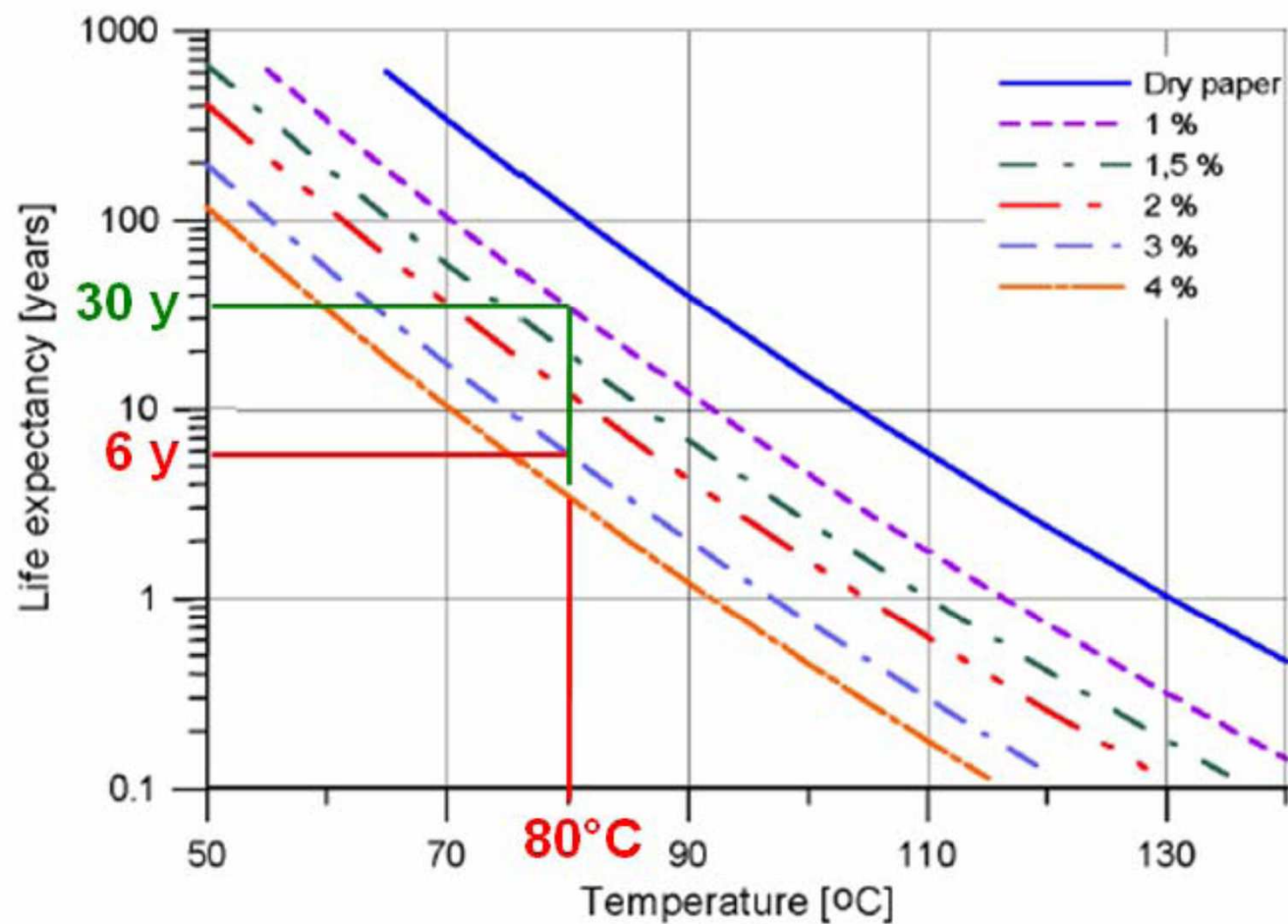


Nedvesedés, öregedés egyaránt az élettartamot csökkenti

Moisture in  
paper (%)

1%

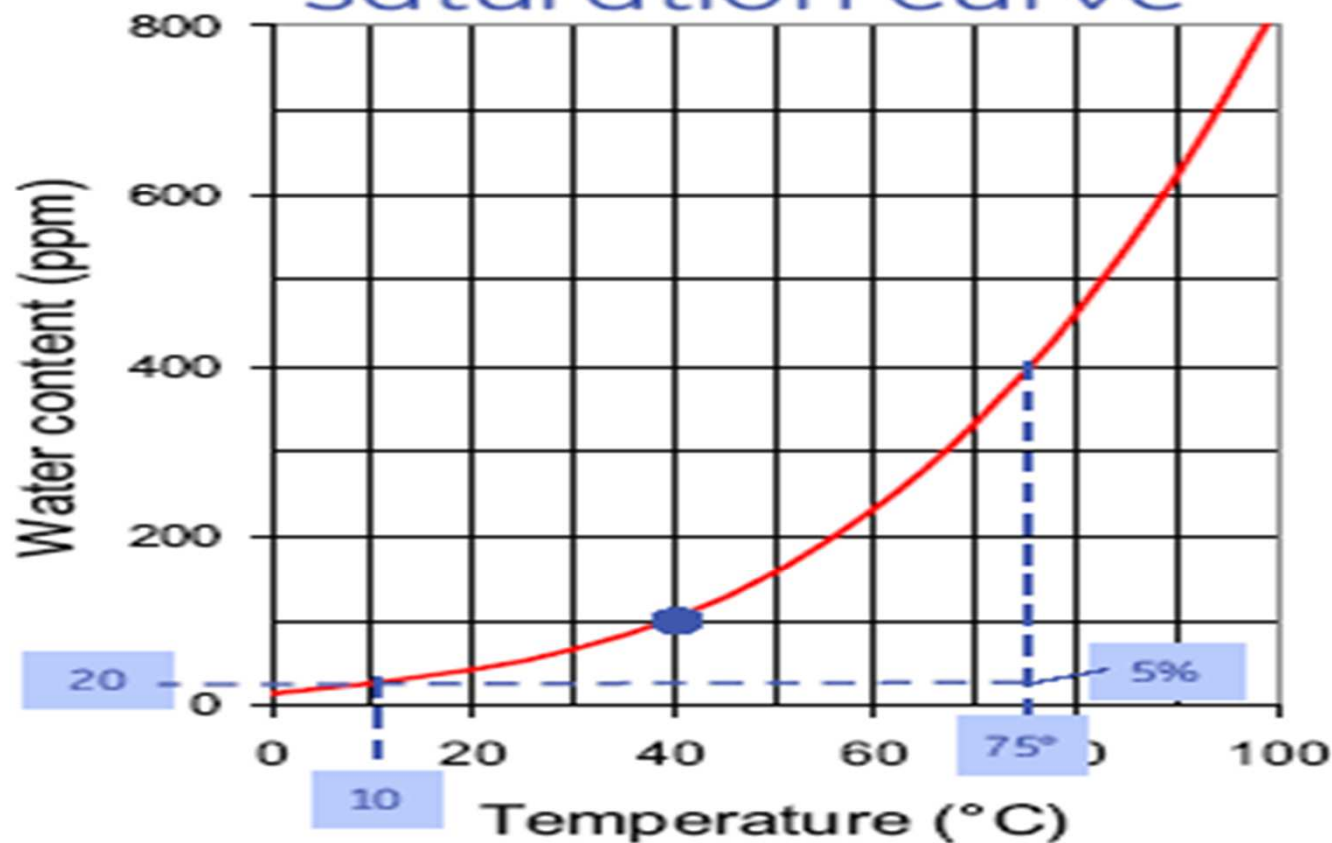
3%



Source: SINTEF



## Water-in-oil saturation curve





A gyakorlatban az olaj-papír rendszerben a termikus egyensúlyt nem lehet elérni. A hőmérséklettel az egyensúlyi görbék mentén változik állandó a papír és az olaj víztartalma, ezért lehetetlen pontosan becsülni a igazi víztartalmat.

Egy adott pillanatban vett olajminta lapján végzett Karl-Fisher módszerrel mért víztartalom is közelítő értéket adhat.

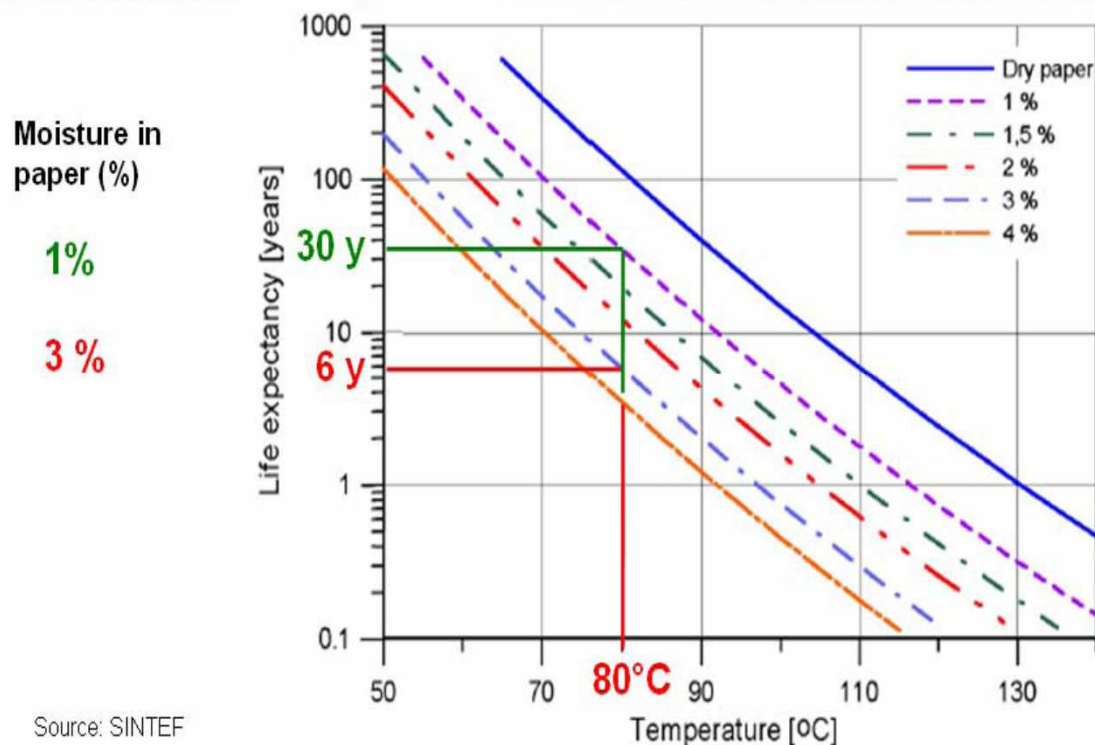
A hőmérséklet változás nedvesség elmozdulást hoz létre a papír és az olaj között, ami hőmérsékletfüggő.

A diffúziós állandó függ az olaj-papír határfelület hőmérsékletétől, a papír vastagságától, nyomástól (1mm-es szigetelésre lásd a táblázatot).

A szabad víz a transzformátor szigetelésben átütéshez vezet.

Hideg trafóban ez különösen problémás.

A vízcseppek az olajban részecskéket generálnak.



Source: SINTEF

**Trafó élettartamának függése**

- Hőmérséklettől (szabvány)
- Nedvességtartalomtól (GUIDE)
- Felhalmozódott öregedési termékektől (GUIDE)
- Az öregedési termékekre un. „egyenértékű víztartalom” vezethető be, és hasonló törvényszerűséget mutat, mintha „egyenértékű” víz okozta volna a problémát.

**80°C-on üzemeltetve a transzformátort 1% papír nedvességtartalom esetén a várható élettartam kb. 30 év, ha a nedvességtartalom 3%-ra nőne, akkor a várható élettartam kb. 6 évre csökkenne.**

**Egyenértékű nedvességtartalommal jellemezhető az öregedési termékek felhalmozódása is, hasonló módon tolja el (3D) a korábban csak hőmérsékletre, majd hőmérséklet és vízre bevezetett (2D) egyeneseket.**



## Nedvesség hatása a buborékképződésre

- A térerő, nedvesség és öregedési termékek hatására buborékok, majd részleges kisülések keletkeznek az olajban.
- Üzemi, vagy túlterhelési, vagy polarizációs veszteségek miatti nagyobb hőmérsékletek mellett, nagyobb **papír nedvesség tartalom** ill. magasabb olaj **öregedési termék felhalmozódás** esetén a buborékképződés **már 10 kV/cm** térerősség mellett megindulhat.
- Ezek hatására pedig **részkisülések léphetnek fel**, olyan geometriájú helyeken is, ahol a buborékok nélkül ez nem volna várható.
- Az egyszer megindult **részkisülés viszont már önfenntartó**, kialakása rendszerint csak jóval kisebb térerőnél következik be.
- Hőméréseket emelkedés, különösen **vastag rétegben**, nagy gőz és gáz nyomás mellett **elgőzölögteti az adszorbeált vizet**.
- Ez a nyomás olyan **nagy lehet**, hogy **kinyomja az olajt a papírszigetelés makro kapillárisaiból**.
- Ez két veszélyes helyzetet okoz: - Vízgőz **üregek keletkeznek (buborékok)** a szigetelés felületén, ezáltal csökken a villamos szilárdság és **de-impregnálja a menetszigetelést**.
- Ha a belsőnyomás növekedése nagyobb, mint az ellene ható erők hatása, a **vízgőz távozni fog a makro kapillárisból**.

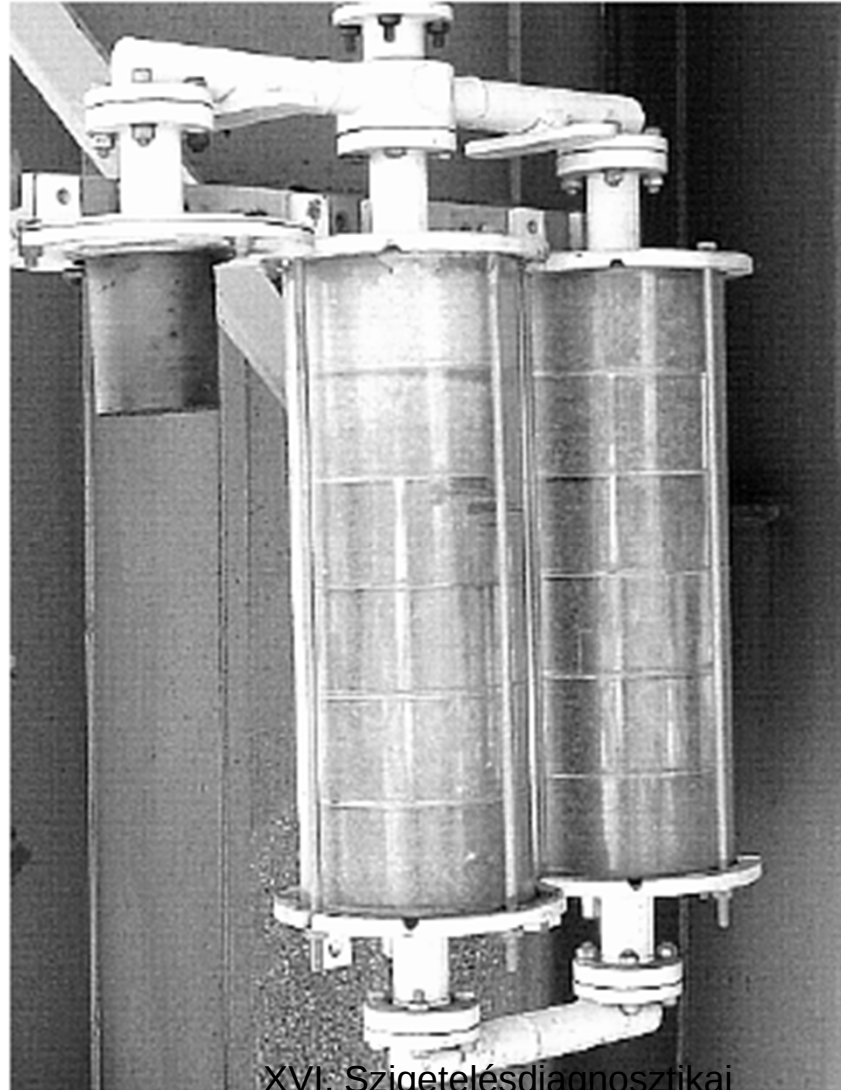


## **Transzformátor off-line olaj víztartalom mérés sajátosságai**

- A transzformátorolaj víztartalmának meghatározása hagyományos módszerrel az időszakos mintavételezés során végrehajtott Karl Fischer titrálási technika.
- Ha az olaj-papír szigetelési rendszer nedvességtartalom szempontjából adott hőmérsékleten egyensúlyban van, akkor az olajban lényegében csak oldott víz van jelen.
- A hőmérséklet növekedésével a papírból az olaj felé, ha csökken, akkor az olajból a papírszigetelés felé víz vándorol és az új hőmérsékletre jellemző egyensúlyi állapot áll be.
- Bizonyos mennyiségű víz azonban kémiai anyagokhoz, mint például oxidációs öregedési termékekhez kötődik.



## Légszárító információtartalma: két oldali elnedvesedés



XVI. Szigetelésdiagnosztikai  
Konferencia, Sümeg, 2016.  
október 19-21



A