

Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

Edward Gulski, Frank J. Wester
Delfti Műszaki Egyetem, Nagyfeszültségű Technológia & Menedzsment
Hollandia

A módszertan kifejlesztése az alábbi cégek közreműködésével történt:

Seitz Instruments AG, Switzerland
Heafely Test AG, Tettex Instruments Division, Switzerland
NUON InfraCore, The Netherlands

Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

TARTALOM

1. Általános szempontok
2. Gazdasági szabályok
3. Befolyásoló tényezők
4. Szigetelési állapot kiértékelésének szabályai
5. Következtetések

Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

TARTALOM

1. Általános szempontok

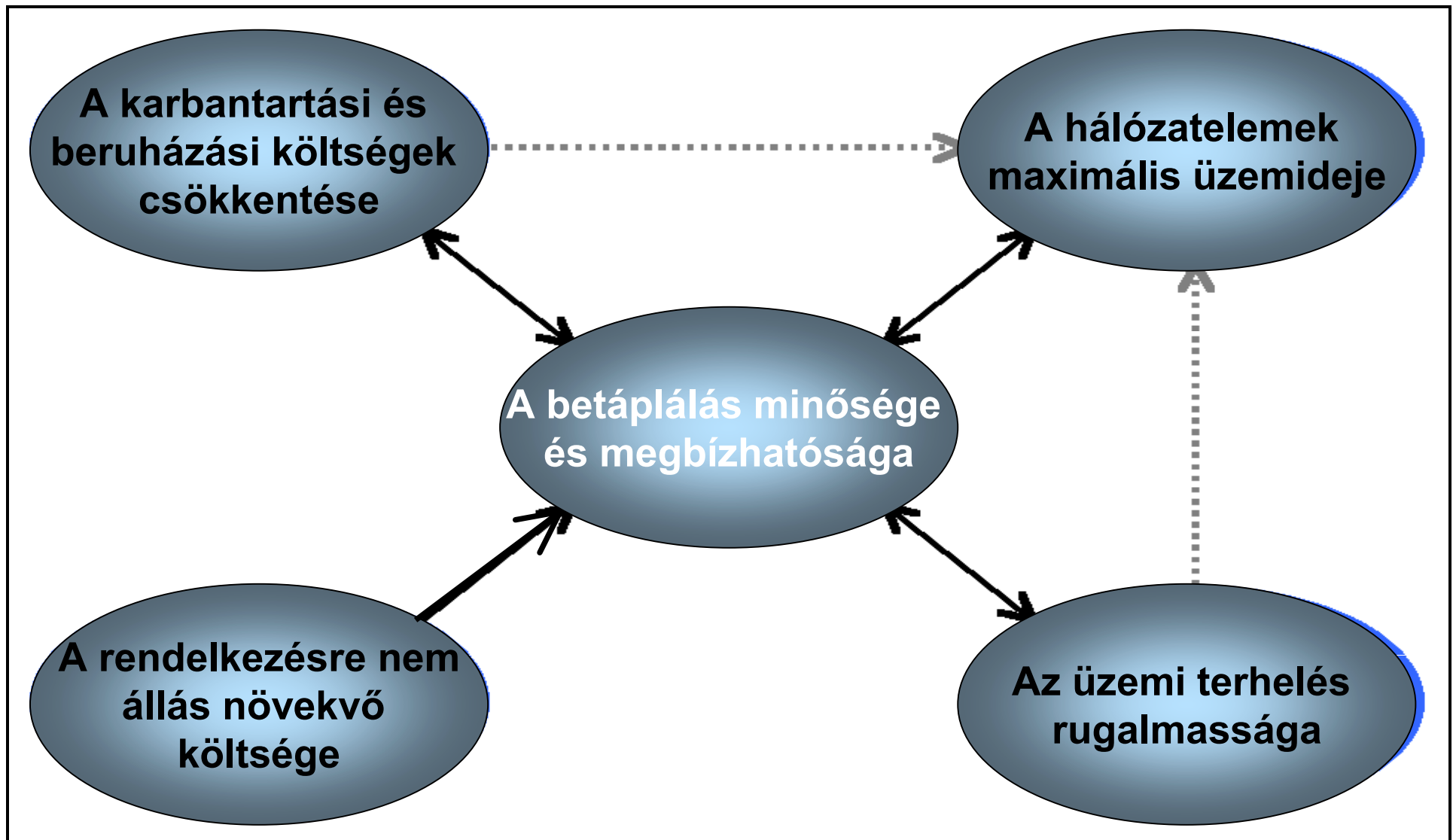
2. Gazdasági szabályok

3. Befolyásoló tényezők

4. Szigetelési állapot kiértékelésének szabályai

5. Következtetések

A liberalizáció hatása a villamosenergia piacon



“ Az energiaellátás zavara esetén 75 Gulden ”

Bij stroomuitval 75 gulden

Van onze redactie economie

DEN HAAG – Consumenten die in de toekomst getroffen worden door een urenlange stroomuitval, krijgen een schadevergoeding van 75 gulden. Dat heeft de toezichthouder op de energiesector, de DTe, gisteren laten weten.

De DTe heeft een regeling opgezet om klanten in geval van een ernstige storing door het

energiebedrijf te laten compenseren. Wanneer een storing langer dan vier uur duurt, moet het verantwoordelijke bedrijf ieder gedupeerd huishouden 75 gulden vergoeden.

De termijn van vier uur gaat in op het moment dat de eerste klant de storing meldt. De schadevergoeding wordt uitgekeerd via de energierekening. Deze compensatie staat los van eventuele aansprakelijkheidsclaims, aldus DTe.

‘A DTe, a holland energiahivatal, hozott egy intézkedést, hogy kompenzálja a fogyasztókat ért kárt a villamos hálózat súlyos meghibásodása esetén.

Abban az esetben, ha egy üzemzavar több, mint 4 órán át tart, a felelős áramszolgáltató 35,- Eurót köteles köteles fizetni minden érintett háztartásnak.

A 4 óra az első fogyasztói bejelentéskor indul.

Fogyasztói kompenzáció több, mint 4 órás villamos üzemzavar esetén.

Csatlakozási pont	Fogyasztó típusa	Kompenzáció
$U < 1\text{kV}$	Háztartás	EUR 35,-
$1\text{kV} \leq U < 25\text{kV}$	Kisipar	EUR 900,-
$U \geq 25\text{kV}$	Nagyipar	EUR 90.000,-

Bár, ez a kompenzáció független a lehetséges kártalanítási követelésektől és szintén nem vonatkozik a hálózat karbantartásában elkövetett bizonyítható hanyagság esetére!

The Netherlands

“ A szállodának elege van az áramszünetekből ”

“ Az amszterdami Krasnopolsky luxushotel jogi lépéseket fontolgat a Nuon áramszolgáltatóval szemben.

Ez az a szálloda, ahol a 2002. február 2-án rendezendő királyi esküvő ideje alatt minden királyi vendég tartózkodni fog és ahol a legutóbbi 6 hónapban kétszer is volt egyórás áramszünet.

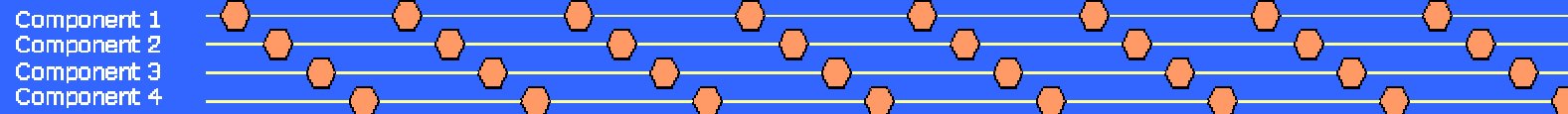
Most, az áramszünet idején egy konferencia 300 résztvevője és 500 vendég tartózkodott a szállodában.

A Nuon kijelentette, hogy nem kell számítani problémára az esküvő ideje alatt a rendelkezésre álló további készenléti áramforrások jóvoltából.

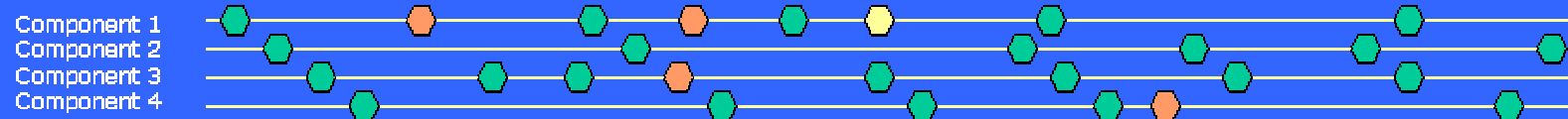


Onderhoud Aan Componenten Van Hetzelfde Type

Time based maintenance



Condition based maintenance



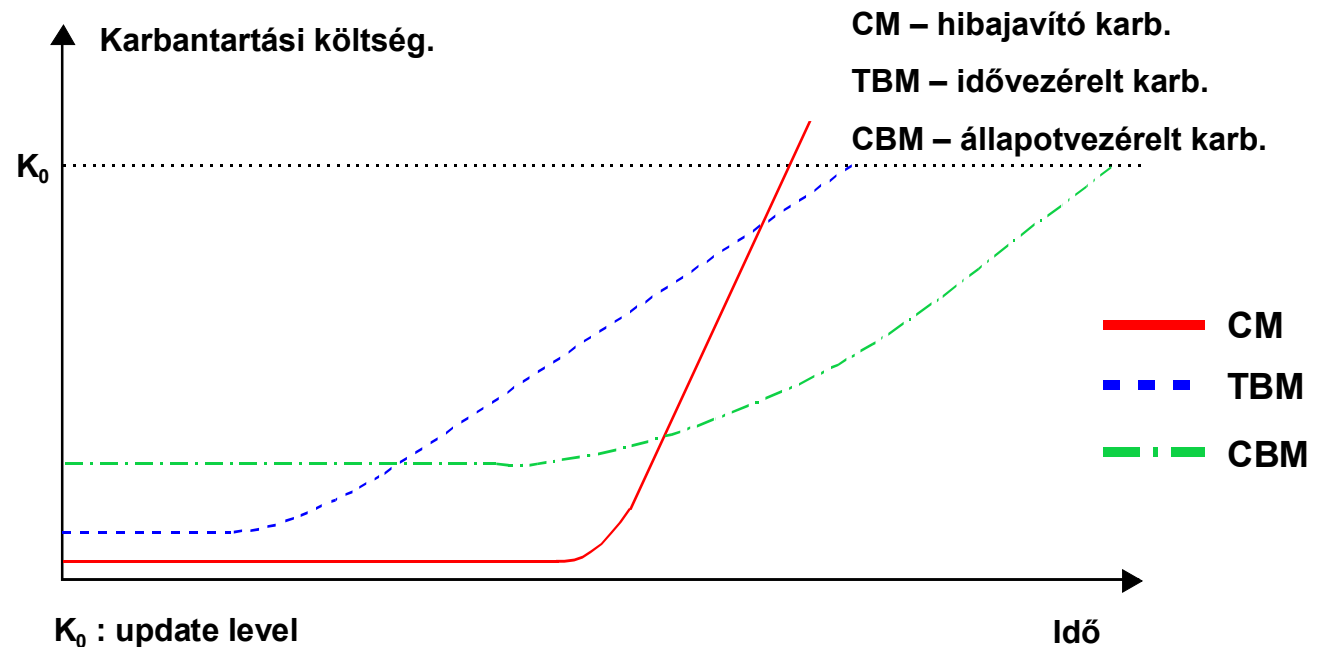
Corrective maintenance



- ◆ Inspectie / meten
- ◆ Onderhoud
- ◆ Onderhoud en Inspectie
- ◆ Falen

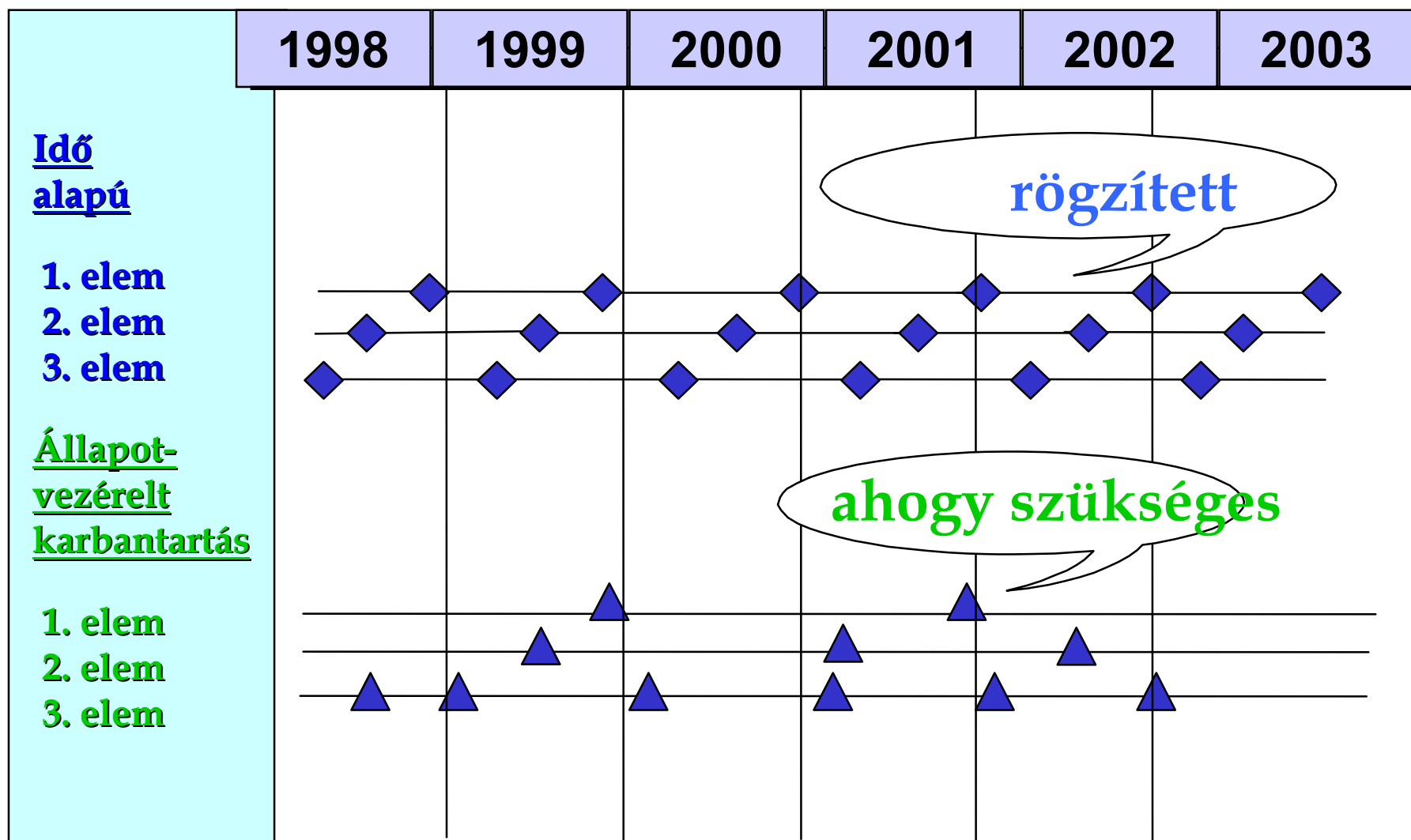
t →

Karbantartás



- Liberalizált piac
 - költségcsökkentés
 - rendelkezésre állás
 - a kártalanítási kötelezettség tudata
- Trendek
 - karbantartás ha szükséges: a megtakarításokat a CBM vezérli
 - az élettartam kihasználása/felkészülés az öregedésre
 - szakértelem igénybevétele; dokumentáció IT által
 - csökkenő meghibásodások megelőzően vagy a koncepció fejlesztése

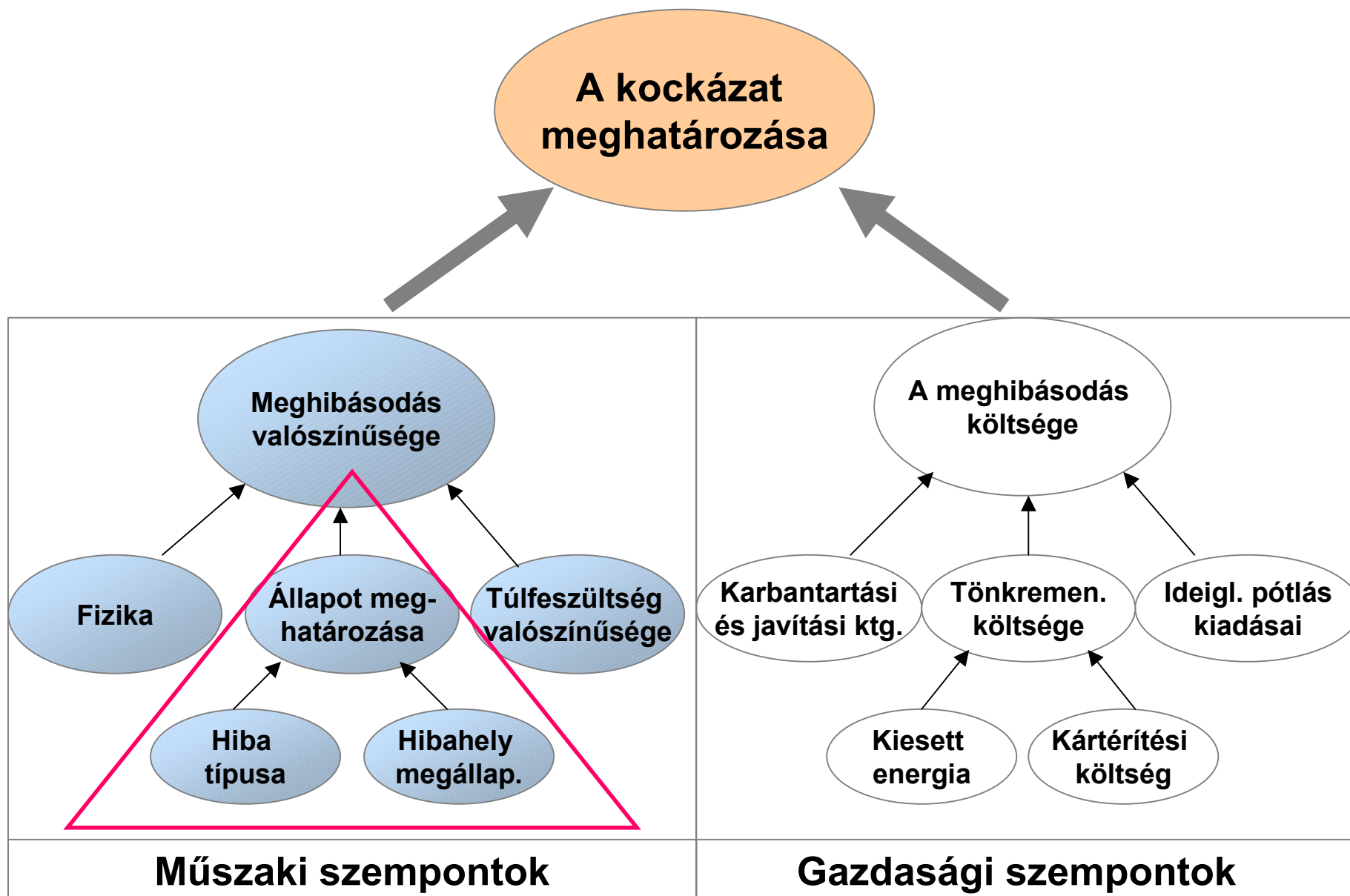
CBM : az intelligens szemlélet



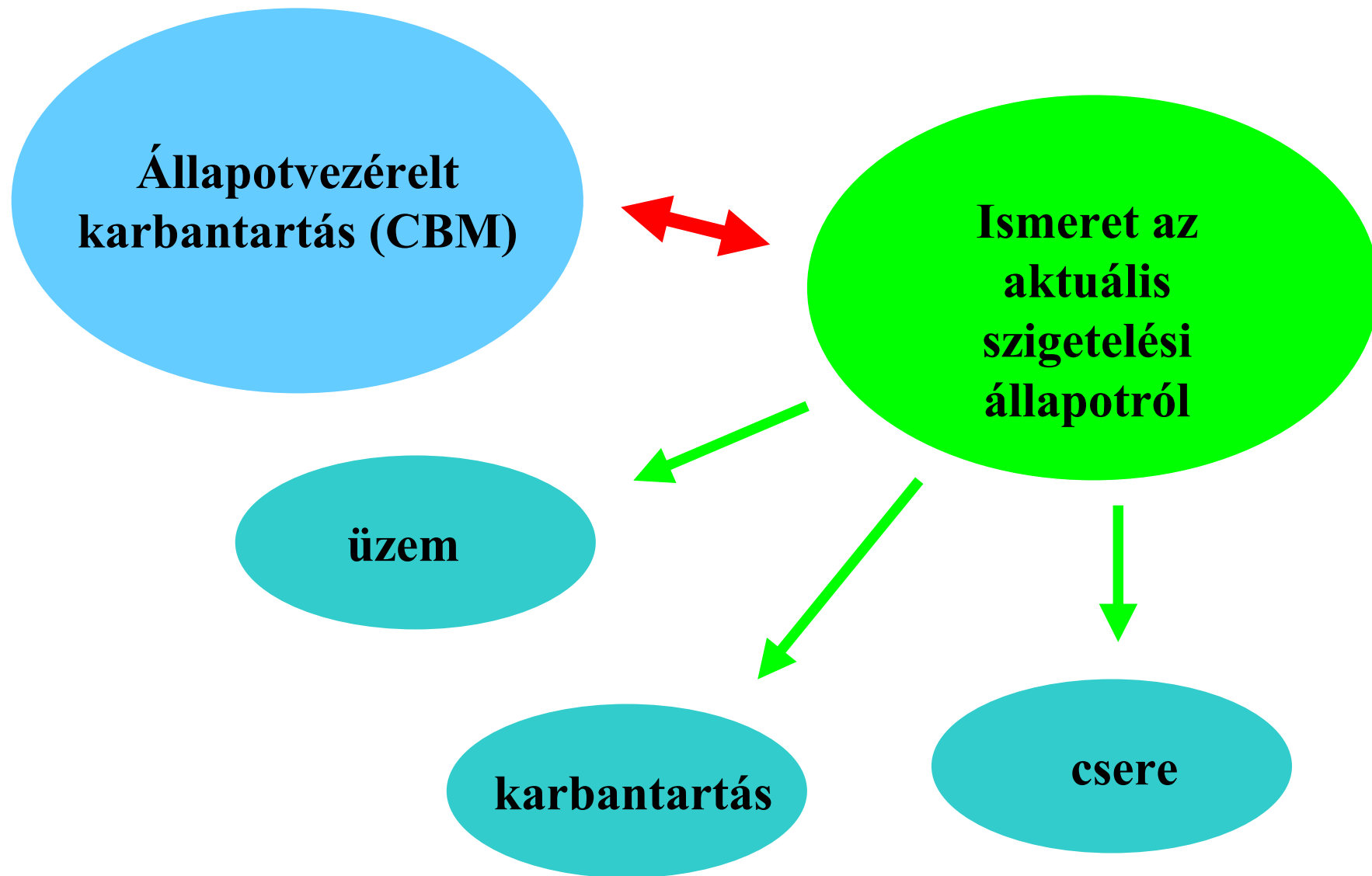
Példa:

	Megelőzött kábelhiba	Nem megelőzött kábelhiba
Javítás	2 500 \$	3 750 \$
Diagnosztika	1 750 \$	0 \$
Kiesés költsége	0 \$	5 000 \$
Teljes költség	4 250 \$	8 750 \$

Lit: B.J. GROTENHUIS 1996



Állapotvezérelt karbantartás (CBM)



Állapotvezérelt karbantartás bevezetésének fontos szempontjai

1. A megelőző karbantartáshoz használt fejlett diagnosztika gazdaságossága;
2. Diagnosztika használata az üzemben lévő kábelek szigetelési állapotának meghatározásához, pl. részleges kisülések;
3. Részleges kisülések: kisülést termelő sérülések, öregedési folyamatok és a meghibásodások típusai;
4. A részleges kisülés értelmezési szabályok meghatározása az áll.vez. karb. támogatására;
5. Adatbáziselemzés alkalmazása az aktuális szigetelési állapot megállapítására;

Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

TARTALOM

1. Általános szempontok

2. Gazdasági szabályok

3. Befolyásoló tényezők

4. Szigetelési állapot kiértékelésének szabályai

5. Következtetések

Gazdaságosság: a hibajavító- az állapotvezérelt karbantartással szemben

Meghibásodás esetén fellépő költségek összehasonlítása a CBM költségeivel a felismert hibák százalékanak függvényében

Meghibásodás költsége:

$$C_{meghib.} = P_{meghib.} * T_{meghib.} * C_{NSzE} + K_{javítás}$$

$$C_{NSzE/háztartás} = \text{EUR } 1,-/kWh ; \quad C_{NSzE/üzem} = \text{EUR } 10,-/kWh ;$$
$$C_{javítás} \sim \text{EUR } 7.000,- \text{ (+lehetséges kapcsolókészülék karbantartás)}$$

CBM költségek:

$$C_{CBM}(F_{hiba}) = \left(\frac{C_{kapcsolás} + C_{mérés} + C_{mber.}}{F_{hiba}} \right) + C_{korrekció}$$

Gazdaságosság: CBM költségek

$$C_{\text{kapcsolás}} = 2 * C_{\text{mérnök}} * T_{\text{kapcsolás}}$$

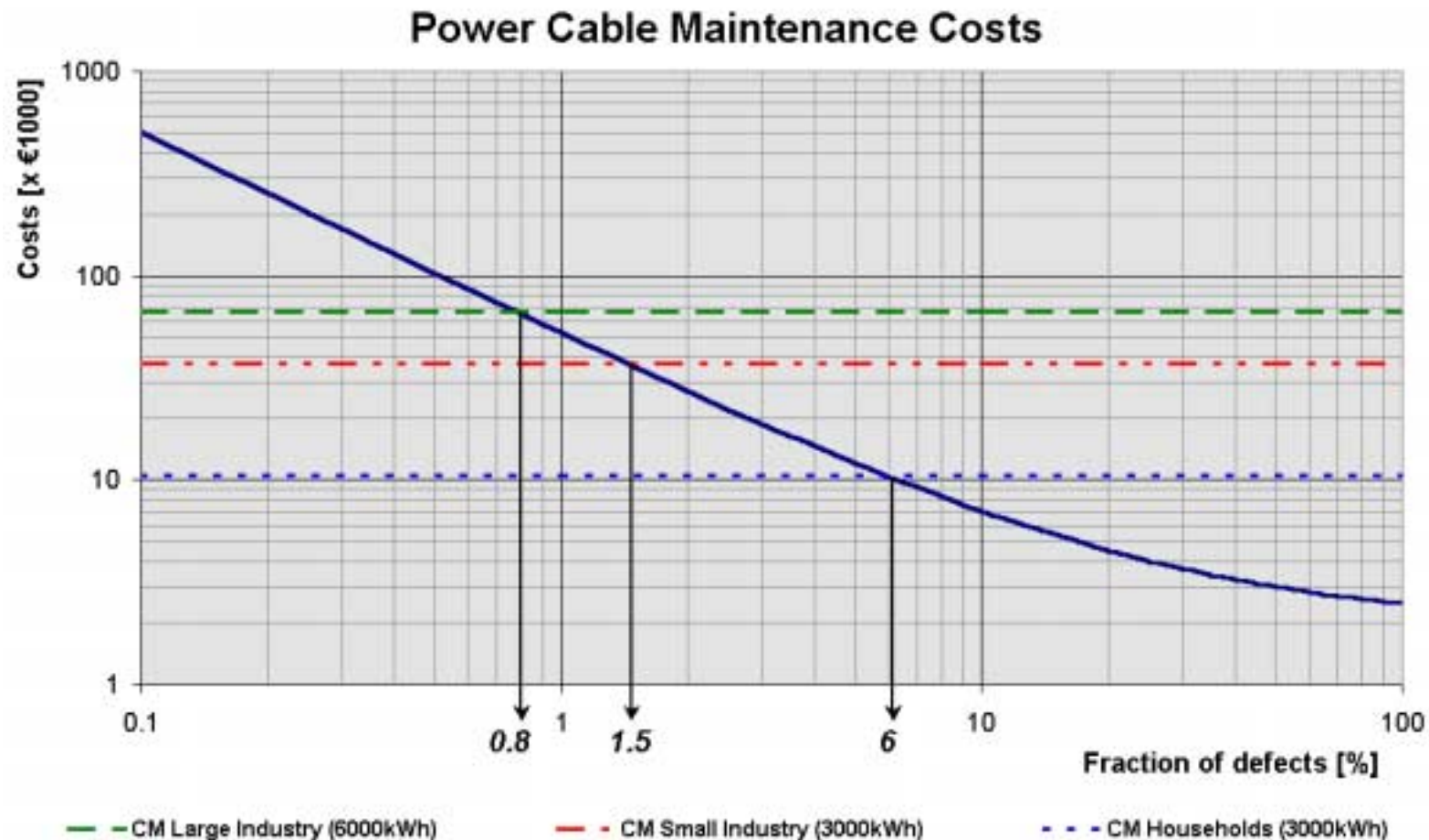
$$C_{\text{mber}} = \frac{C_{\text{újber}}}{T_{\text{write-off}}} * \frac{T_{\text{mérés}}}{T_{\text{használat}} / \text{év}}$$

$$C_{\text{mérés}} = C_{\text{mérnök}} * T_{\text{mérés}}$$

Kábelszakasz vizsgálati költsége

$C_{\text{emberóra}}$	EUR 70,-
$T_{\text{kapcsolás}}$	2 óra
$T_{\text{mérés}}$	4 óra
$C_{\text{vásárlás}}$	EUR 6.5000
$T_{\text{amortizáció}}$	5 év
$N_{\text{mérés/év}}$	150,-
$C_{\text{javítás}}$	EUR 7.000
$C_{\text{korrekció}}$	EUR 2.000

Az off-line diagnosztikára alapozott CBM költségei a diagnosztikai eszközök hatékonyságának a függvényében. A hibajavító karb. (CM) költségeit a három fogyasztói nagyság szerint mutatjuk be. A metszéspontok a 100 vizsgált kábelenkénti detektálható hibák számát tükrözik.



Feltételezések:

- 1. A közép feszültségű kábelhálózatokon bekövetkező üzemzavarok 50 %-a szigetelési problémák következménye**
- 2. 1 üzemzavar 3000 kWh kiesést jelent**
- 3. 1 kWh kiesése 15 USD költséget okoz**

Például:

**5% üzemzavar megelőzése 100 üzemzavar/év esetén
112 500 USD hasznot hoz**

$$5\% \times 100 \text{ üzemzavar/év} \times 50\% \times 3000 \text{ kWh} \times 15\$ = 112\,500\$$$

Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

TARTALOM

1. Általános szempontok

2. Gazdasági szabályok

3. Befolyásoló tényezők

4. Szigetelési állapot kiértékelésének szabályai

5. Következtetések

Diagnosztika $\Leftrightarrow$ Rendszerhiba $\Leftrightarrow$ Élettartam becslés

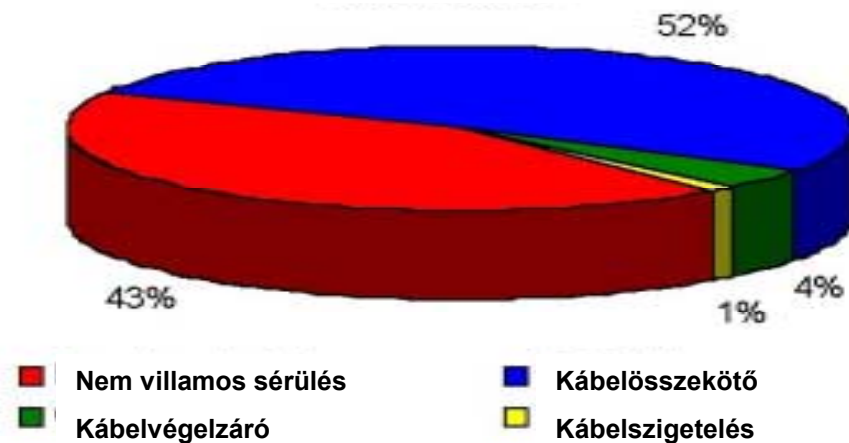
1. A diagnosztikai mérések fő célja, hogy következtetésekre jussunk a lehetséges hibák komolyságáról és helyéről vagy potenciális meghibásodási lehetőségekről, a mért információkra alapozva.
2. A komolyság foka mindig a következő kérdéssel függ össze: *“Ez a részegység hamarosan meghibásodik-e és ez mikor fog megtörténni?”*
3. Eddig nem volt lehetséges a diagnosztikai információkat felhasználva pontosan megbecsülni a maradék élettartamot.

A részleges kisülés értelmezési szabályok alkotásának folyamata az állapotvezérelt karbantartás támogatására

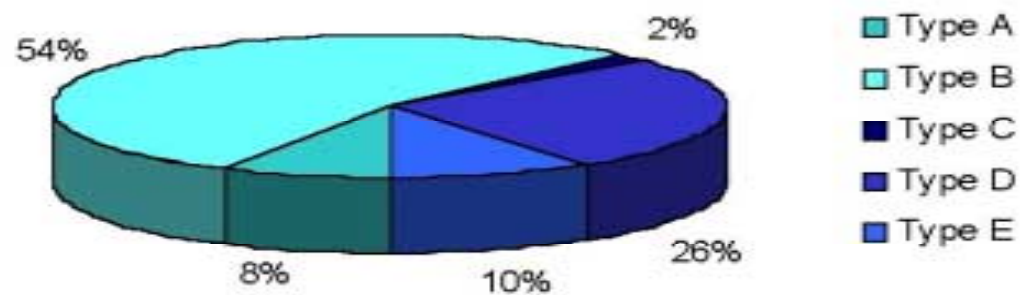


Példa a kábelhibák okainak statisztikai felosztására

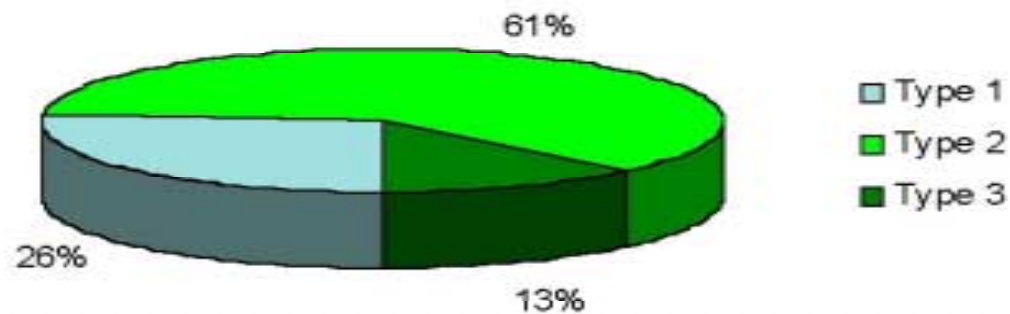
Kábel meghibásodások



Kábelösszekötők meghibásodása



Kábelvégelzárók meghibásodása

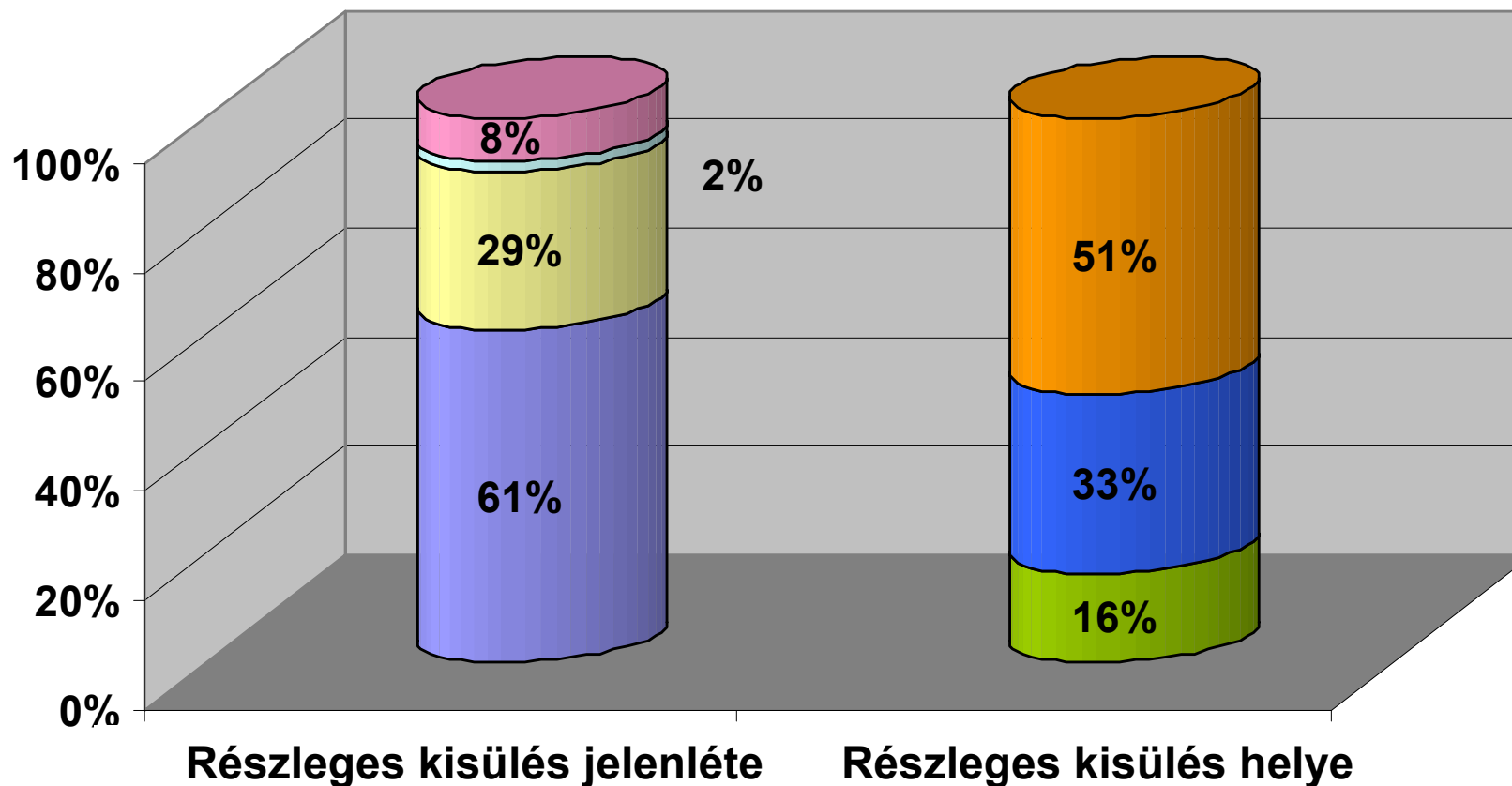


Végelzárók

Összekötők

- 1-es típus (olajjal töltött)
 - alacsony olajsztint;
 - éles sarkok az érintkezőn;
- 2-es típus (massza)
 - éles sarkok az érintkezőn;
- 3-as típus (műanyag)
 - éles sarkok az érintkezőn.
- A típus (olajjal töltött)
 - alacsony olajsztint;
 - éles sarkok az érintkezőn;
- B típus (epoxigyantával töltött)
 - nedvesség behatolása;
 - éles sarkok az érintkezőn;
- C típus (olajjal, epoxival töltött)
 - nedvesség behatolása;
 - éles sarkok;
 - alacsony olajsztint;
- D típus (olajjal töltött, üvegszálal)
 - légbuborékok;
 - alacsony olajsztint;
- E típus (műgyanta töltésű)
 - gázbuborékok;
 - éles sarkok;
 - rosszul keményedett műgyanta.

Részleges kisülés aktivitás olajpapiros szigetelésben



■ Részl. kisülések (PD) U_0 -on

■ Ismeretlen ok

■ PD forrás összekötőben

■ PD $1,3 * U_0$ -on

■ PD forrás a kábelszig.ben

■ PD nagyobb fesz.-en

■ PD forrás a végelzáróban

Tipikus hibaokok elemzése

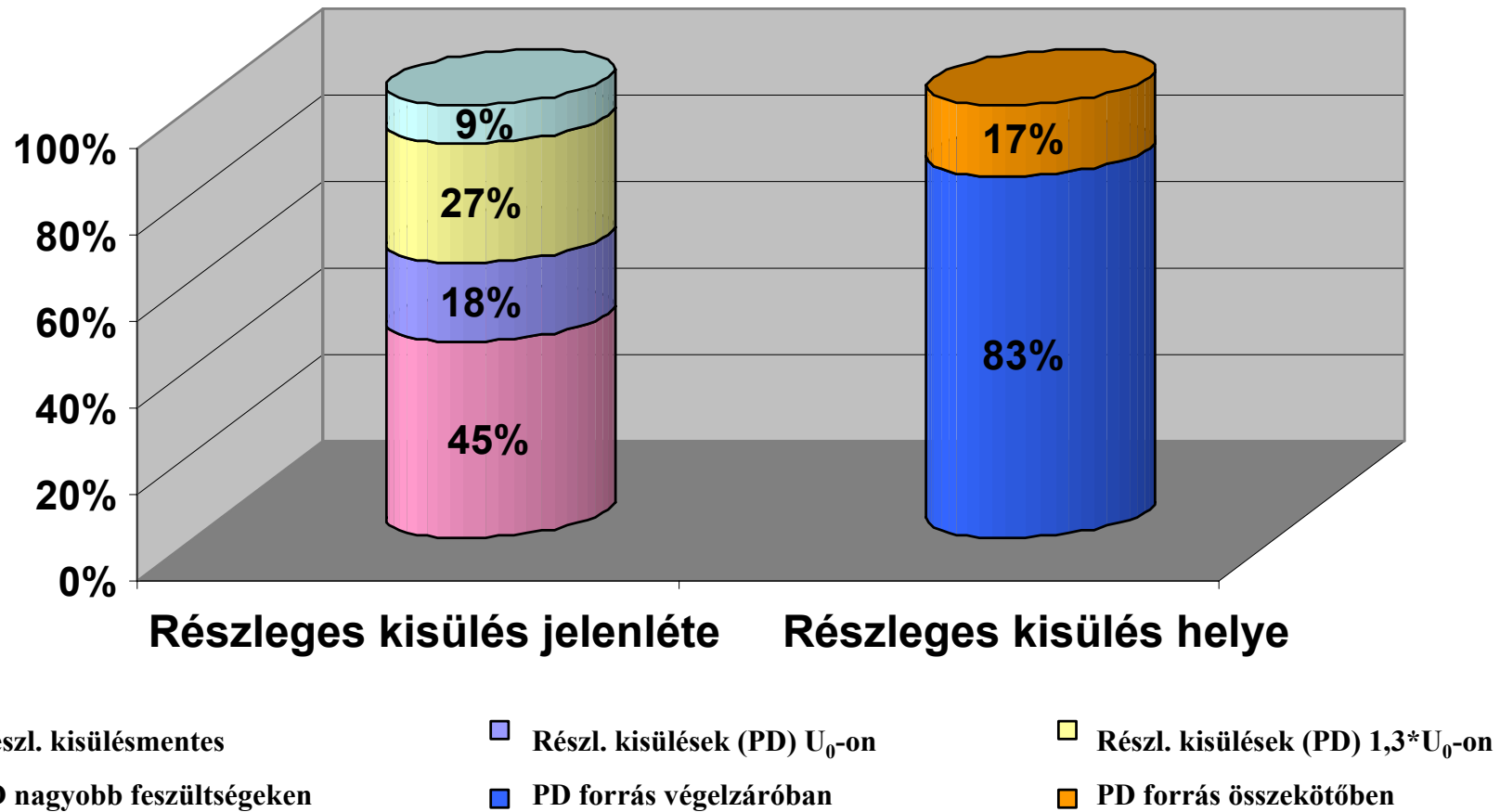
Összekötők és végelezárók:

- Éles sarkok a vezetőn (minden típus);
- Nedvesség behatolás (minden típus);
- Lég-/gázbuborékok (Kabeldon);
- Rosszul megkeményedett műgyanta (TECE);
- Potenciálvez. réteg elmozdulása (ABB)
- Cstalakozási problémák: rések, kiszögellések, stb. (ABB);

Kábelszigetelés:

- Sérült külső árnyékolás;

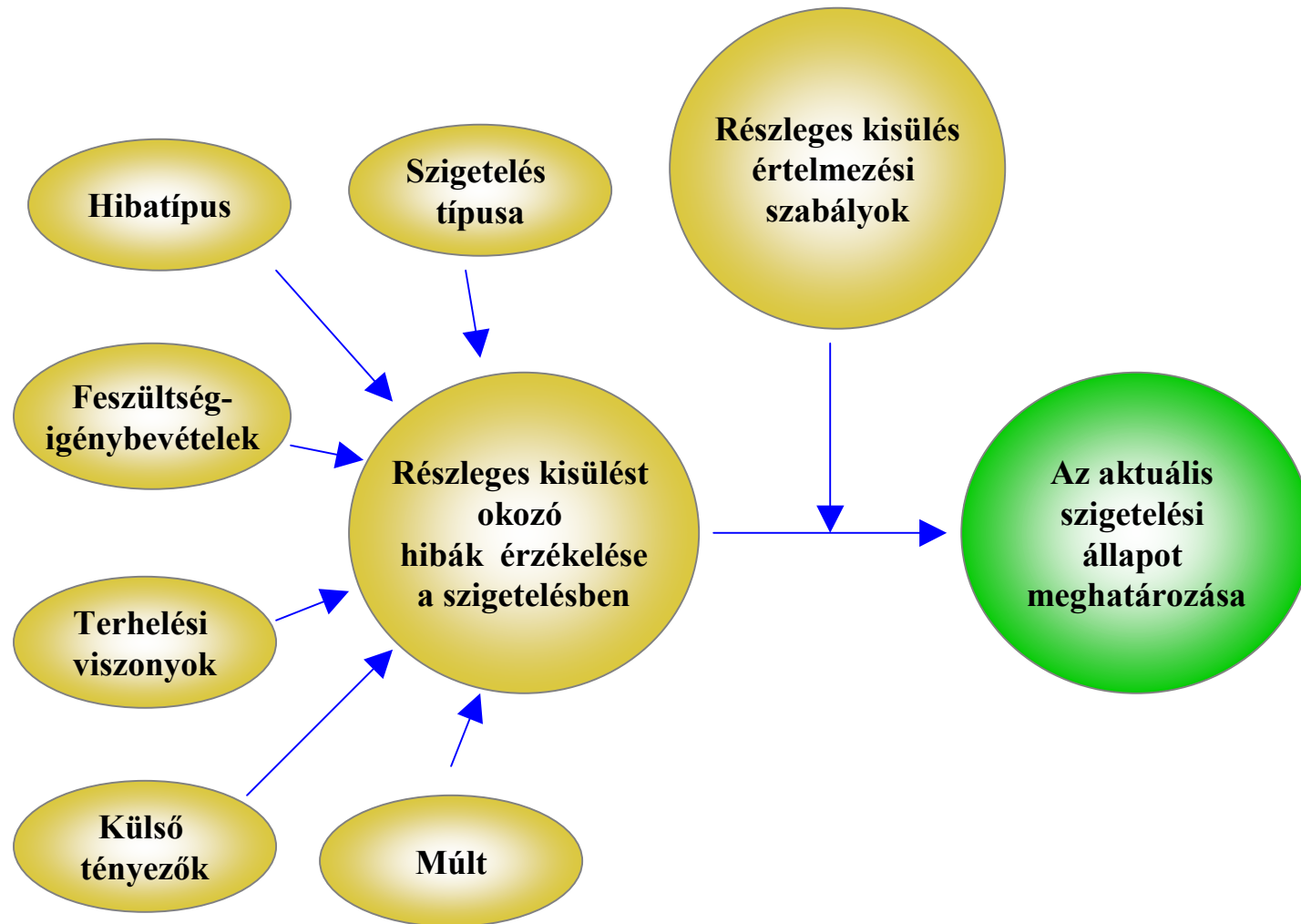
Részleges kisülés aktivitás XLPE szigetelésben



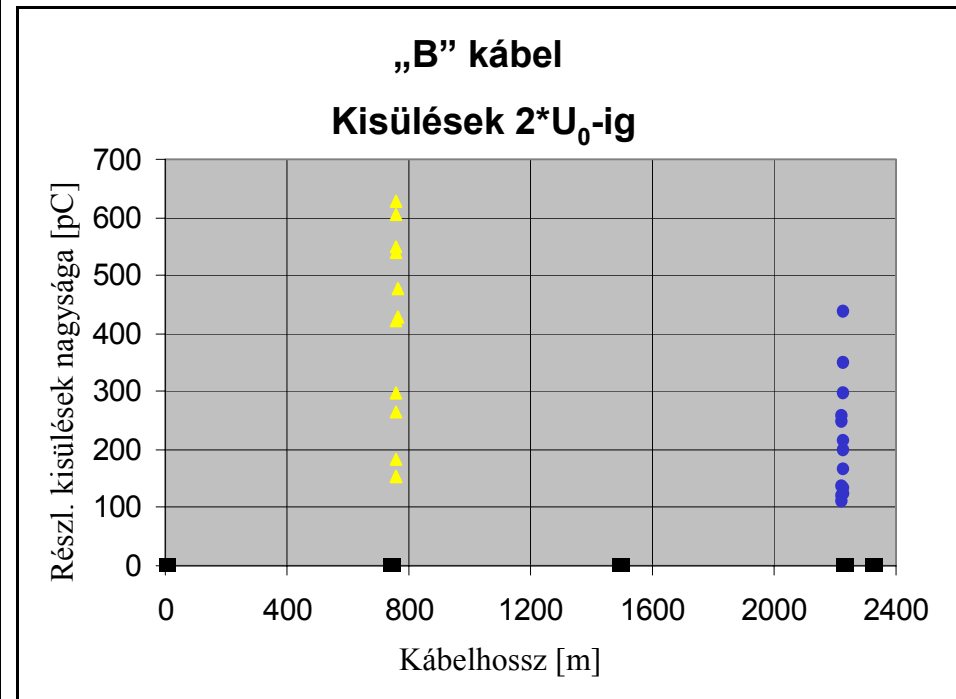
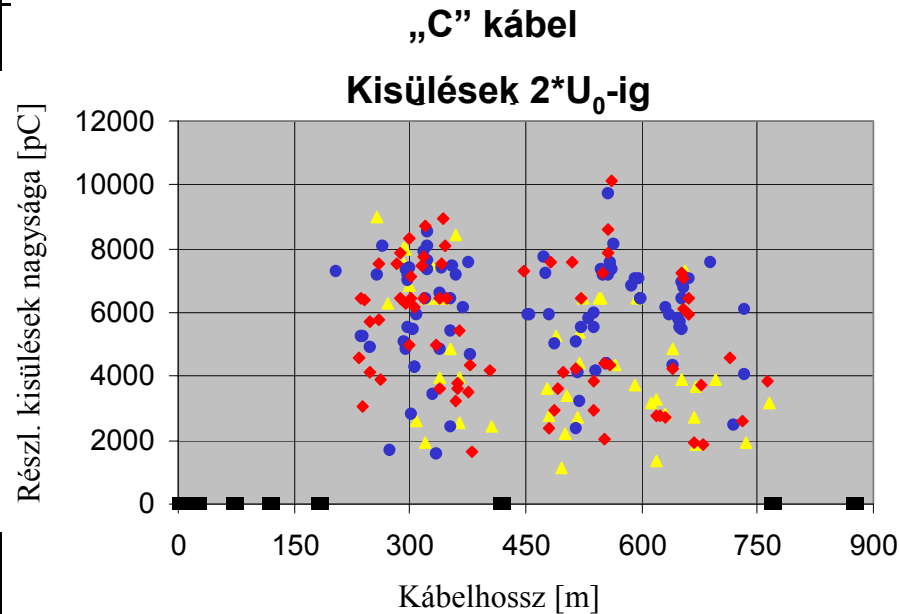
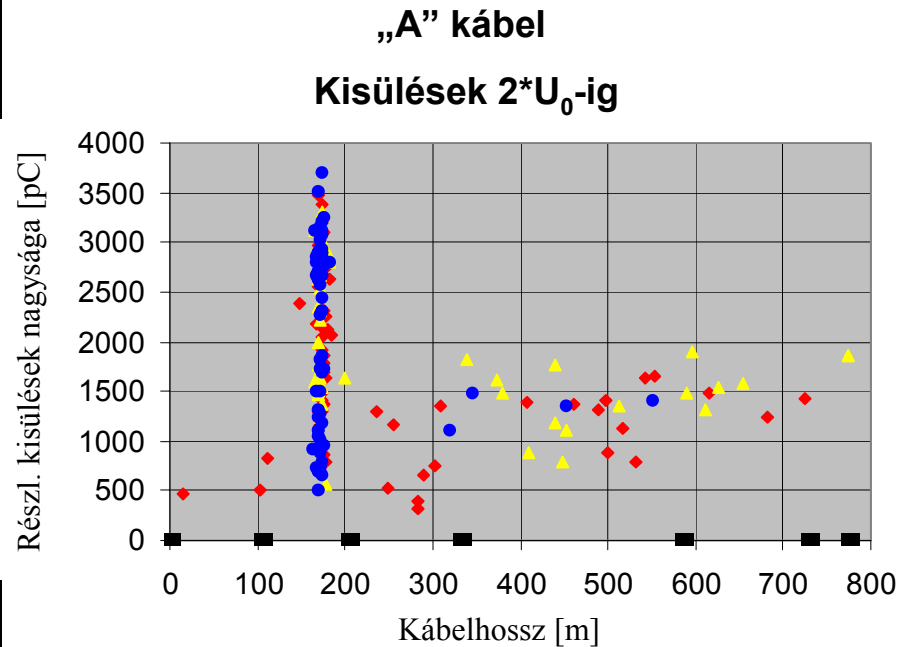
Hibaokok elemzése kábelvégelzáróban



Kapcsolat az üzemi körülményeket leíró tényezők, a hiba érzékelése, az értelmezési szabályok és az állapotértékelés között az állapotvezérelt karbantartás támogatására



A befolyásoló tényezők elemzése; A kábelrendszer típusa



Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

TARTALOM

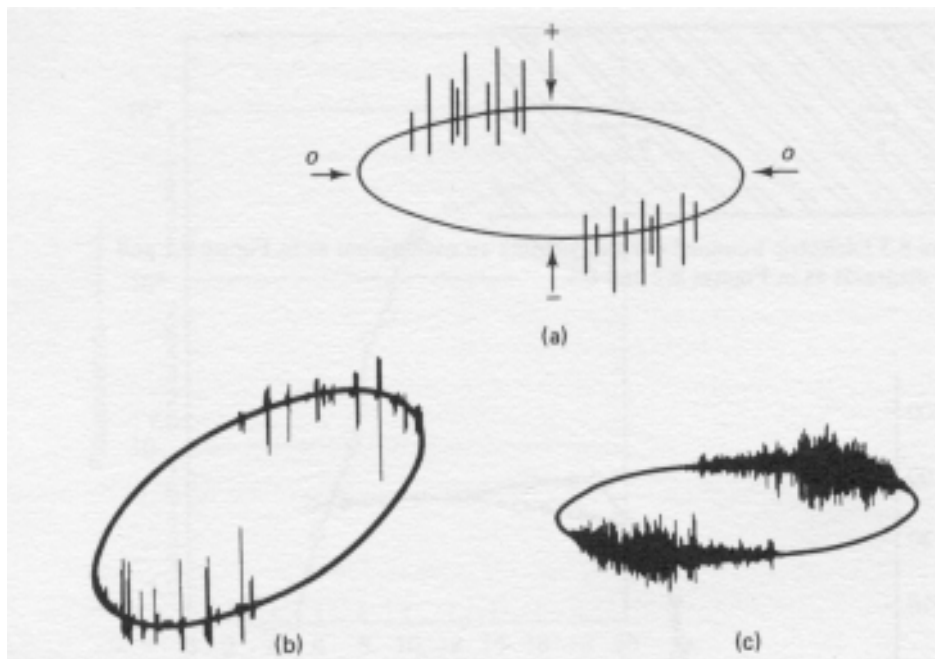
1. Általános szempontok

2. Gazdasági szabályok

3. Befolyásoló tényezők

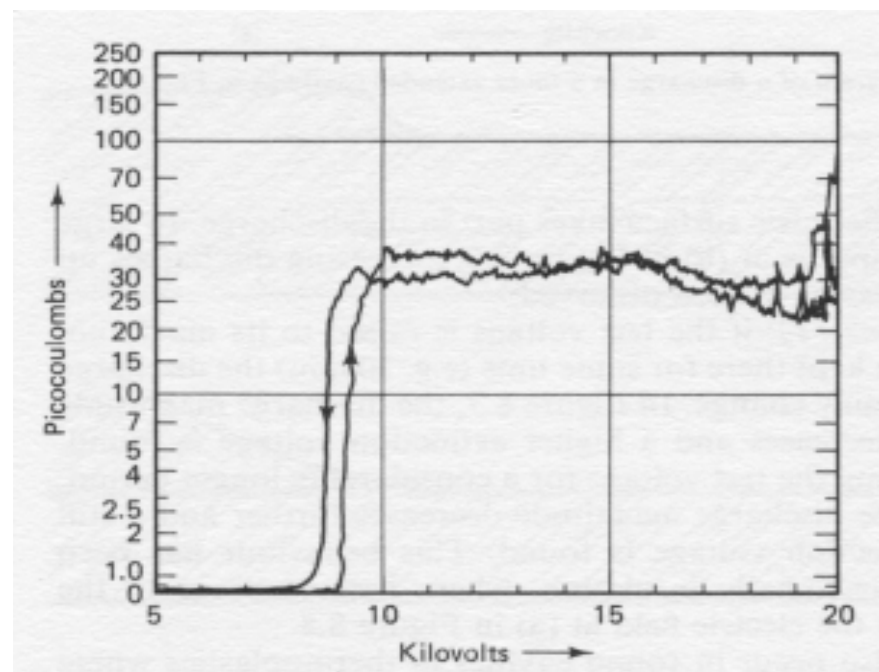
4. Szigetelési állapot kiértékelésének szabályai

5. Következtetések

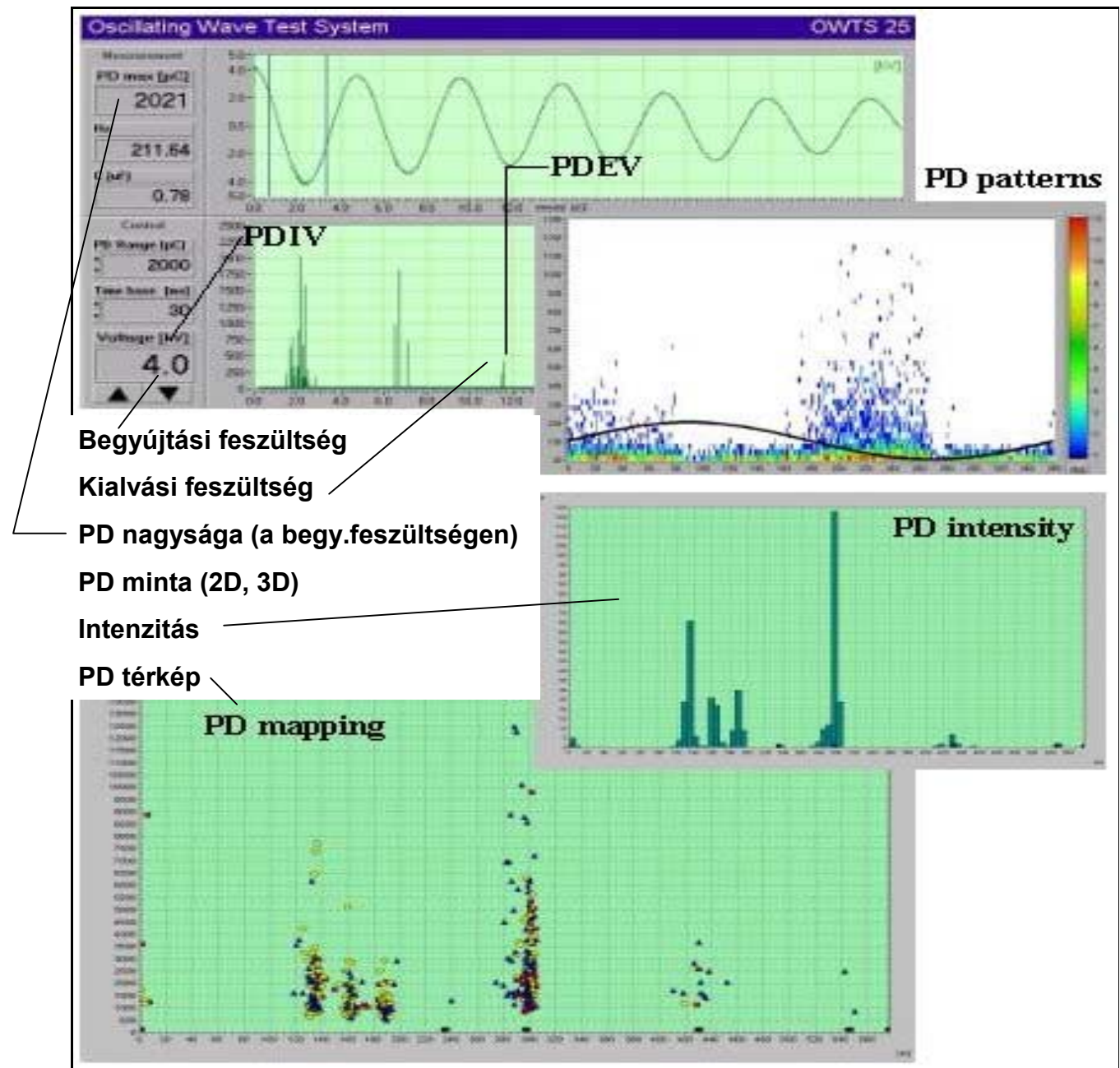


[Forrás: CIGRE 1961]

A részleges kisülések igen érzékenyen jelzik a szigetelési problémákat.

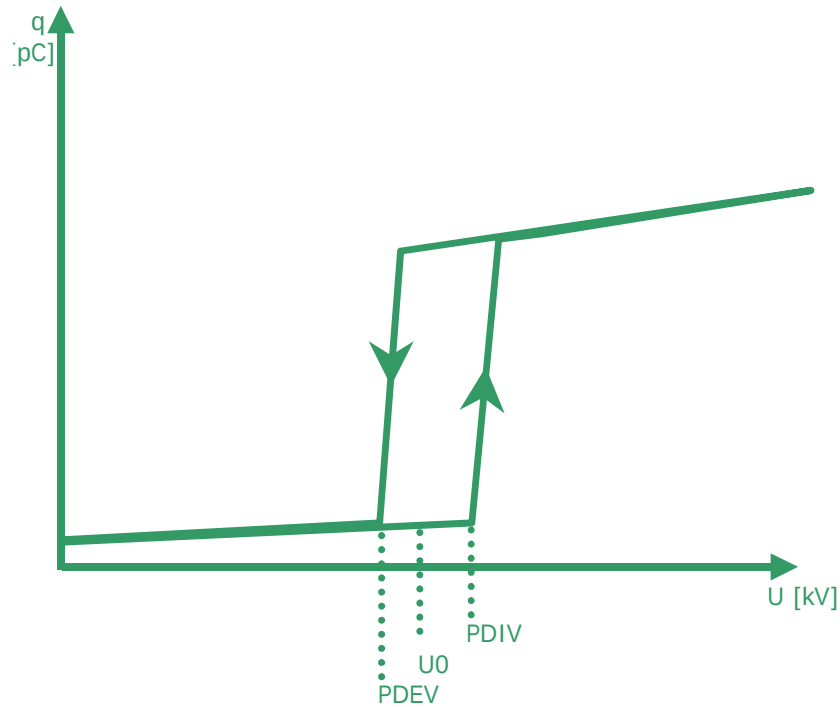


OWTS ujjenyomat

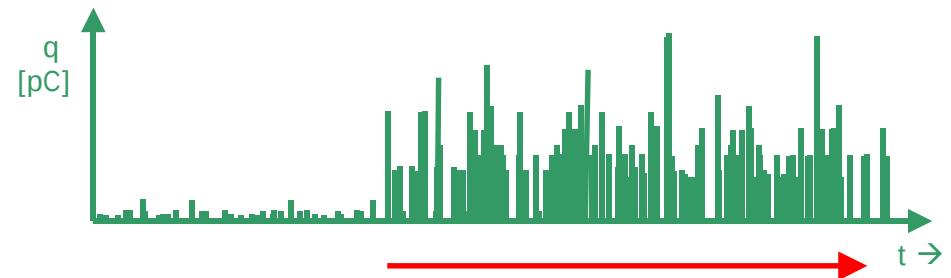
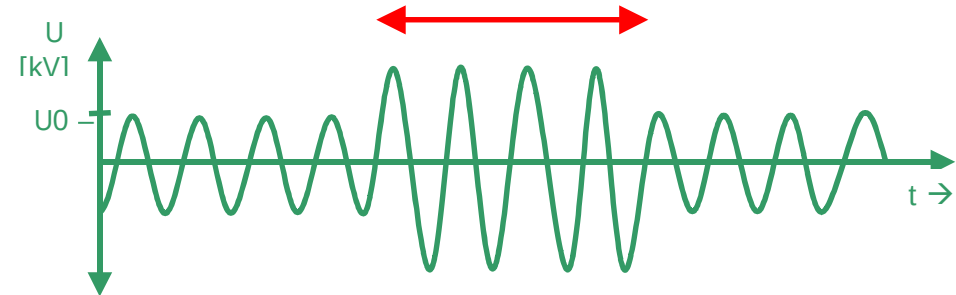


OWTS módszer értelmezési szabályok		
Begyűjtési & kialvási feszültség	<i>> üzemi feszültség</i>	<i>< üzemi feszültség</i>
PD nagysága	<i>< tipikus értékek (p.l. < 4000 pC)</i>	<i>> tipikus értékek (p.l. > 4000 pC)</i>
PD intenzitása	<i>alacsony (p.l. < 5 impulzus/periódus)</i>	<i>magas (e.g. > 5 impulzus/periódus)</i>
PD pattern	<i>káros hibafajta</i>	<i>kevésbé káros hibafajta</i>
PD helye	<i>kábelszigetelés</i>	<i>kábelszerelvény</i>
PD térkép	<i>PD koncentráció</i>	<i>elszórt részleges kisülések</i>

Az elemzést befolyásoló tényezők; üzemi túlterhelések



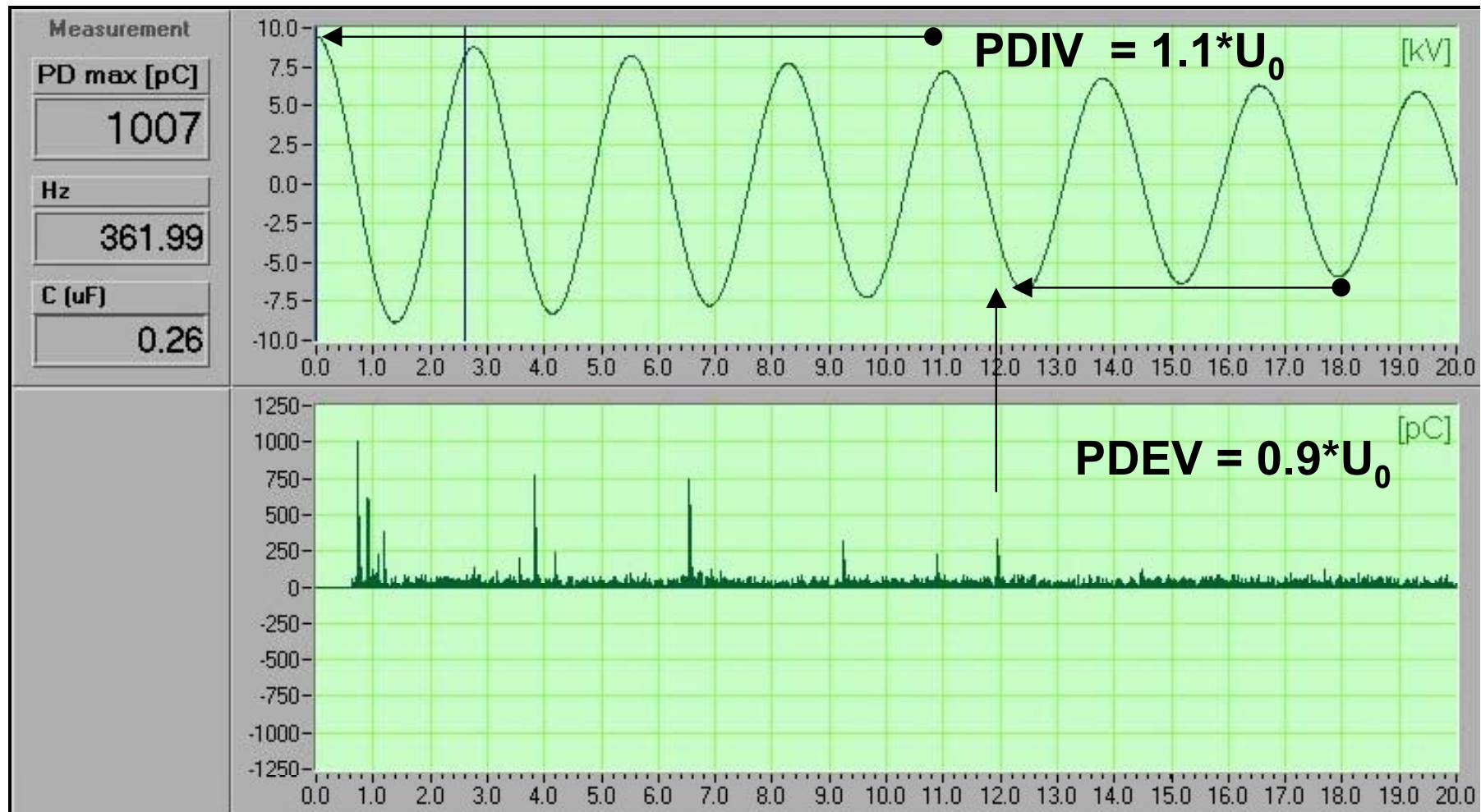
Ideiglenes túlterhelés



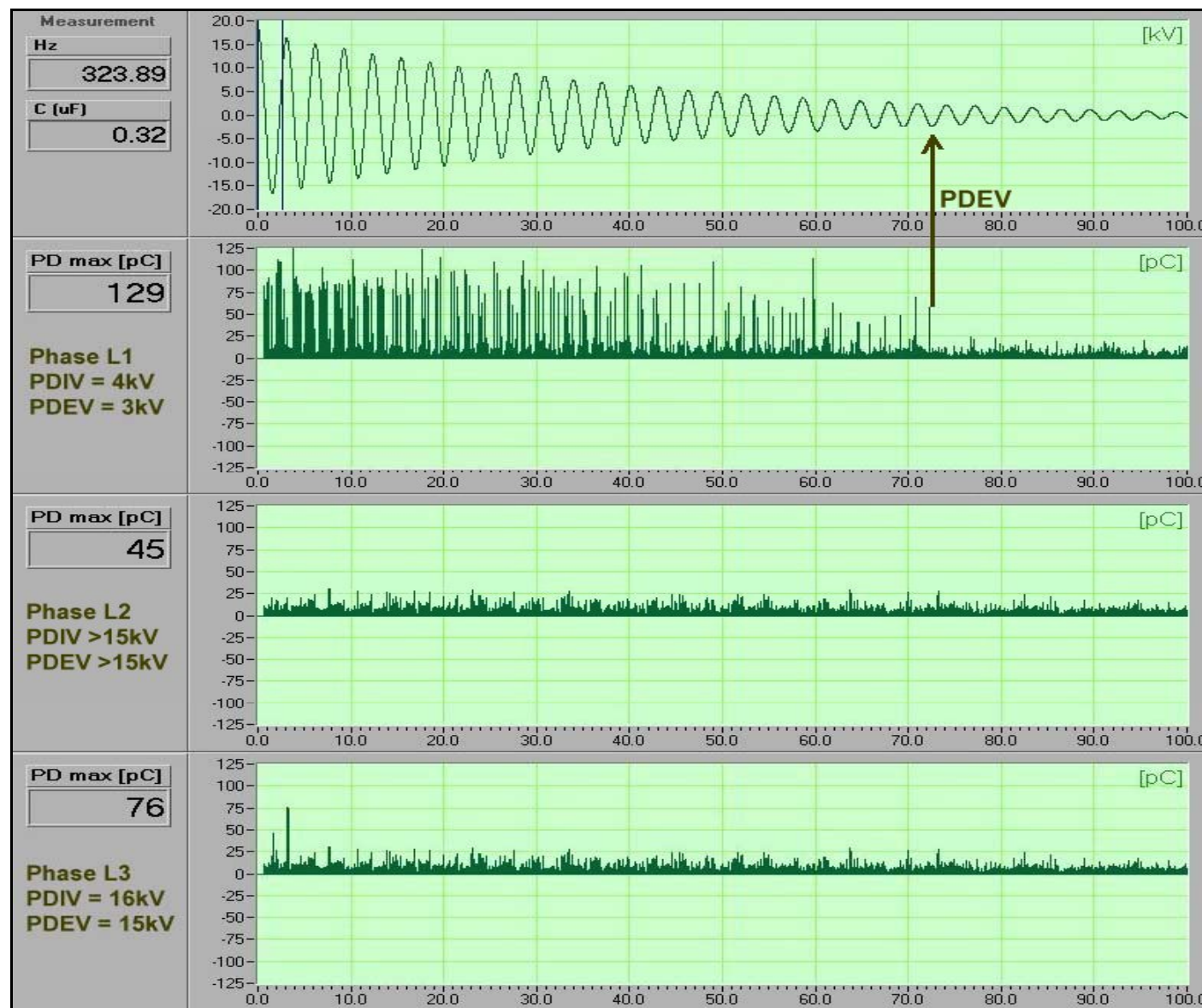
PD begyűjtása

Részleges kisülés mérési eredmény, ahol

A begy. fesz. (PDIV) = $1.1 U_0$ és a kialv. fesz. (PDEV) = $0.9 U_0$.



PD vizsgálati eredmények (662 m, 10 kV-os kábel). L1 fázis részleges kisülés forrás jelenlétét mutatja.

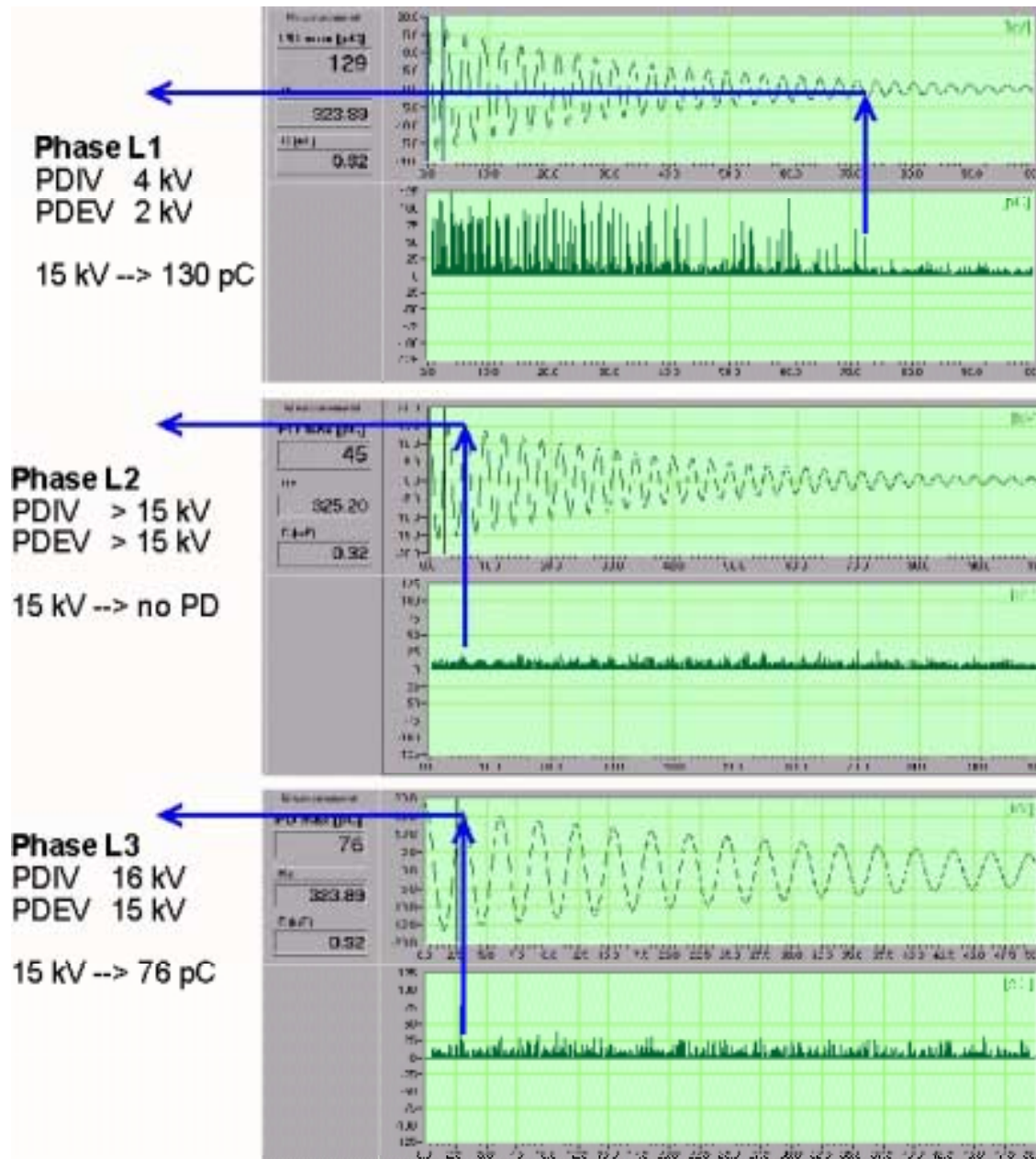
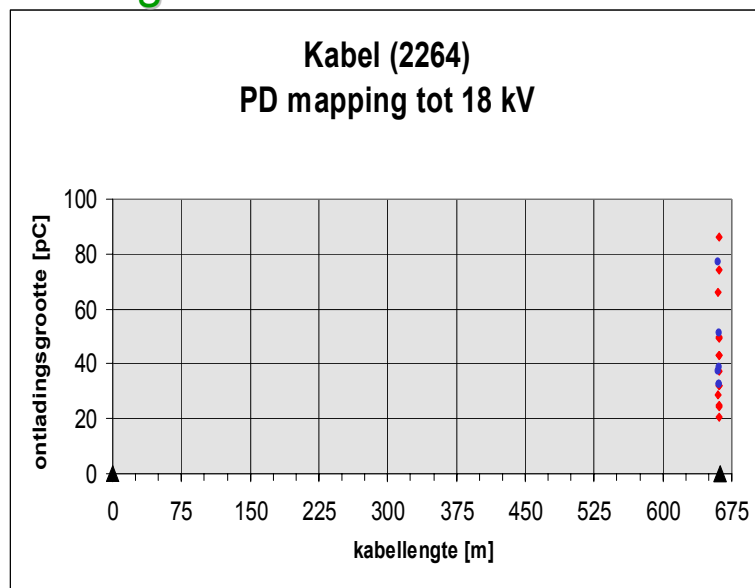


Fektetés utáni vizsgálatok

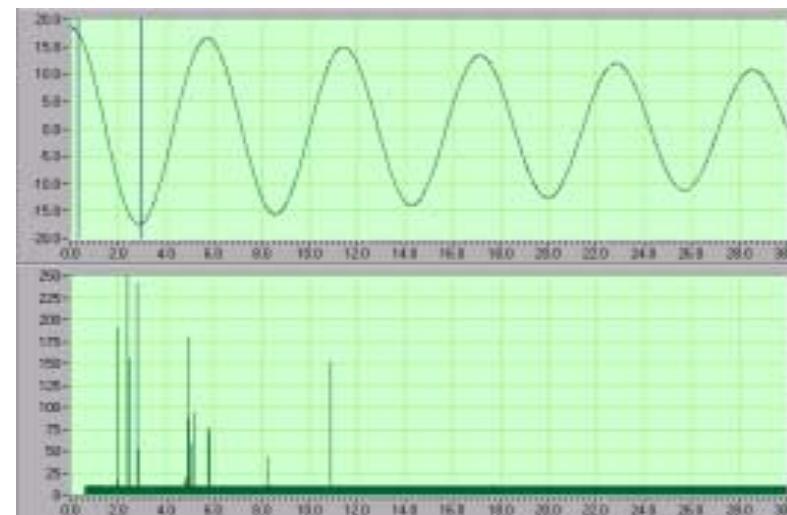
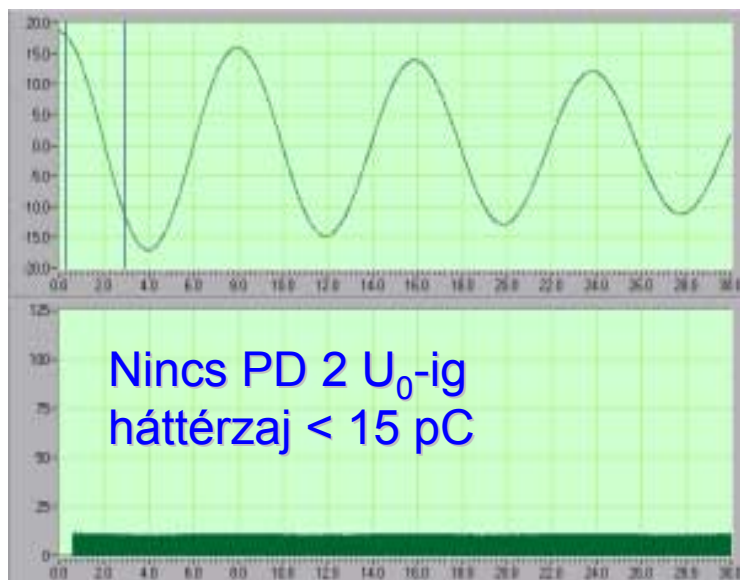
Kábel: 6 kV XLPE

Hossz: 662m

L1 fázis: részl. kisülések egy nagy, lapos üregből a végelzáróban



Fektetés utáni vizsgálatok

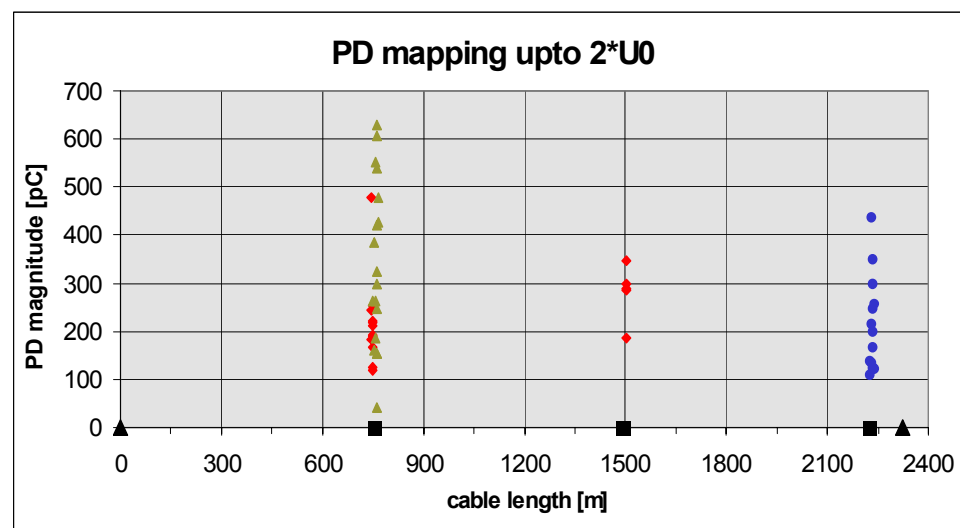


L1: 480pC; PDIV = $2.6 U_0$; PDEV = $2.3 U_0$

L2: 600pC; PDIV = $2.5 U_0$; PDEV = $2 U_0$

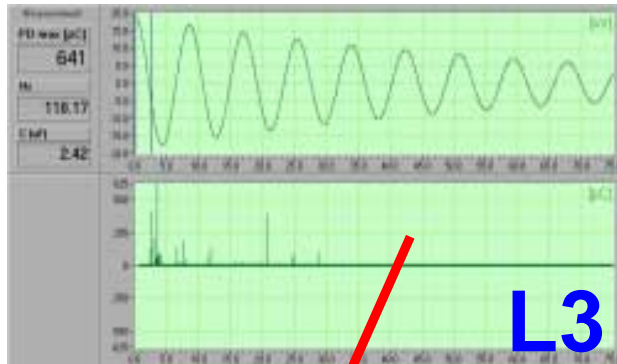
L3: 440pC; PDIV = $2.6 U_0$; PDEV = $2 U_0$

Kábel: 6 kV XLPE
Hossz: 2322m



Részl. kis. elemzése és lokációja több, kisüléseket termelő hely esetén

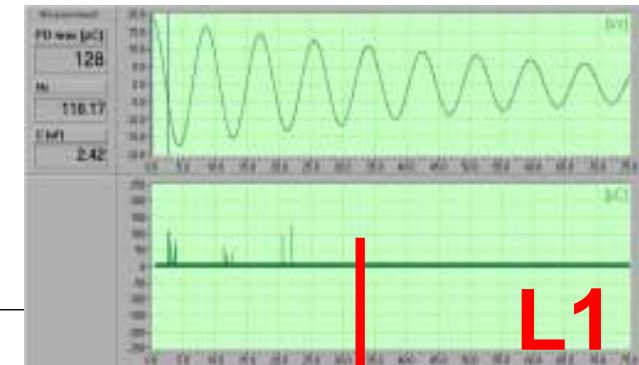
PDIV=15kV PDEV=11kV
15kV -> 50pC 18kV -> 100pC



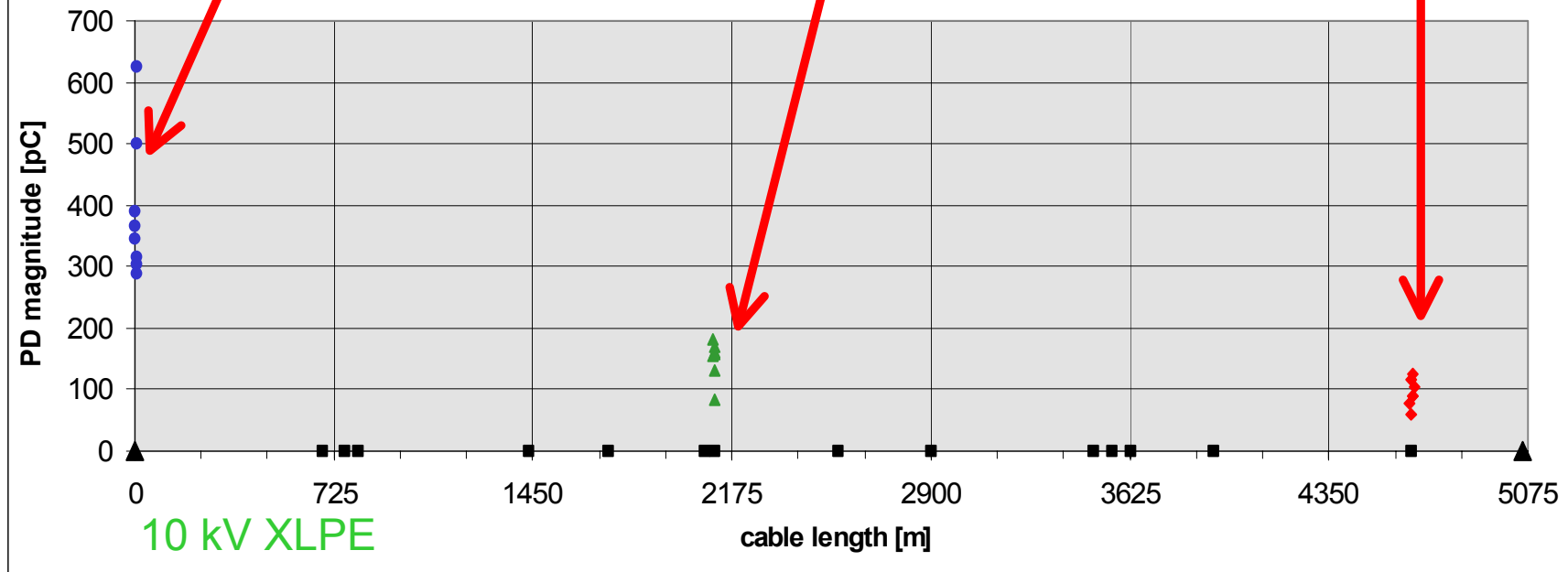
PDIV=6kV PDEV=10kV
6kV -> 200pC 18kV -> 200pC



PDIV=12kV PDEV=12kV
12kV -> 220pC 18kV -> 800pC

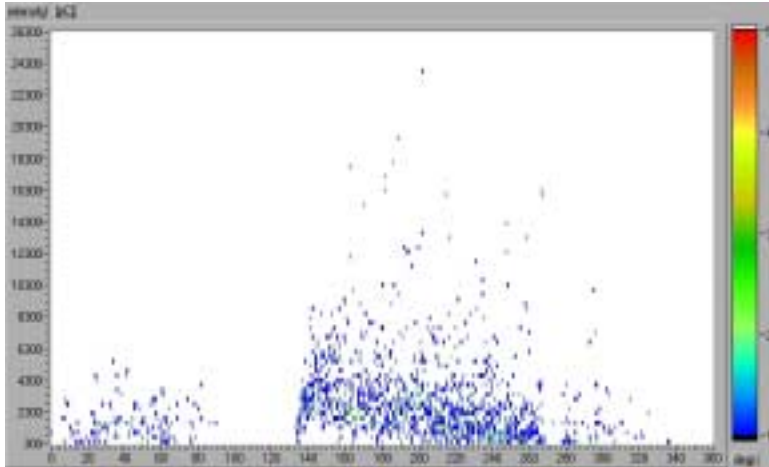


PD mapping upto 18 kV

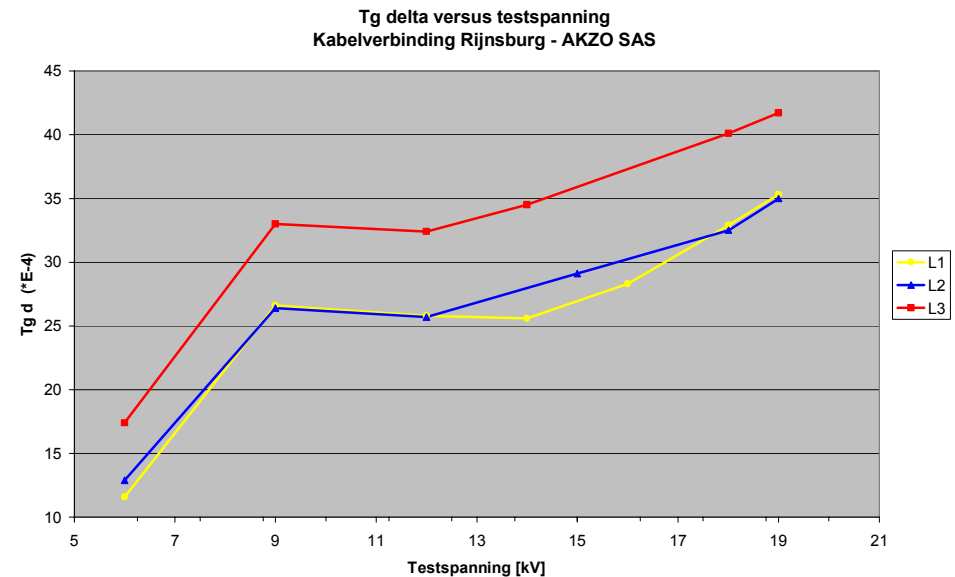
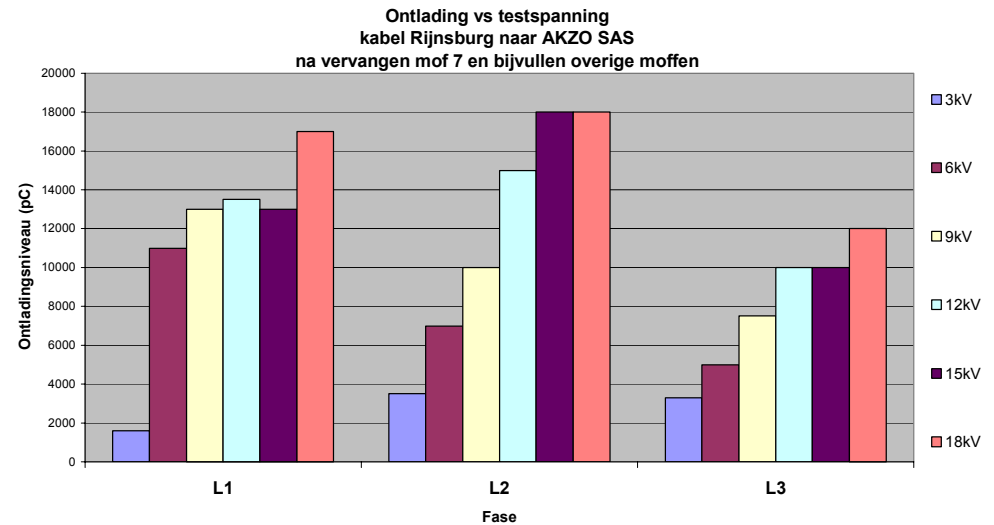


Állapotértékelés (1)

10 kV olajpapiros kábel; 3200m



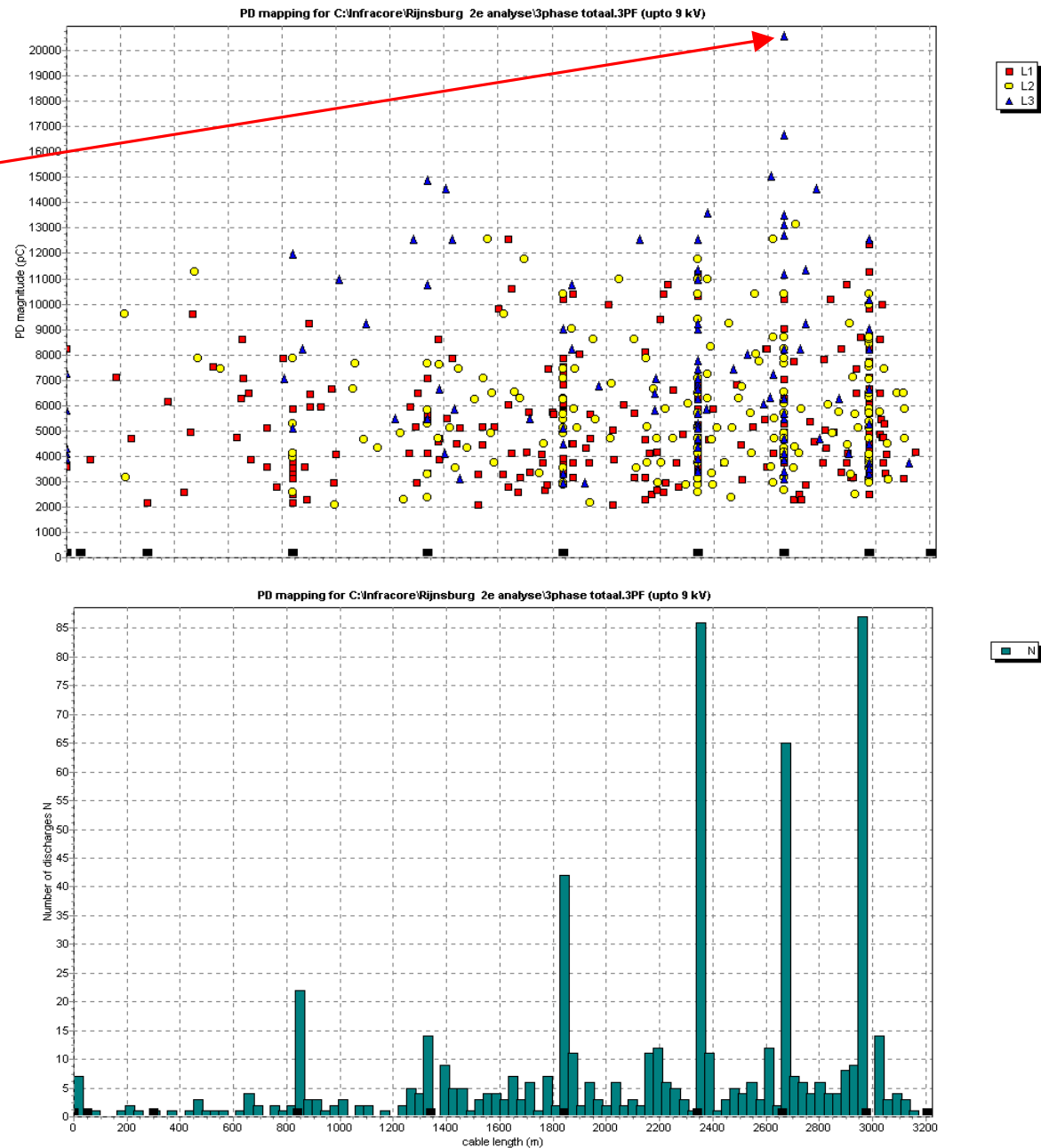
- 1) L1, L2, L3 ninc lényeges különbség;
- 2) nagy, kisülést termelő rés(ek) a szigetelési felületeken;
- 3) Hiba a külső árnyékolás és a nagyfeszültségű szigetelés között;
- 4) Nincs lényeges öregedés az alacsony tan δ értékből következtethetően



Állapotértékelés (2)

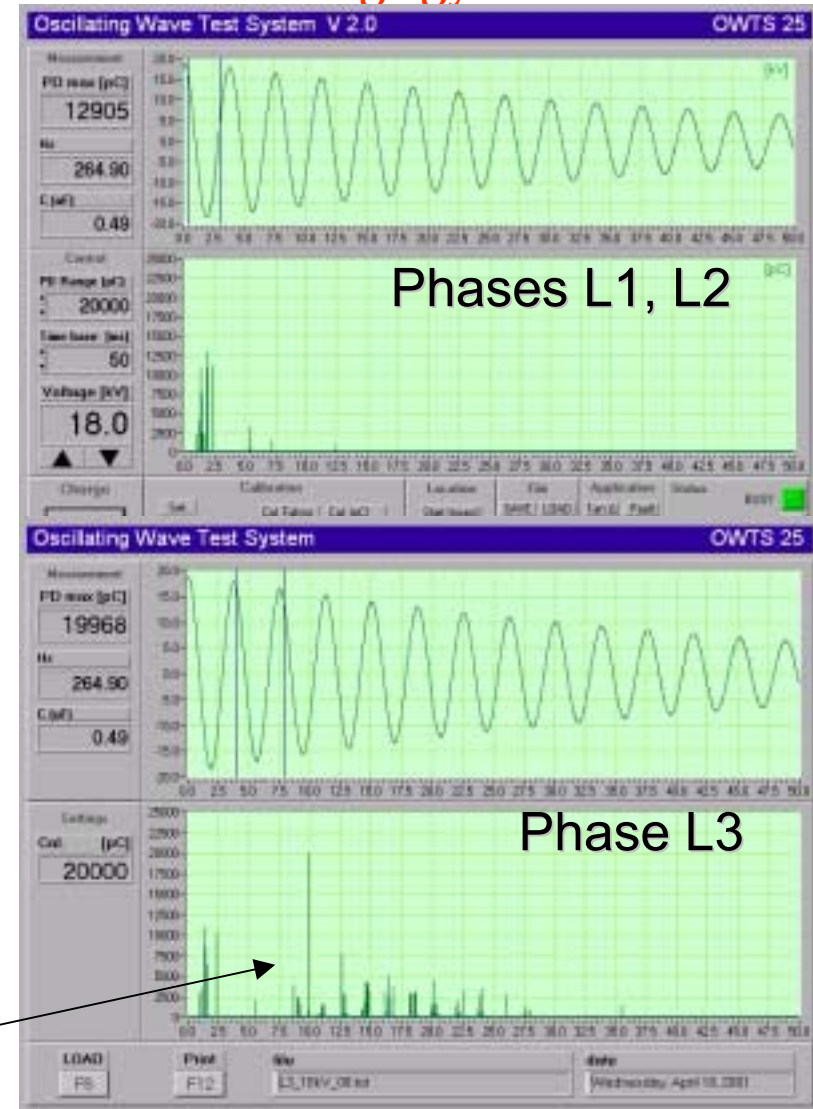
7. sz. összekötő

Hiba: Magas részleges
kisülés koncentráció
olajjal töltött
összekötőkben egy 3200
m, 10 kV-os olajpapiros
kábelen;



A magas részleges kisülés koncentráció miatt az üzemből kivett 7. sz. összekötő laboratóriumi vizsgálata (3200m, 10kV, olajpapiros)

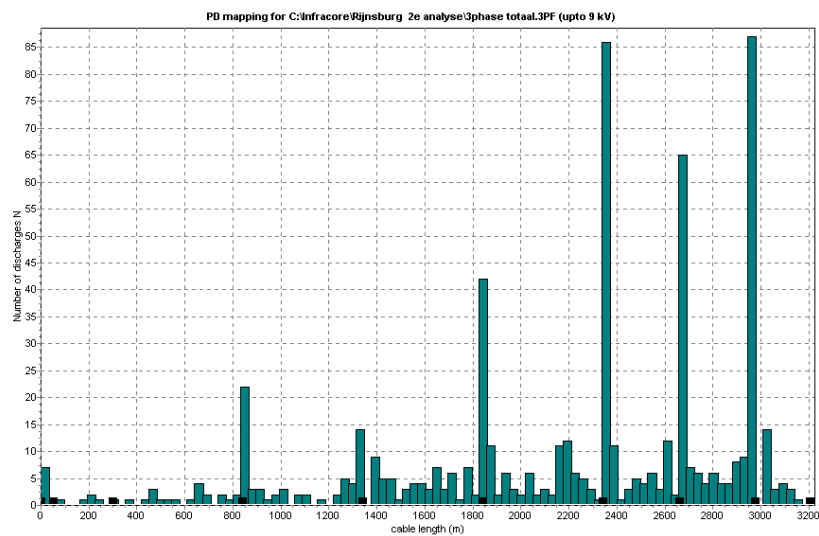
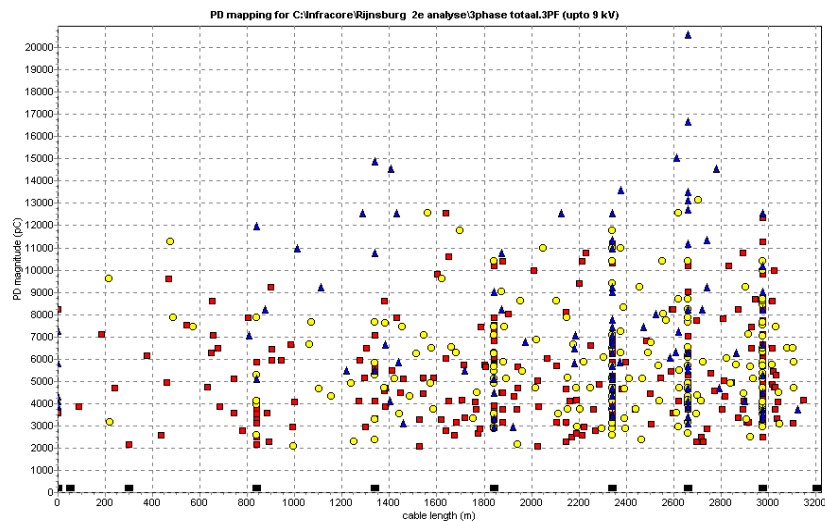
OWTS-sel megfigyelt PD minta



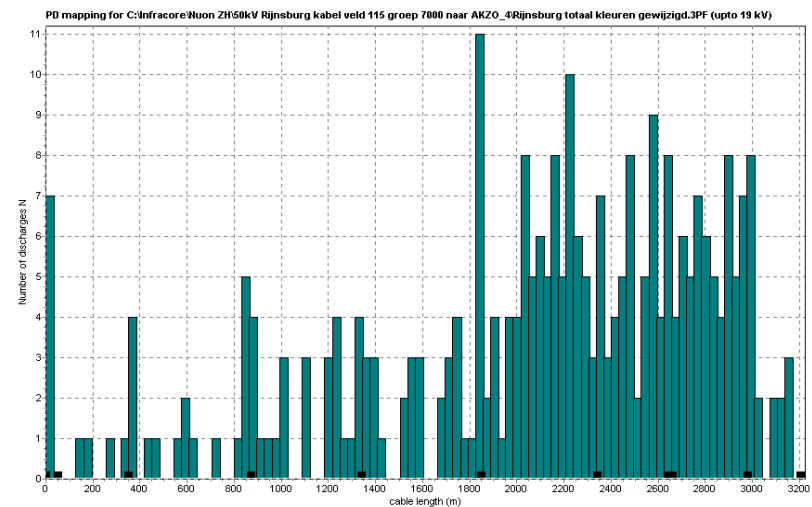
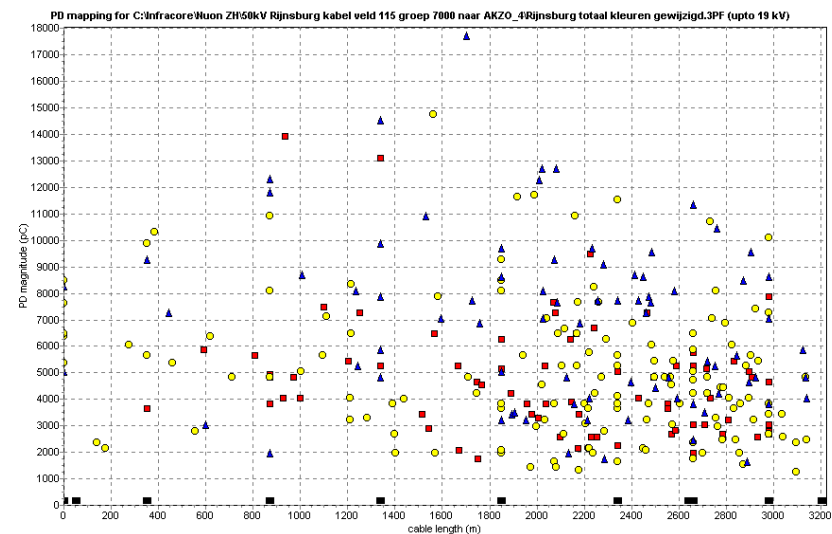
A csak az L3 fázisban
újrabegyűjtő részleges
kisülés egy további
kisülést termelő hibát
jelez

Állapotértékelés (3)

PD aktivitás a karbantartás előtt

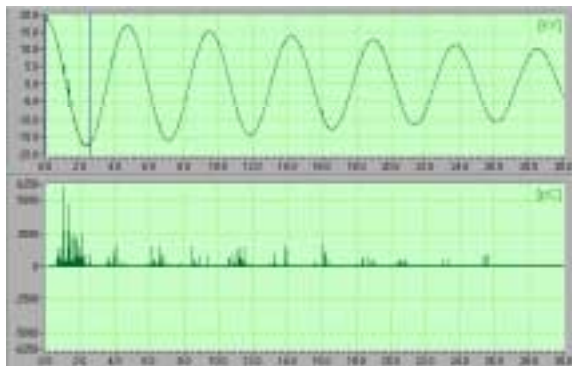


PD aktivitás a karbantartás után

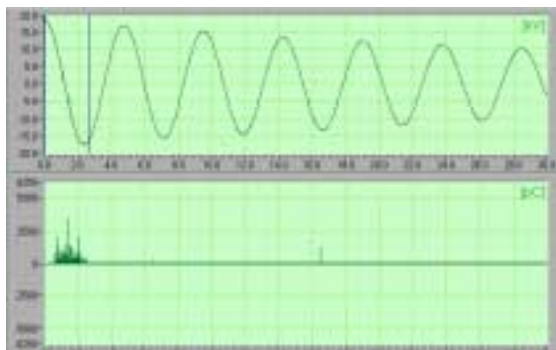


A részleges kisülések fázishelyzetének, mintájának elemzése

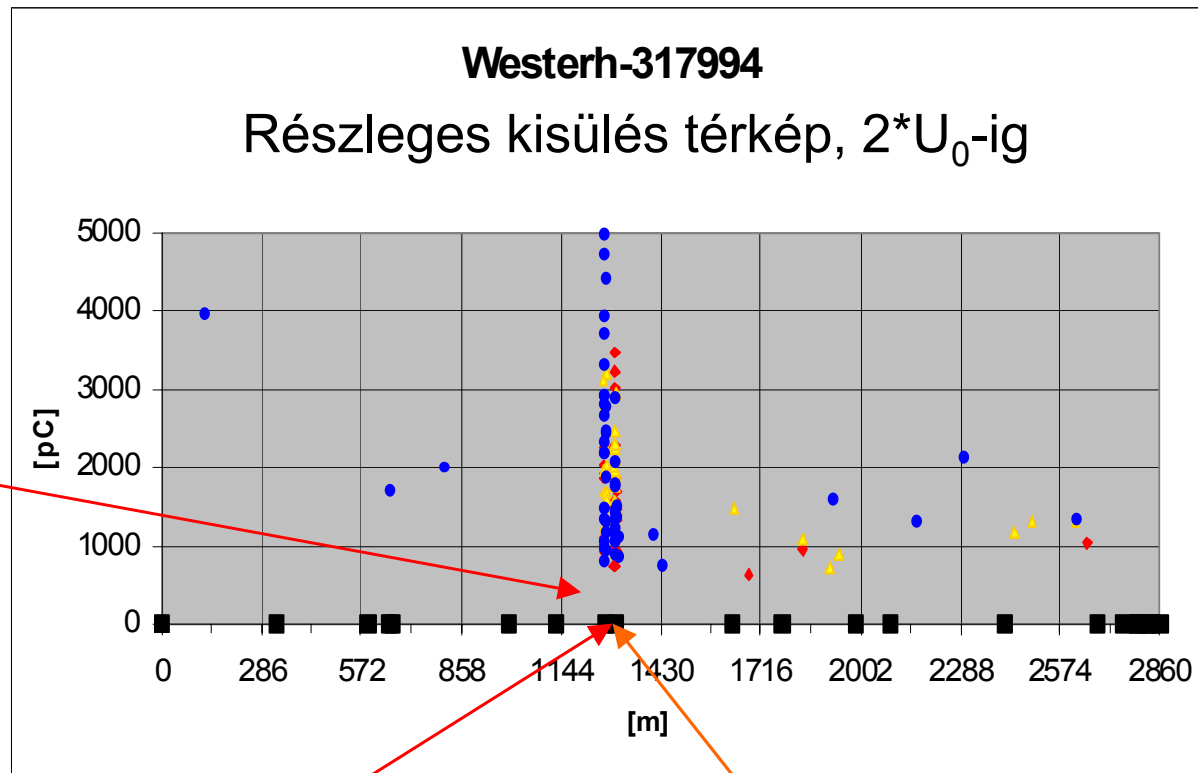
2860m, 10kV, olajpapiros



L3, összekötő 1268 m-nél, epoxigayanta típus



L2, összekötő 1301 m-nél, olajtöltésű



L1, összekötő 1301 m-nél, olajtöltésű



Részleges kisülés diagnosztika

4 rövid, olajpapiros
kábel mérések a
részleges kisülések
előfordulása különböző
feszültség szinteken.

Cable 1 230 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
U ₀	–	–	–
1.5 U ₀	1700	1200	–
2 U ₀	3000	3000	–

Begy.fesz.(PDIV) > U₀
PD 2U₀-nál ~ 3 nC
Állapot: OK

Cable 2 260 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
0.5 U ₀	3200	3850	3100
U ₀	3900	4200	4300
1.5 U ₀	4200	4700	5100
2 U ₀	4800	4700	5900

Begy.fesz.(PDIV) < U₀
PD 2U₀-nál ~ 5 nC
Állapot: ??

Cable 3 260 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
U ₀	–	–	–
1.5 U ₀	–	1250	–
2 U ₀	–	2000	–

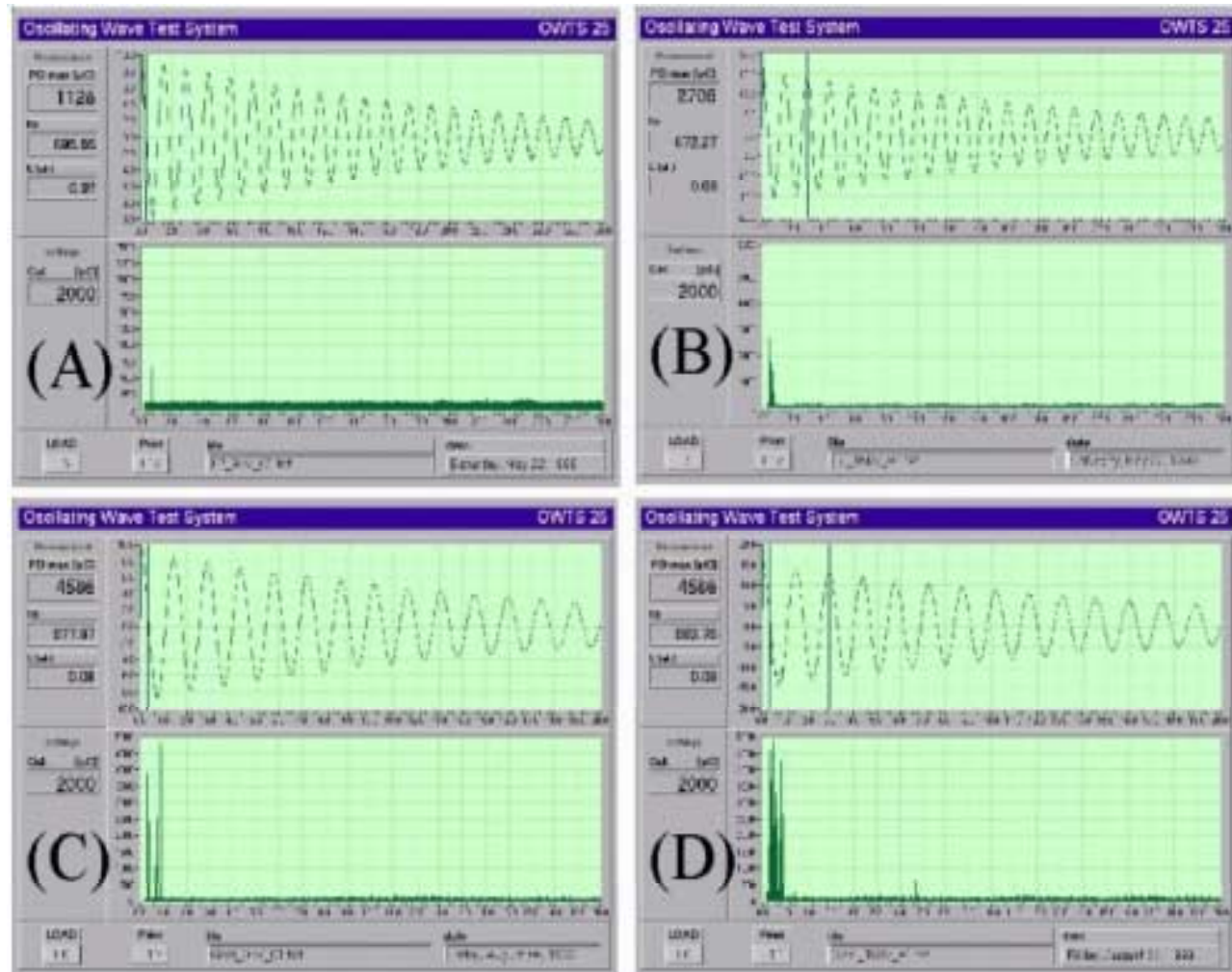
Begy.fesz.(PDIV) > U₀
PD 2U₀-nál ~ 2 nC
Állapot: OK

Cable 4 30 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
U ₀	–	–	–
1.5 U ₀	–	–	–
2 U ₀	3200	2700	–

Begy.fesz.(PDIV) > 1.5U₀
PD 2U₀-nál ~ 3 nC
Állapot: OK

Részleges kisülések időanalízise

3-erű olajpapiros;
260m



(A) U_0 -nál;

(B) $2U_0$ -nál;

(C) U_0 -nál 3 hónappal később;

(D) $2U_0$ -nál 3 hónappal később;

PD = 1 nC;

PD = 2.7 nC;

PD = 4.5 nC;

PD > 4.5 nC;

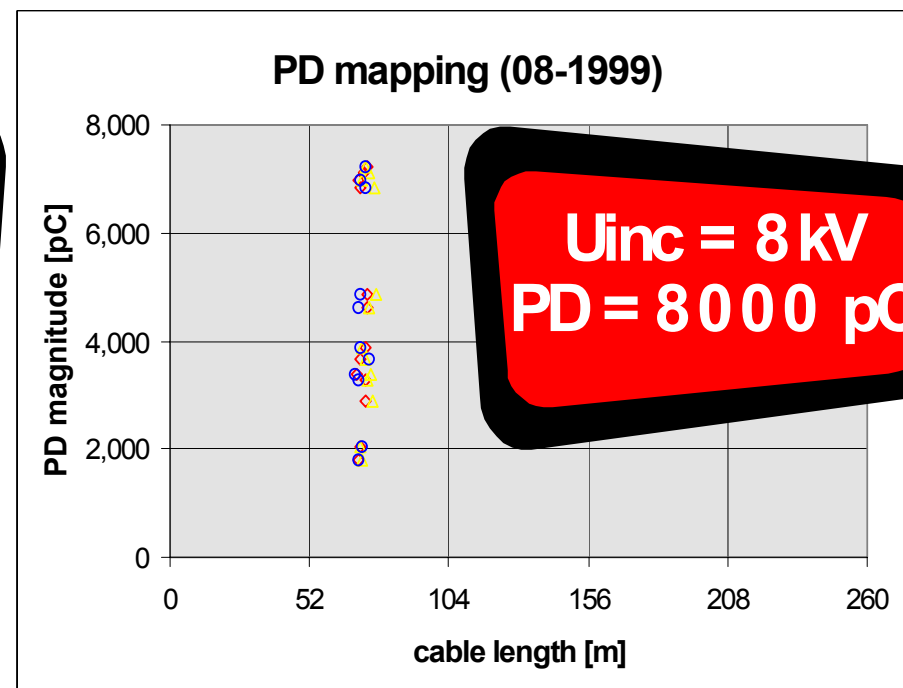
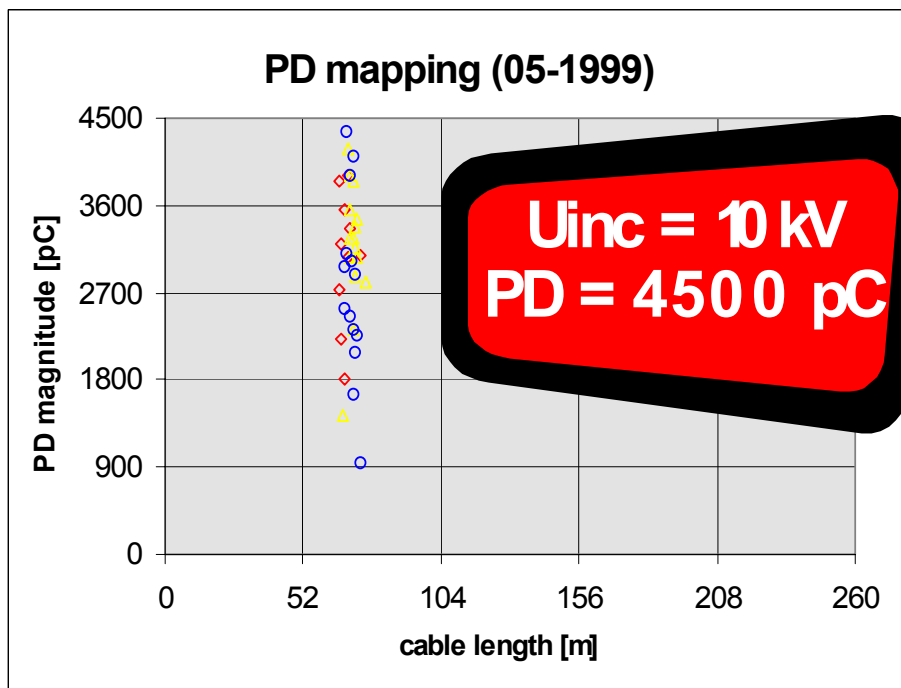
N_{PD} = alacsony

N_{PD} = alacsony

N_{PD} = magas

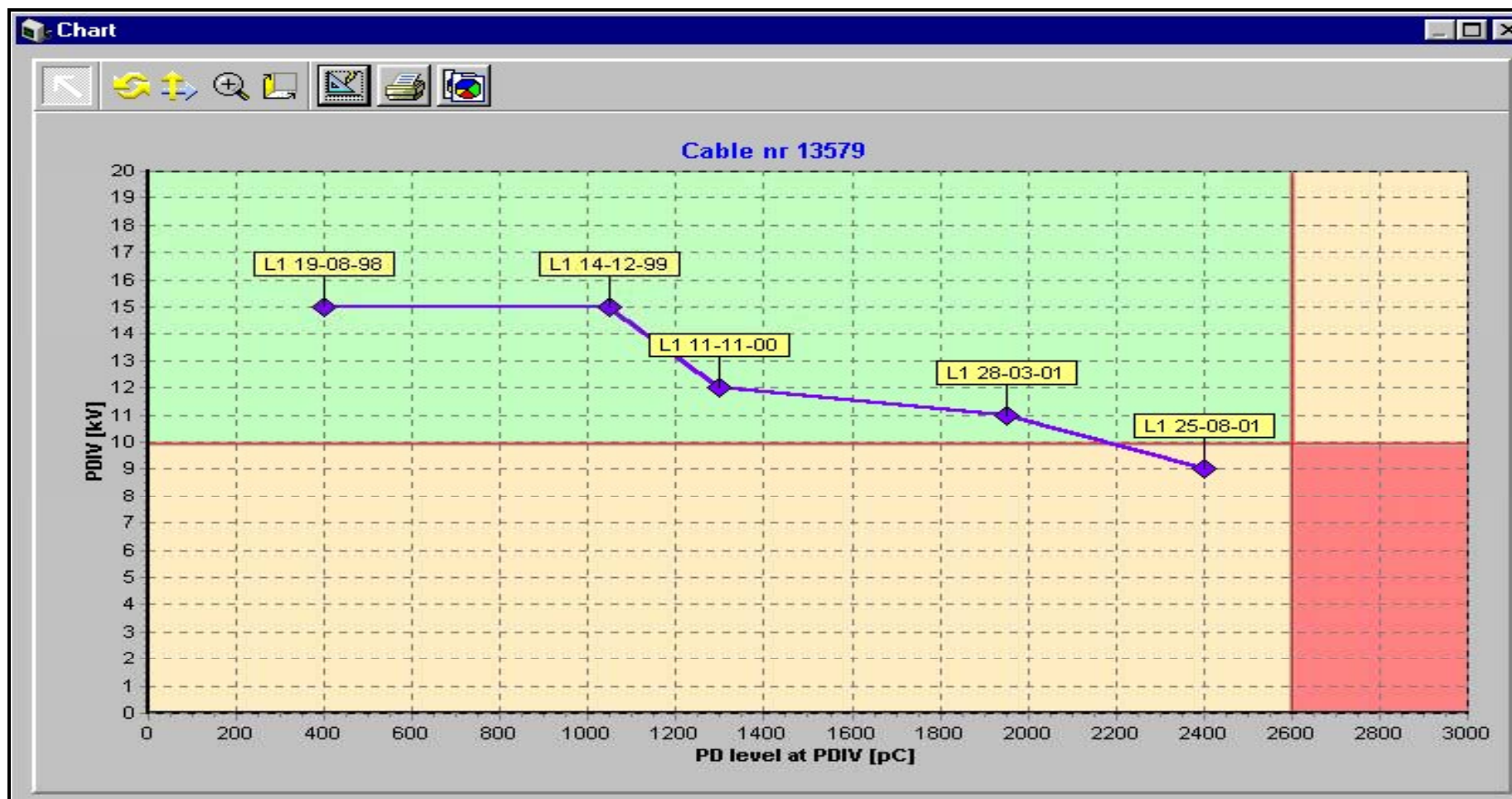
N_{PD} = magas

Adatbáziselemzés : időanalízis



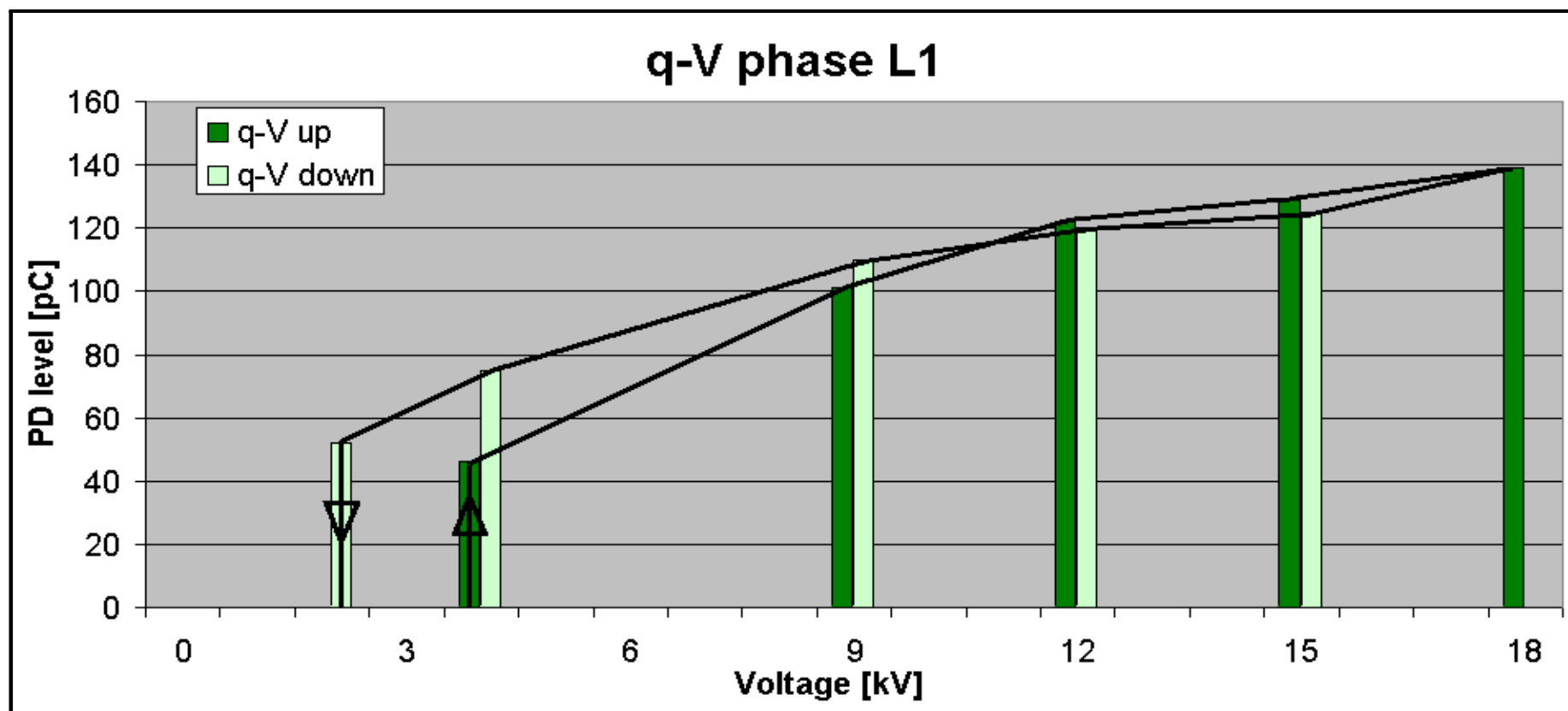
A begyűjtési feszültség csökkenése és a részleges kisülések nagyságának növekedése a mérések közötti 3 hónap alatt azt mutatta, hogy a kábelszigetelés leromlott 90 m-nél.

Két diagnosztikai mennyiség, a begyújtási feszültség és a részleges kisülés nagyságának a trendje; a zöld terület jelzi, ahol a leromlási folyamat nem kritikus a szigetelésre nézve; a piros terület jelzi a meghibásodás kockázatának növekedését



q-V (látszólagos töltés-feszültség) diagram (10 kV-os kábel L1 fázisa), a közelebbi végelzáróból jövő részleges kisülés.

A q-V diagramból: a hiba nagy lapos üregre utalhat.



Részleges kisülés értelmezési szabályok: kiértékelési határértékek

Üzemben öregedett kábelek diagnosztikája és fektetés utáni vizsgálatok

Olajpapiros szigetelés

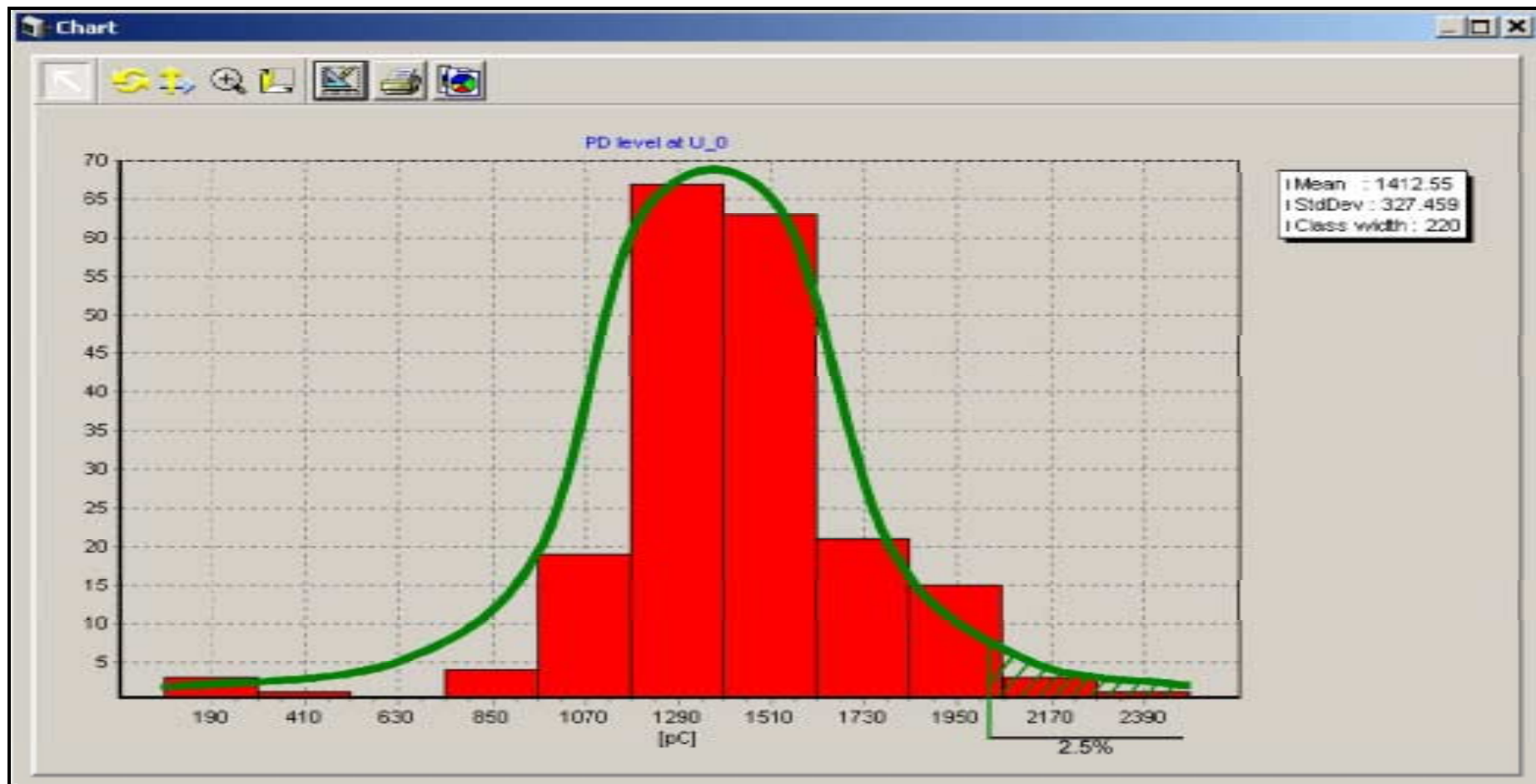
- A részleges kisülések fázishelyzetétől /elhelyezkedésétől függően eltérő részleges kisülés szintek lehetnek elfogadhatók a kábel szigetelésében;
- Az összekötő/végelzáró típusától függően eltérő részleges kisülés szintek lehetnek elfogadhatók ;
- $T_g \delta < 1e-2$.

XLPE szigetelés

- Nem lehet részleges kisülések a kábel szigetelésében (*); helyszíni háttérzaj $< 20pC$;
- Az összekötő/végelzáró típusától függően eltérő részleges kisülés szintek lehetnek elfogadhatók(*);
- $T_g \delta < 1e-3$.

(*) PD mentesség követelménye, amikor $PDIV > 1.3U_0$ és $PDEV > 1.1U_0$.

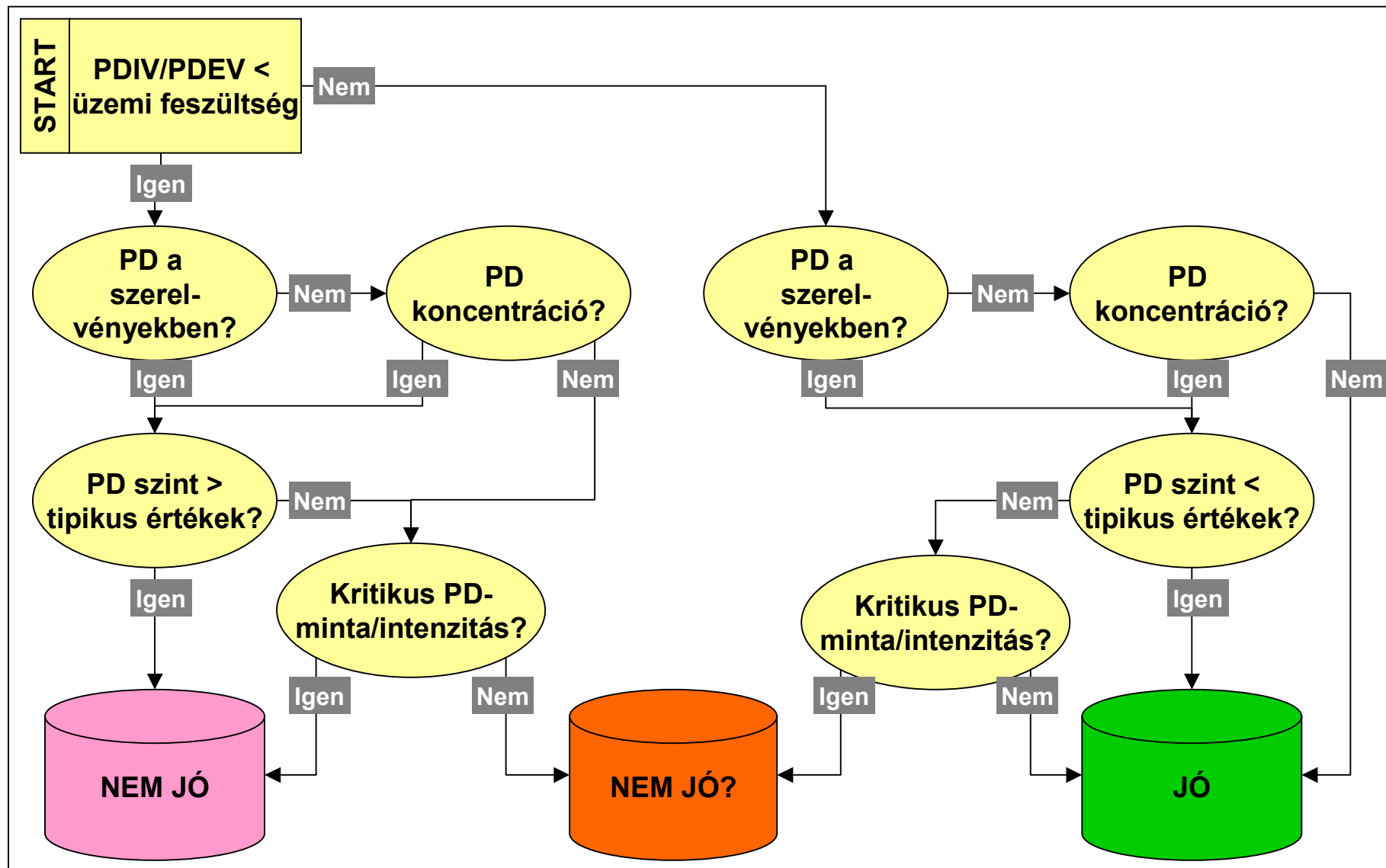
Értelmezési szabályok alkotásának példája adatbázisokkal; egy típusú komponens-sorozat részleges kisüléseinek eloszlása



Néhány tipikus részleges kisülés szint különböző típusú kábelszigetelésre és szerelvényre hollandiai tapasztalatok alapján

Kábelelem	Típus	Trend értékek
szigetelés	olajpapiros	10.000pC
	XLPE	<20 pC
összekötők		
	Műgyanta szigetelés	500pC (<i>aszimmetrikus</i>)
	olajszigetelés	>10.000 pC
	olaj/műgyanta szigetelés	5.000 pC
	Műgyanta szigetelés	4.000 pC
végelzárók	Olaj végelzáró	6.000 pC
	Száraz végelzáró	3.500 pC
	Zsugor végelzáró	250 pC

Döntési diagram diagnosztikai adatanalízishez a szigetelési állapot kategorizálásához a három állapotosztály egyikében



A kábelek osztályozásának példája				
Kábel kat.	Leírás	Üzemi rendelkezésre állás	Elvárt CBM-re fordított idő (óra/év)	Elvárt élettartam (év)
A	Új kábel jó állapotban	>99.9%	<24	>30
B	Jó állapot, de extra figyelem igényelt	>99%	<48	>25
C	Stabil helyzet, de közepes állapot	>95%	<72	>15
D	Instabil helyzet	<90%	-	-
E	Az élettartam vége	<75%	-	<3-5

A kábel- diagnosztika alkalmazhatósága

Közép- vagy nagyfeszültség:	olajpapiros		XLPE		vegyes	
	kőf	naf	kőf	naf	kőf	naf
Feszültségprópák						
DC próba főszigetelés	*1					
AC próba főszigetelés	AT		AT		AT	
Oscilláló feszültségpróba	AT		AT		AT	
DC szintetikus köpenyvizsg.	AT/PQ		AT/PQ			
Dielektromos mérések						
tg δ mérés 50 Hz-en	PQ		PQ		PQ	
tg δ mérés 0.1Hz-en			*4			
Olajanalízis	n/a	PQ	n/a		n/a	PQ
RVM	*2		*3		*2	
Részleges kisülés mérések						
25-200 Hz-es vizsg. fesz.-en	AT/PQ		AT/PQ		AT/PQ	
0.1 Hz-es vizsg. fesz.-en (VLF)	AT/ PQ	*2	*5	*2	AT/ PQ	*2
Oscilláló vizsg. fesz.-en (OWTS)	AT/ PQ	*2	AT/PQ		AT/ PQ	*2
Nagyfrekvenciás on-line	AT/PQ		AT/PQ		AT/PQ	

AT Fektetés utáni vizsgálat

PQ Időszakos minőség mérés

*1 Csak extrudált szigetelés esetén

*2 Még nincs kifejezve

*4 Csak víztree gyanúja esetén

*5 A frekvenciafüggőség miatt

Javasolt

Vitatott

Nem javasolt

*3 Fejlesztés alatt

n/a nem alkalmazható

Értelmezési szabályok az elosztóhálózati kábelek állapotorientált karbantartásához

TARTALOM

1. Általános szempontok
2. Gazdasági szabályok
3. Befolyásoló tényezők
4. Szigetelési állapot kiértékelésének szabályai
- 5. Következtetések**

Következtetések

- Az üzemzavaros komponensek **hibastatisztikáinak** tanulmányozásával és vizuális vizsgálatával azonosíthatjuk a **domináns hibákat**. Mivel többségük részleges kisülést termel, a részleges kisülések mérése az erősáramú kábeleken hasznos **diagnosztikai eszköz**;
- A részleges kisülés diagnosztikát használva fontos információkat gyűjthetünk a kábelszakasz **részleges kisülés ‘ujjlenyomatába’**, amely tartalmazza a begyújtási/kialvási feszültségeket, a részleges kisülések szintjét, fázishelyzetét és helyét;
- Döntési diagramban használható, **egységesített értelmezési szabályok** alkalmazhatók az optimális döntéshez a kábelszakaszok szigetelési állapotáról;
- **A trend-analízis és adatbázis használata** fontos eszköz a szigetelési állapot megítéléséhez.

Korlátok és buktatók

1. A mért szigetelési állapot értelmezése a szituációtól függ, vagyis, ami érvényes egy adott kábelhálózat esetében, nem szükségszerű, hogy teljesen alkalmazható egy másikra is.
2. A hálózat tulajdonosának el kell fogadnia egy bizonyos “meghibásodási kockázatot”, amely a mért információkon és az értelmezési szabályokban rögzített, összegyűjtött tapasztalatokon alapul.
3. Ezek az értelmezési szabályok az anyagok és azok eltérő kombinációinak tipikus viselkedését írják le egy adott rendszerben.
4. Ezek az alapjai a javaslattételi határértékeknek és kiküszöbölik, hogy az operátor fejében kelljen összpontosulnia a mérési eredmények értelmezésének teljes terjedelmére.

Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

Edward Gulski, Frank J. Wester
Delft University of Technology, HV Technology & Management
The Netherlands

Methodology developed in co-operation with

Seitz Instruments AG, Switzerland
Heafely Test AG, Tettex Instruments Division, Switzerland
NUON InfraCore, The Netherlands

Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

CONTENT

- 1. General aspects**
- 2. Economic rules**
- 3. Influencing factors**
- 4. Insulation condition assessment rules**
- 5. Conclusions**

Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

CONTENT

1. General aspects

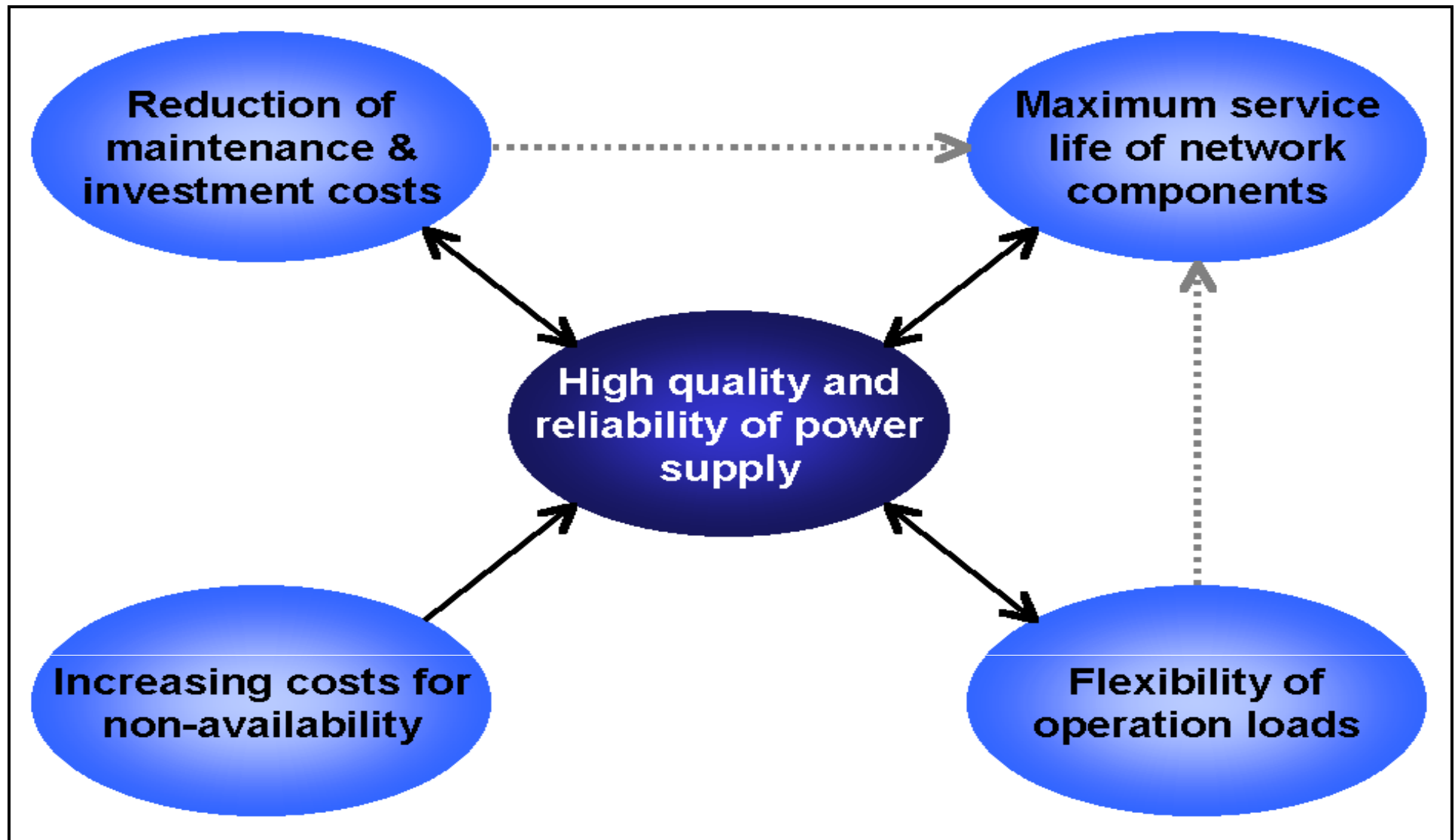
2. Economic rules

3. Influencing factors

4. Insulation condition assessment rules

5. Conclusions

Effects of liberalization on electricity markets



The Netherlands

“In case of disturbance in energy supply 75 Guilders”

Bij stroomuitval 75 gulden

Van onze redactie economie

DEN HAAG – Consumenten die in de toekomst getroffen worden door een urenlange stroomuitval, krijgen een schadevergoeding van 75 gulden. Dat heeft de toezichthouder op de energiesector, de DTe, gisteren laten weten.

De DTe heeft een regeling opgezet om klanten in geval van een ernstige storing door het

energiebedrijf te laten compenseren. Wanneer een storing langer dan vier uur duurt, moet het verantwoordelijke bedrijf ieder gedupeerd huishouden 75 gulden vergoeden.

De termijn van vier uur gaat in op het moment dat de eerste klant de storing meldt. De schadevergoeding wordt uitgekeerd via de energierekening. Deze compensatie staat los van eventuele aansprakelijkheidsclaims, aldus DTe.

“The DTe, the Dutch supervisor of the energy sector, has made an arrangement to compensate customers in case of a serious failure in the electrical network.

In the case that a disturbance last more than 4 hours, the responsible utility should pay every duped household ÈUR 35,-.

The 4 hours term begins when failure is reported by the first customer”

Customer compensation in case of an electricity disturbance of more than 4 hours.

Connection	Customer type	Compensation
$U < 1\text{kV}$	Household	EUR 35,-
$1\text{kV} \leq U < 25\text{kV}$	Small Industry	EUR 900,-
$U \geq 25\text{kV}$	Large Industry	EUR 90.000,-

However, this compensation is independent from possible responsibility claims and also not in case of provable negligence in the maintenance of the network !

The Netherlands

“ Hotel has enough of power black outs ”

“ Amsterdam luxury hotel Krasnopolsky considers juridical measures against Nuon utility.

This hotel, where during the royal wedding on February 2nd, 2002 all royal guests are going to stay, has got in the last 6 months for the 2nd time 1 hour power black out.

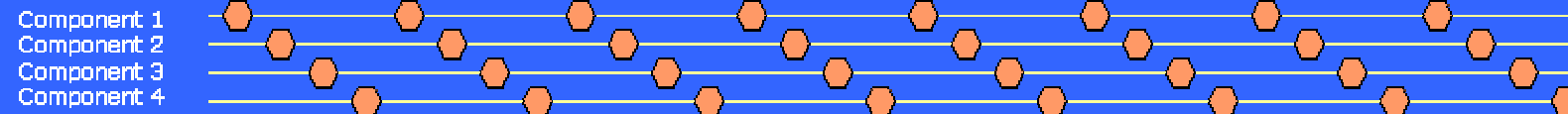
Now, during power black out a conference with 300 participants and 500 guests was organised in the hotel.

Nuon says that no problems have to be expected for the time of wedding, due to additional stand-by power units available.

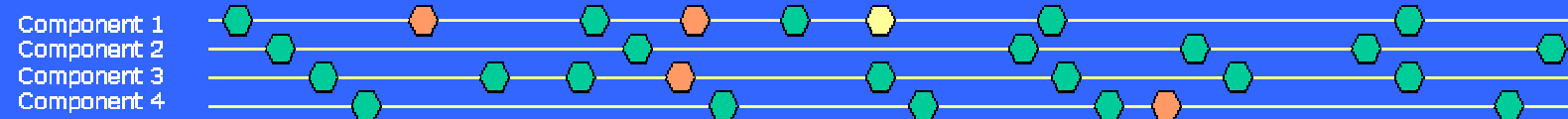


Onderhoud Aan Componenten Van Hetzelfde Type

Time based maintenance



Condition based maintenance



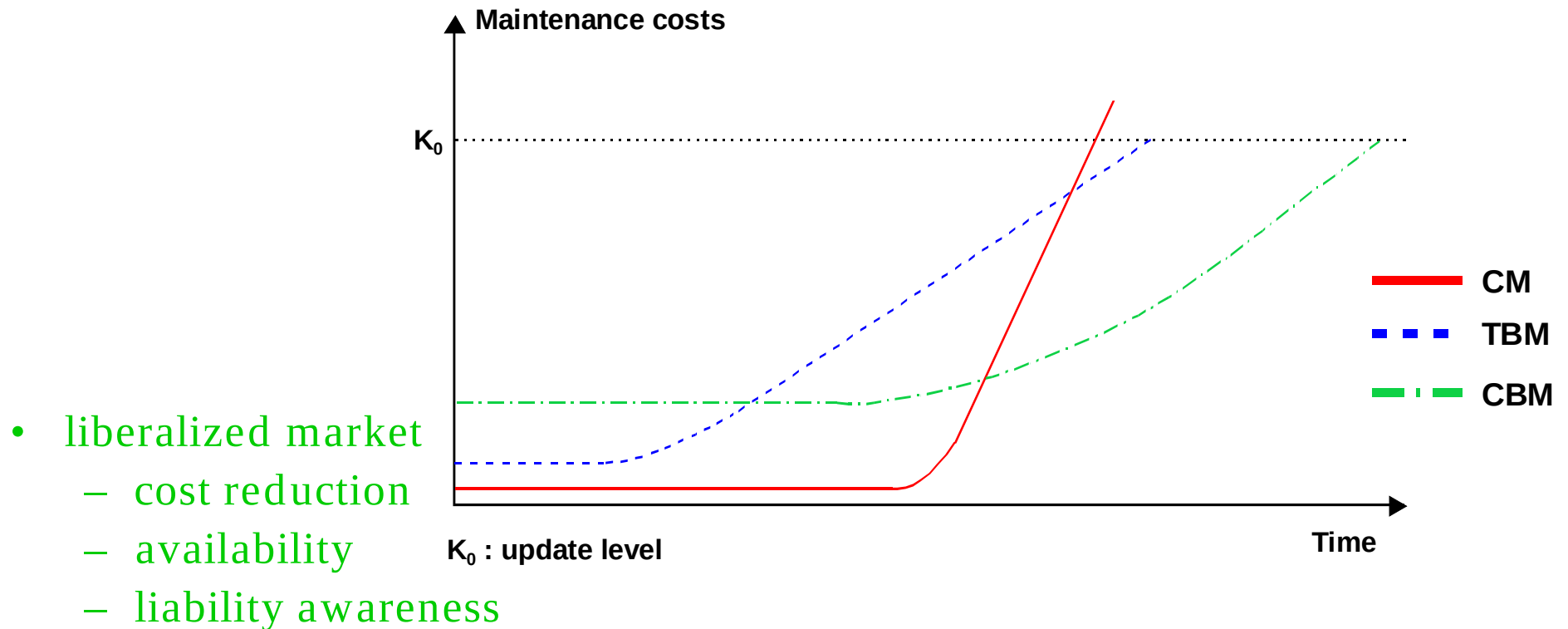
Corrective maintenance



- Inspectie / meten
- Onderhoud
- Onderhoud en Inspectie
- Falen

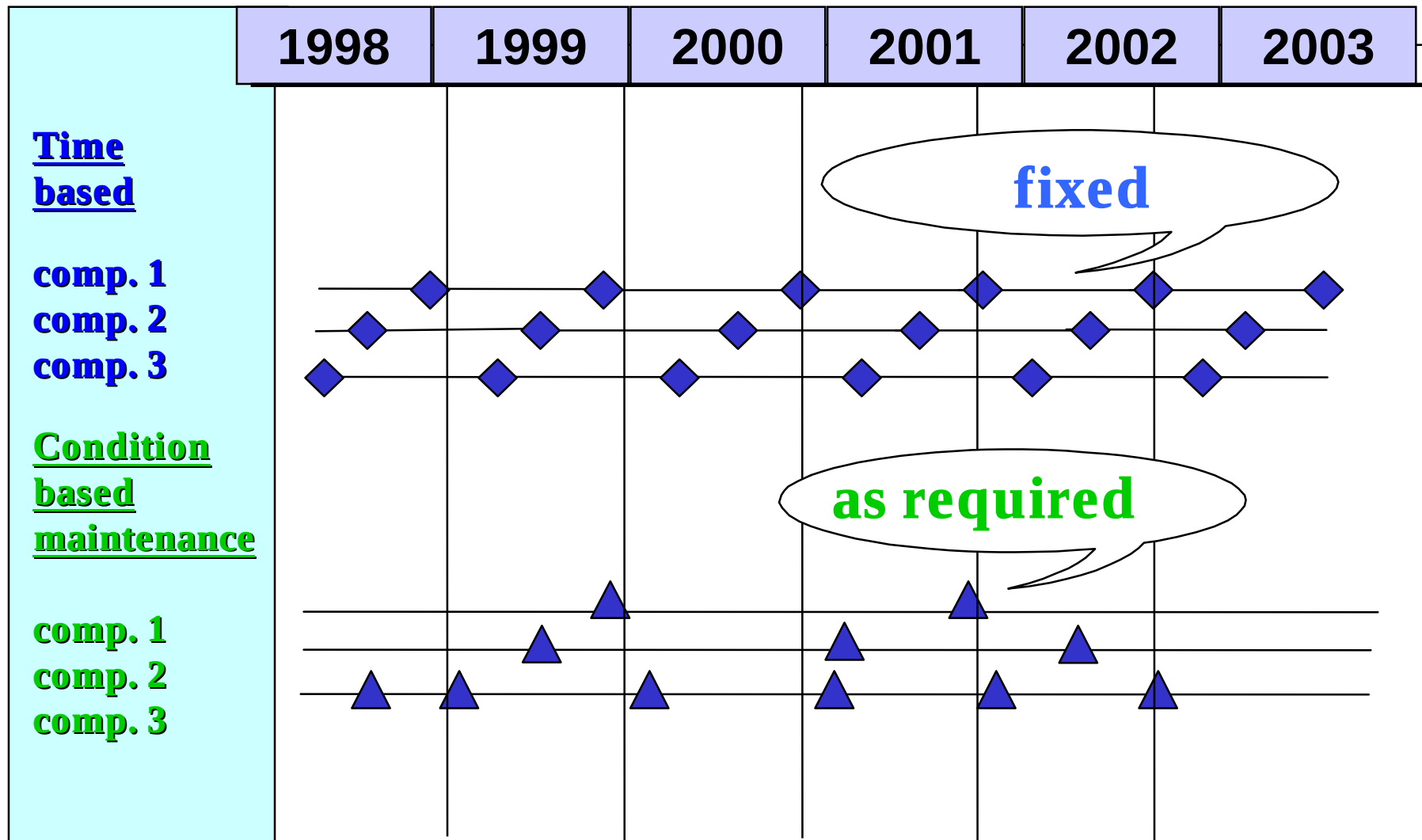
t →

On condition maintenance



- Trends
 - Maintain if needed: controlled savings by CBM
 - Utilize lifetime / anticipate on aging
 - Keep expertise; documentation by IT
 - Decrease malfunctions preventively or improve concept

CBM : the intelligent approach

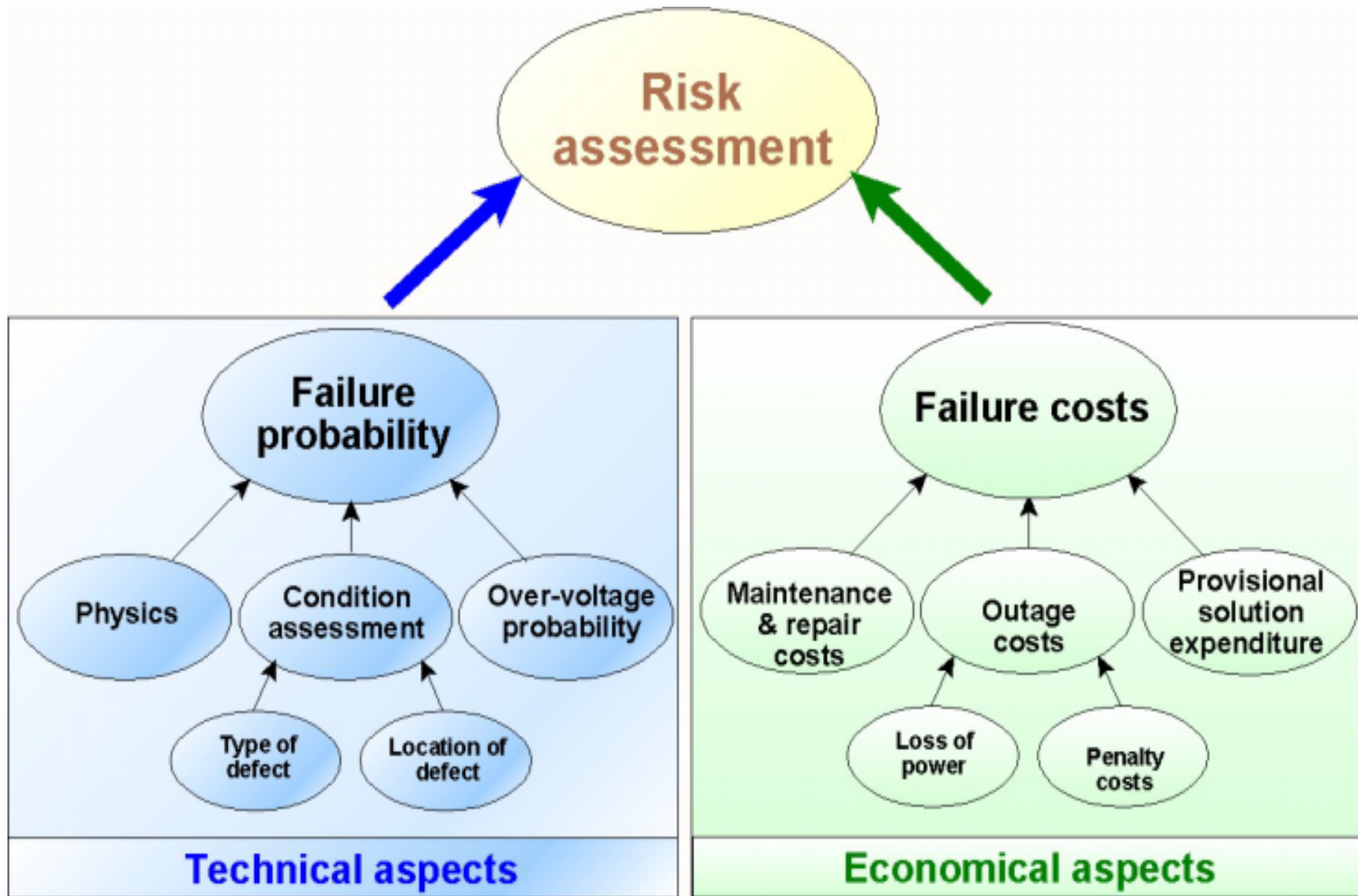


Economic aspects (2)

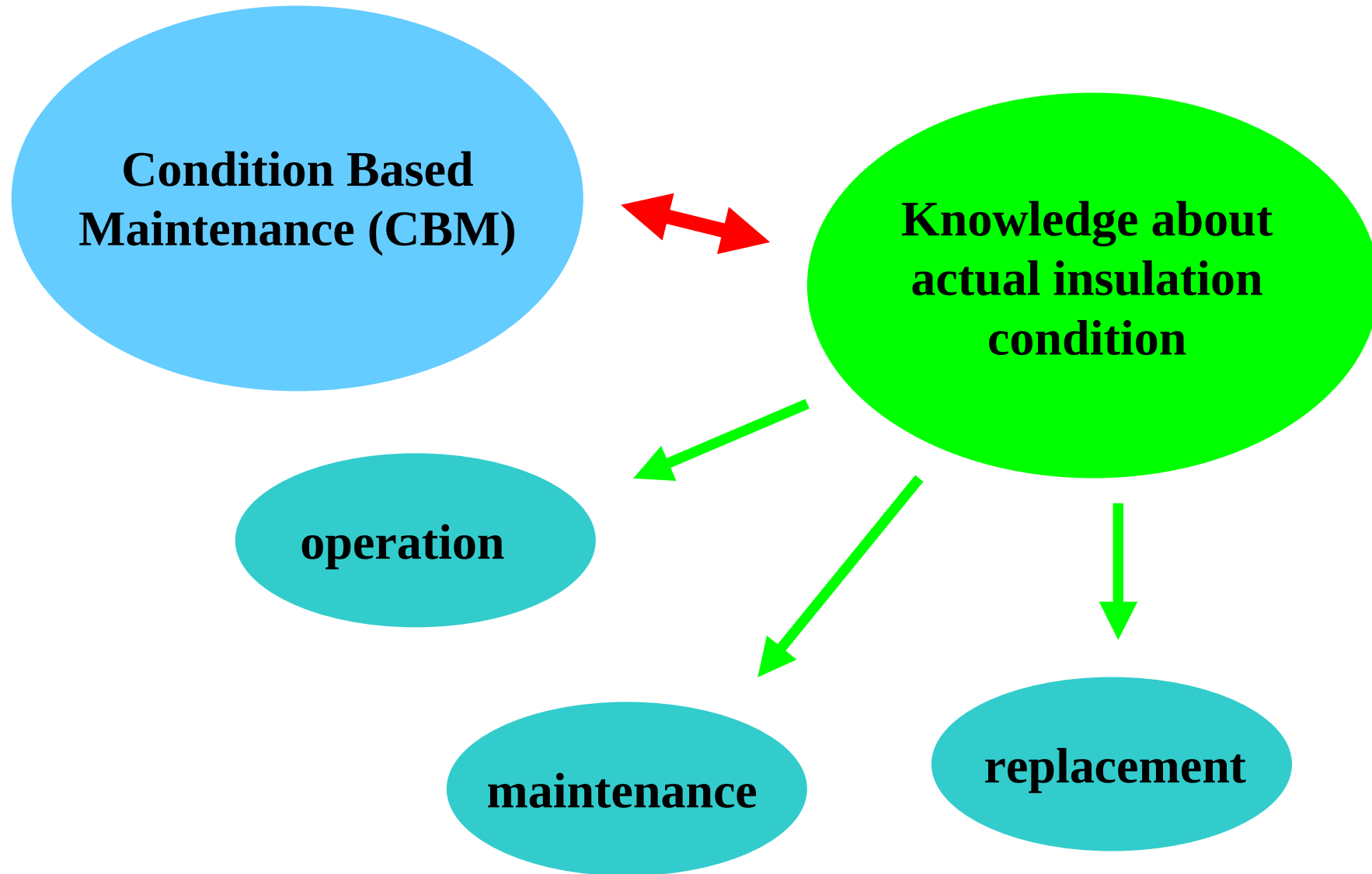
Example:

	Prevented Cable fault	Non prevented Cable fault
Repair	2.500\$	3.750\$
Diagnostics	1.750\$	0\$
Economic costs	0\$	5.000\$
Total costs	4.250\$	8.750\$

Lit: B.J. GROTENHUIS 1996



Condition Based Maintenance (CBM)



Aspects important for implementation of CBM

- 1. Economics of using advanced diagnostic for preventive maintenance;**
- 2. Use diagnostics to determine insulation condition of cables in service, e.g. partial discharges;**
- 3. Partial discharges: discharging defects, ageing processes and failure modes;**
- 4. Determination of PD knowledge rules to support CBM;**
- 5. Application of data base analysis for assessing the actual insulation condition;**

Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

CONTENT

1. General aspects

2. Economic rules

3. Influencing factors

4. Insulation condition assessment rules

5. Conclusions

Economics: CM versus CBM

Comparison between the maintenance costs when a failure occurs with the costs of CBM as a function of the percentage detected faults

Failure maintenance costs:

$$C_{\text{failure}} = P_{\text{failure}} * T_{\text{failure}} * C_{\text{NDE}} + K_{\text{repair}}$$

$$C_{\text{NDE/household}} = \text{EUR } 1,-/\text{kWh} ; \quad C_{\text{NDE/industry}} = \text{EUR } 10,-/\text{kWh} ;$$
$$C_{\text{repair}} \sim \text{EUR } 7.000,- \text{ (+possible maintenance switchgear)}$$

CBM costs:

$$C_{\text{CBM}}(F_{\text{defect}}) = \left(\frac{C_{\text{switching}} + C_{\text{measure}} + C_{\text{testset}}}{F_{\text{defect}}} \right) + C_{\text{correction}}$$

Economics: CBM costs

$$C_{\text{switching}} = 2 * C_{\text{engineer}} * T_{\text{switching}}$$

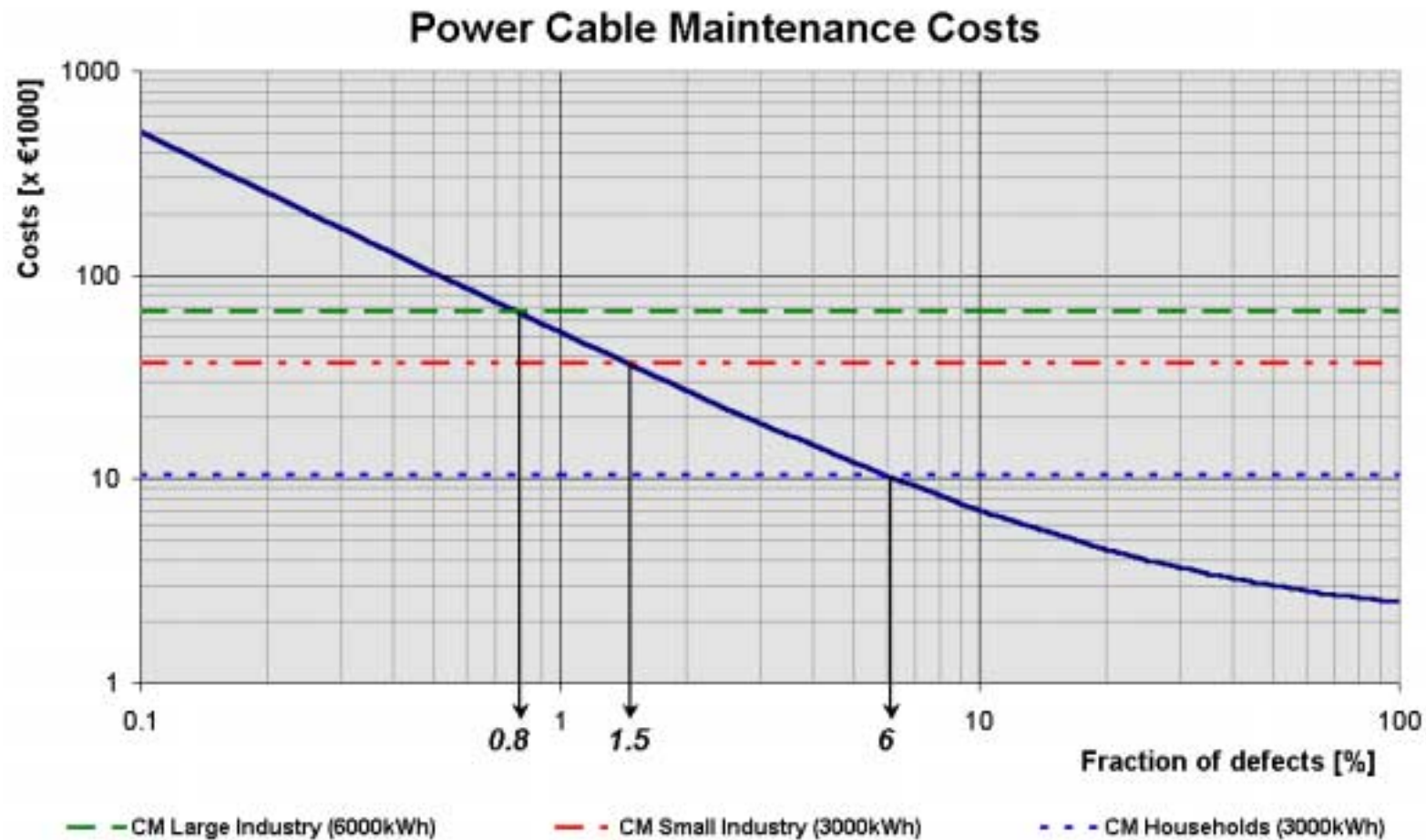
$$C_{\text{testset}} = \frac{C_{\text{new set}}}{T_{\text{write-off}}} * \frac{T_{\text{measure}}}{T_{\text{use / year}}}$$

$$C_{\text{measure}} = C_{\text{engineer}} * T_{\text{measure}}$$

Testing cost of a cable section

C_{man-hour}	EUR 70,-
t_{switching}	2 hours
t_{measurement}	4 hours
C_{purchase}	EUR 6.5000
t_{amortisation}	5 years
N_{meas/year}	150,-
C_{repair}	EUR 7.000
C_{correction}	EUR 2.000

CBM costs based on off-line diagnostics for power cable as a function of effectiveness of the diagnostic tool. CM costs are reflected for three types of connection to the network. Break-even points reflect the number of detectable cable defects per 100 diagnosed cables.



Assumptions:

1. 50% of failures in MV power network are related to insulation problems
2. 1 failure causes 3000 kWh of not delivered energy
3. 1 kWh represents 15 USD of economic costs

Example:

5% insulation prevention in case of 100 failures/year provides a benefit of 112.500 USD

$$5\% \times 100 \text{ failures/year} \times 50\% \times 3000 \text{ kWh} \times 15\$ = 112.500\$$$

Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

CONTENT

1. General aspects

2. Economic rules

3. Influencing factors

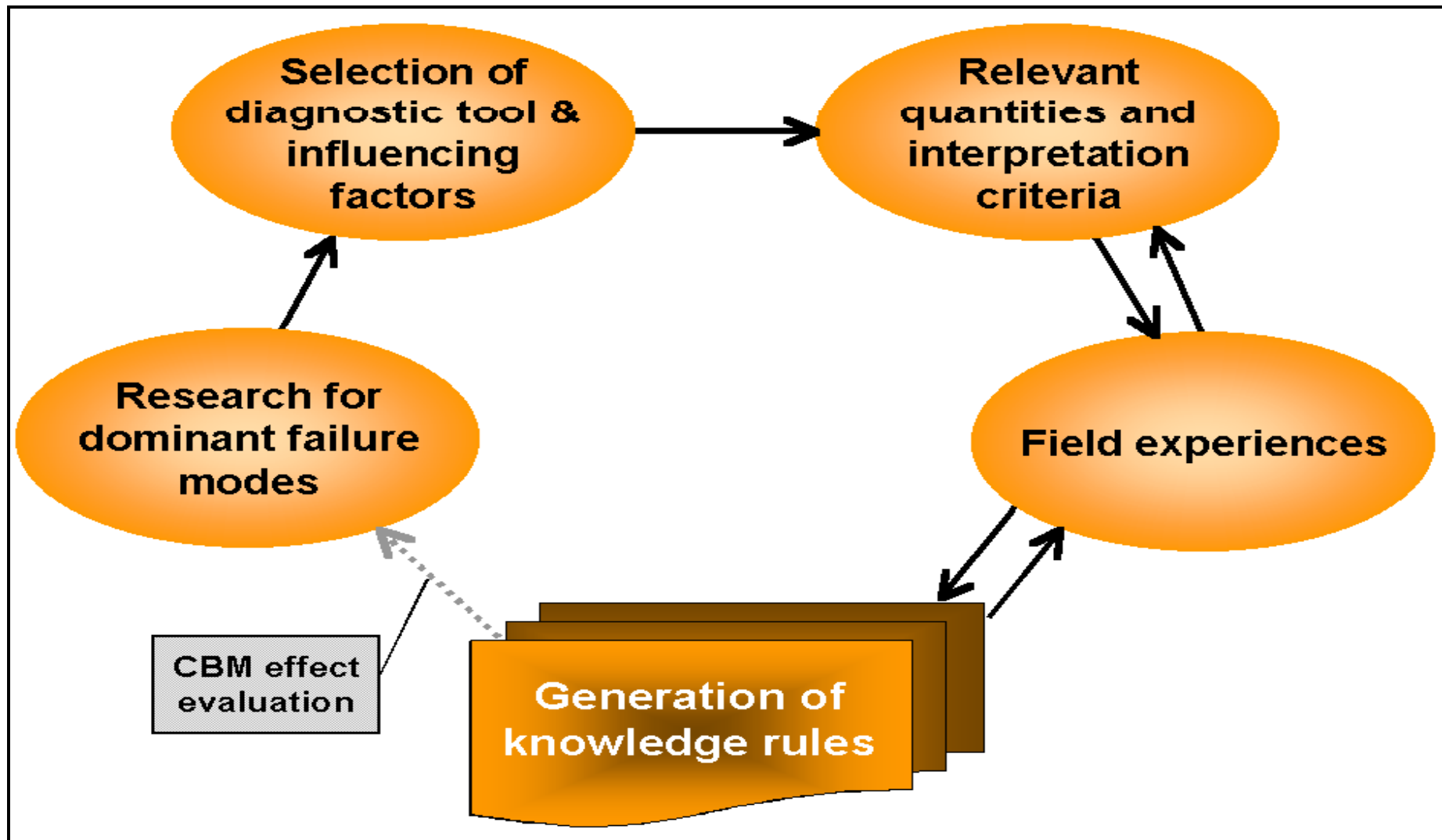
4. Insulation condition assessment rules

5. Conclusions

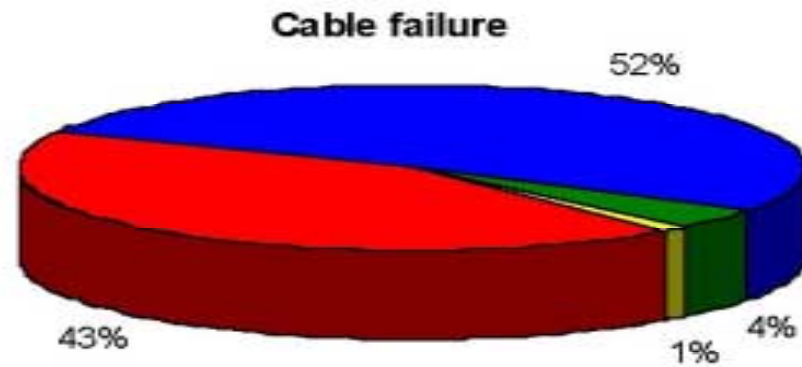
Diagnostics $\Leftrightarrow$ System failure $\Leftrightarrow$ Life estimation

- 1. The main objective of a diagnostic measurement is to reach conclusions about the severity and location of possible defects or potential failures, based on the measured information.**
- 2. The degree of severity always relates to the question: “*Is this component going to fail soon and when will that be*”?**
- 3. So far it was not possible to translate accurately the diagnostic information into remaining life estimation.**

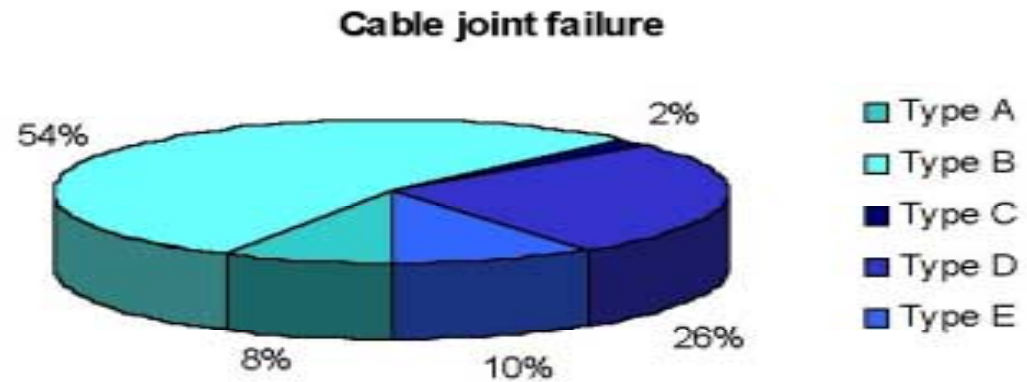
Generation process for PD knowledge rules to support CBM



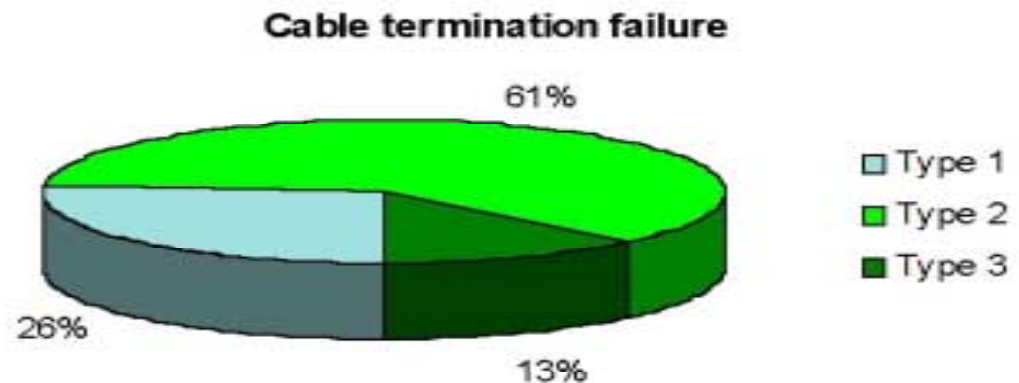
Example of statistical distribution of cable failure causes



■ Non electrical damage ■ Cable joints
■ Cable terminations ■ Cable insulation



■ Type A
■ Type B
■ Type C
■ Type D
■ Type E



■ Type 1
■ Type 2
■ Type 3

Typical fault causes

Terminations

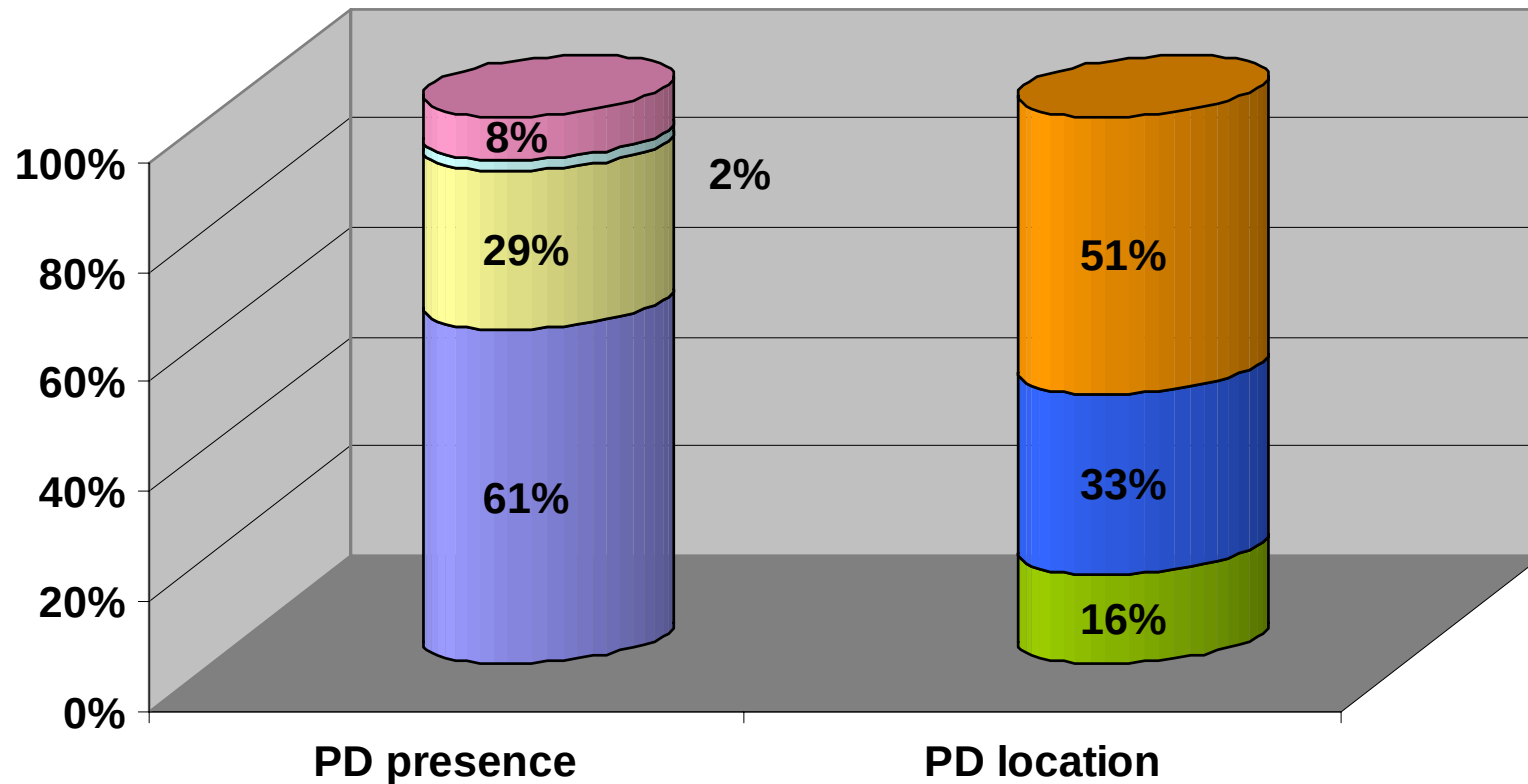
[Source: NUON, Infra Noord Holland]

Splices

- Type A (oil filled)
 - low oil level;
 - sharp edges on connector;
- Type B (epoxy resin filled)
 - moisture penetration;
 - sharp edges on connector;
- Type C (oil filled, epoxy filled)
 - moisture penetrations;
 - sharp edges;
 - low oil level;

- Type 1 (oil filled)
 - low oil level;
 - sharp edges on connector;
- Type 2 (mass filled)
 - sharp edges on connector;
- Type 3 (plastic)
 - sharp edges on connector.
- Type D (oil filled glass fibre)
 - air bubbles;
 - low oil level;
- Type E (resin filled)
 - gas bubbles;
 - sharp edges;
 - bad hardened resin.

PD activity PILC



■ PD at U0
■ Unknown Results
■ PD Source in Joint

■ PD at 1.3*U0
■ PD Source in Cable Insulation

■ PD at Higher Voltages
■ PD Source in Termination

Analysis of typical fault causes

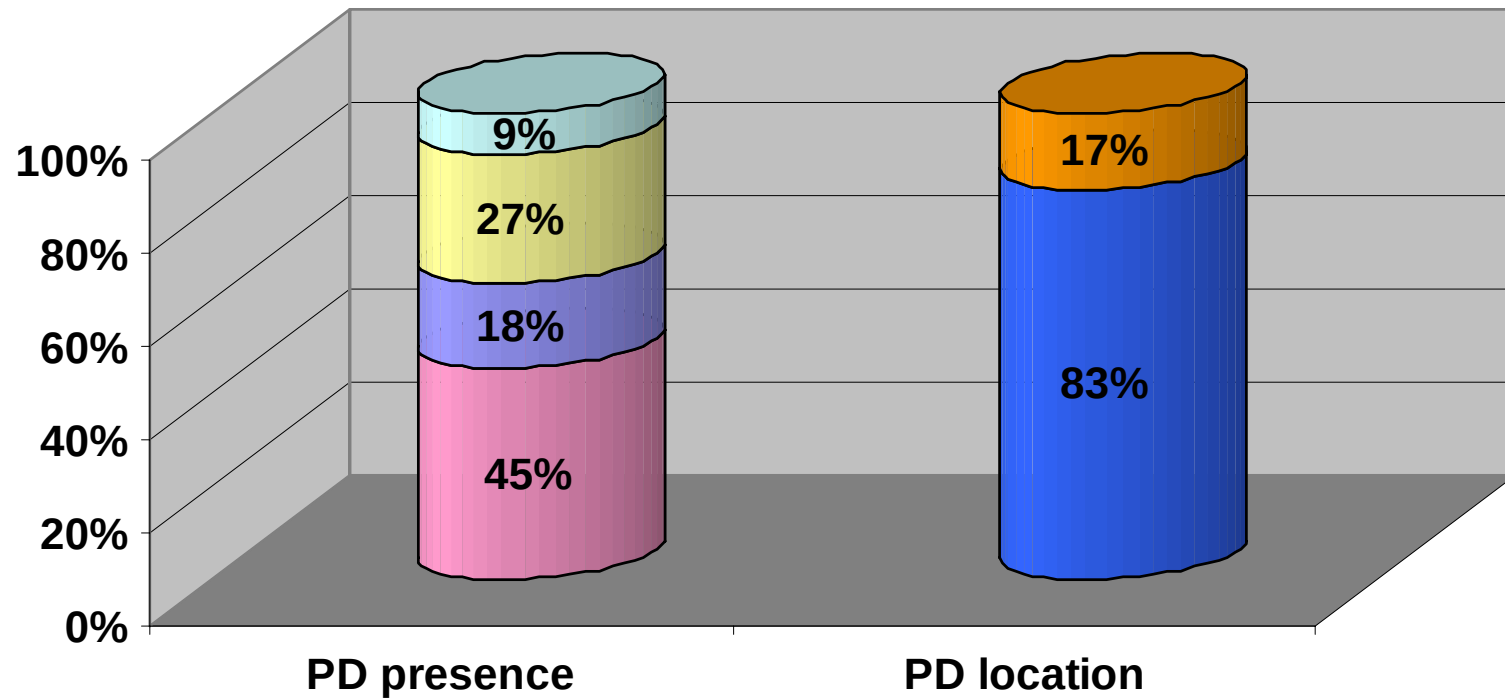
Joint and terminations:

- Sharp edges on connector (all types);
- Moisture penetration (all types);
- Air / gas bubbles (Kabeldon);
- Bad hardened resin (TECE);
- Field grading movement (slipover ABB)
- Interface problems: gaps, protrusions, etc (slipover ABB);

Cable insulation:

- Damaged outer sheet;

PD activity XLPE



PD free

PD at U_0

PD at $1.3 \cdot U_0$

PD at Higher Voltages

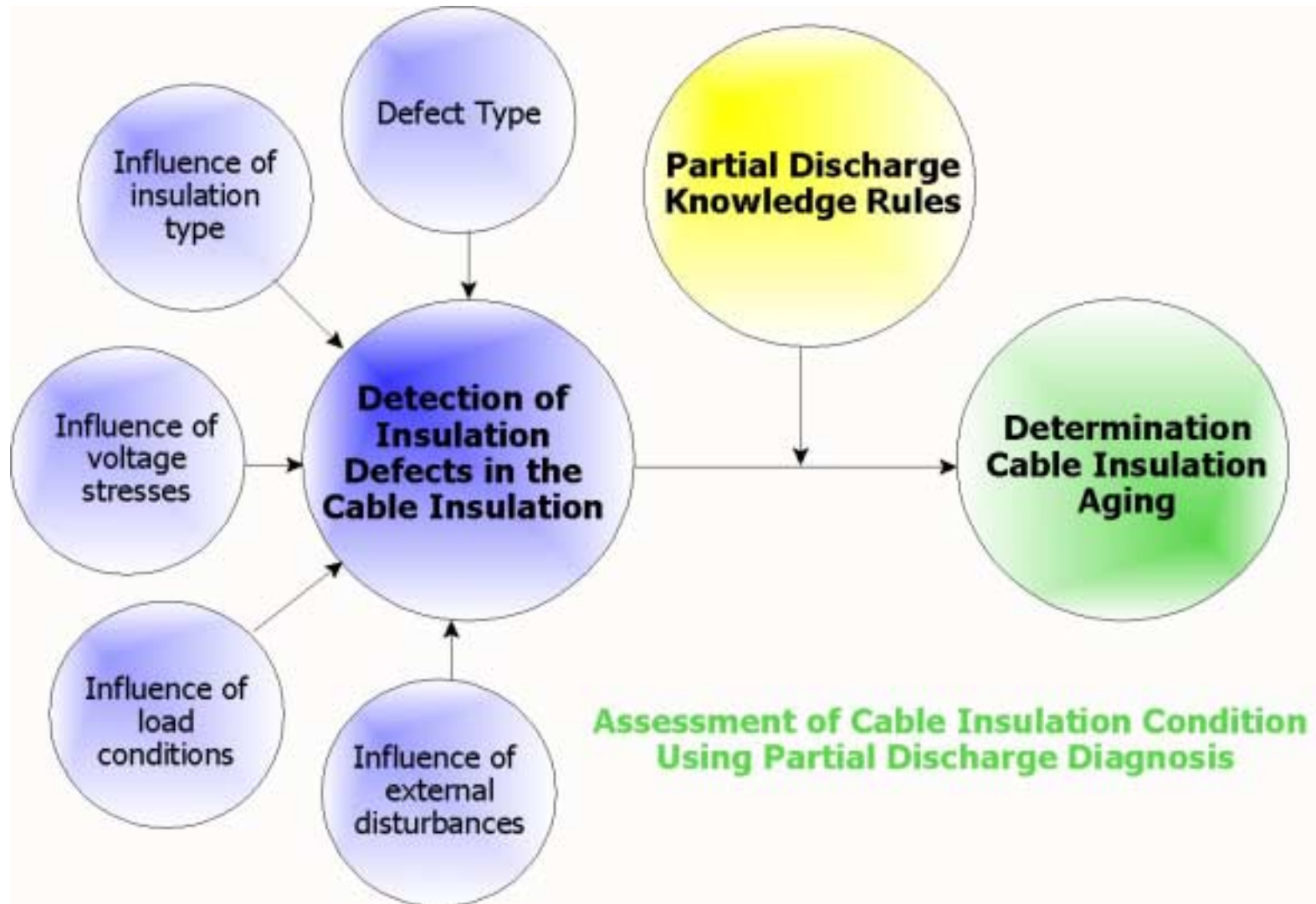
PD Source in Termination

PD Source in Joint

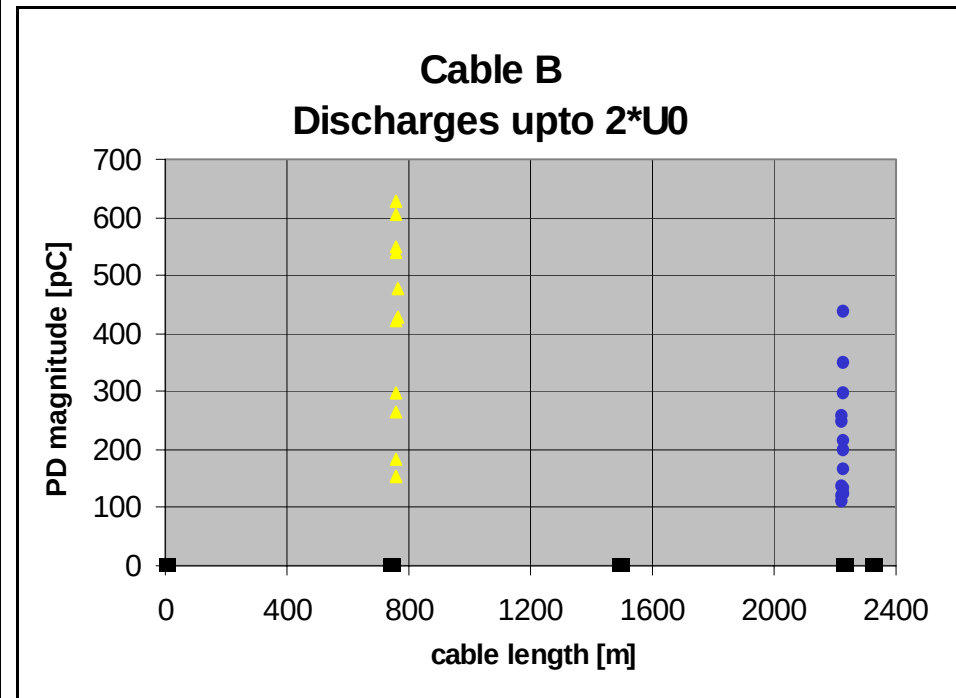
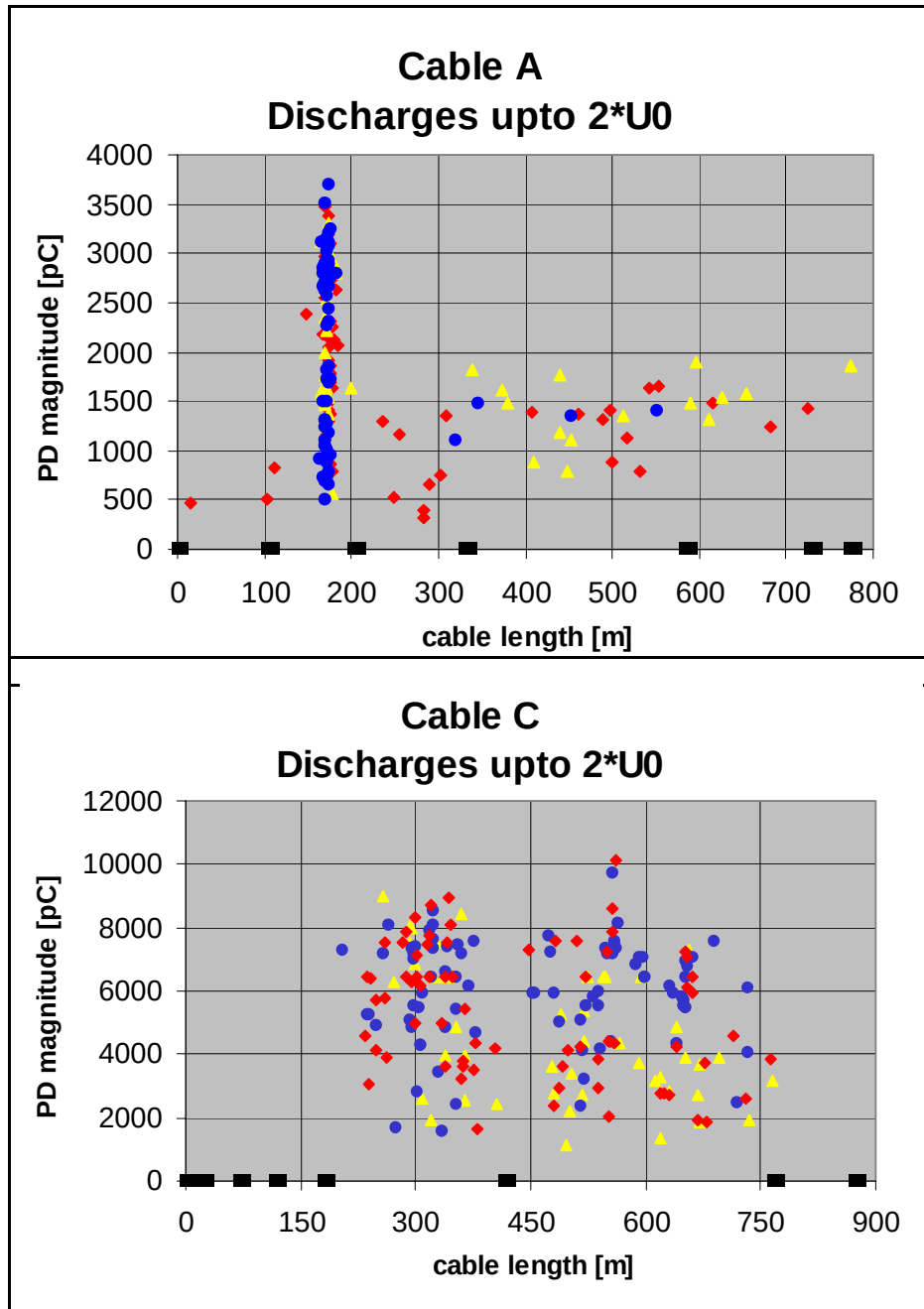
Fault cause analysis of disturbed cable termination



Relationship between service condition specific factors, defect detection, knowledge rules and condition assessment to support CBM



Analysis influencing factors; Type of cable system



Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

CONTENT

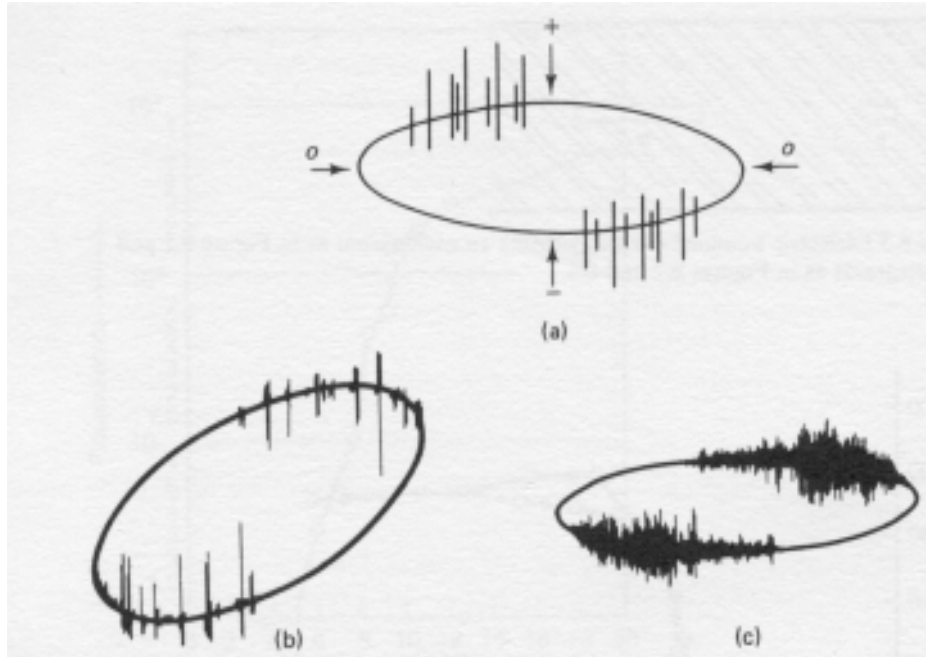
1. General aspects

2. Economic rules

3. Influencing factors

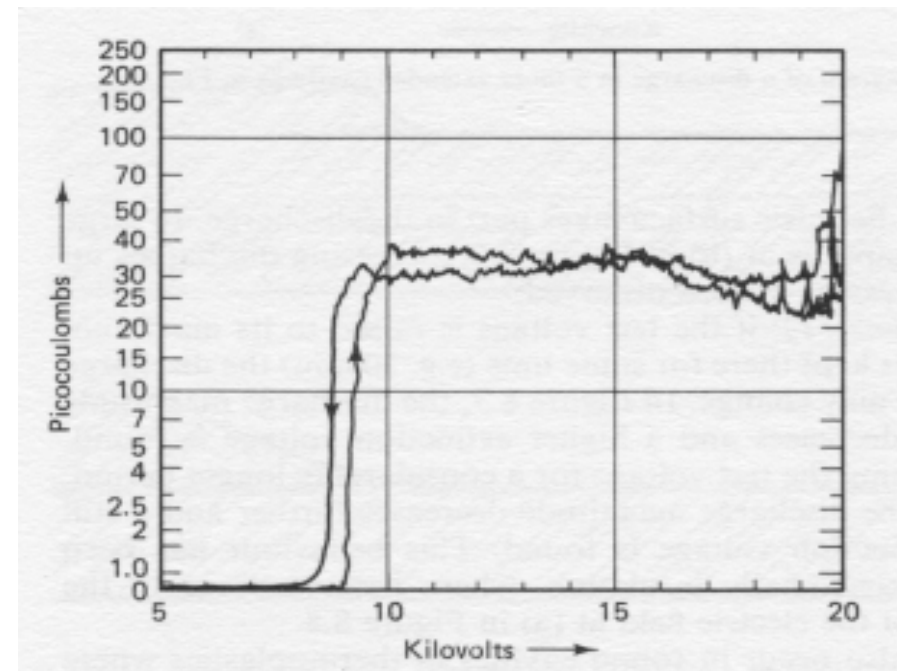
4. Insulation condition assessment rules

5. Conclusions

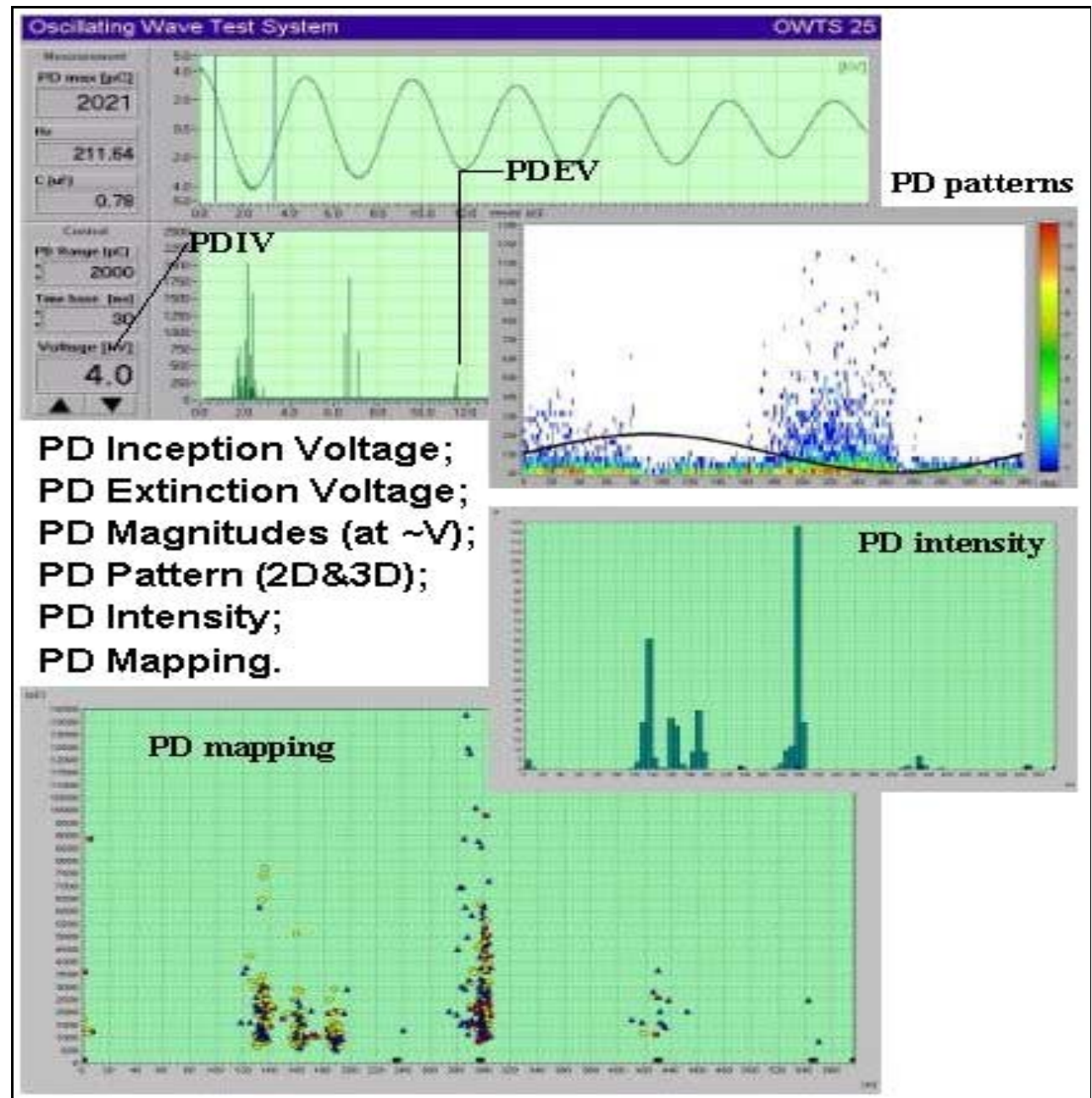


[Source: CIGRE 1961]

Partial discharges are a very sensitive indicator for the detection of insulation problems.

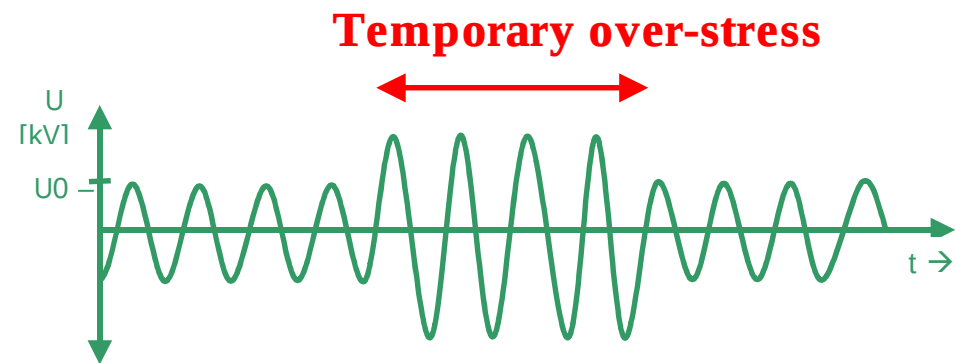
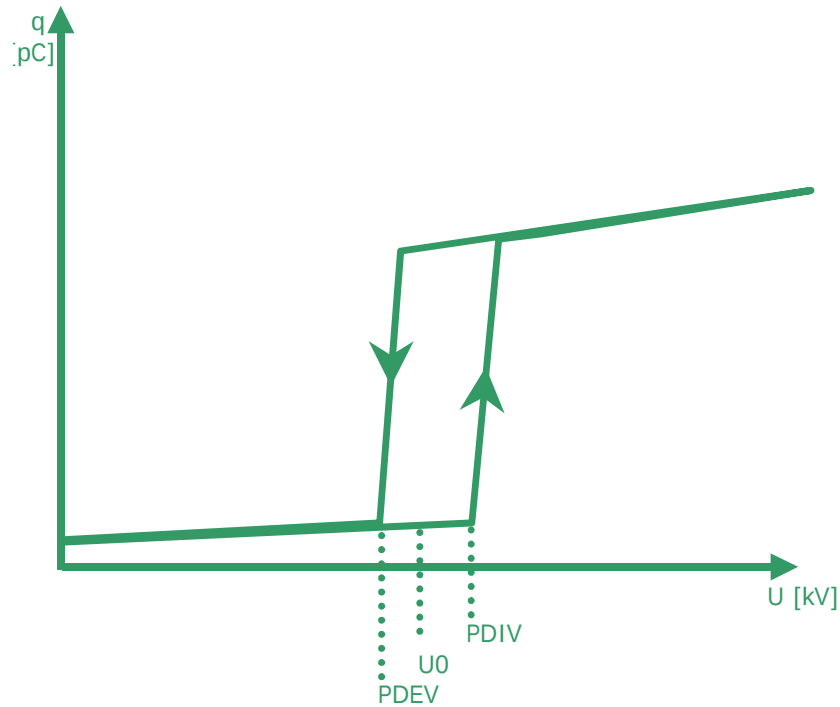


OWTS finger print



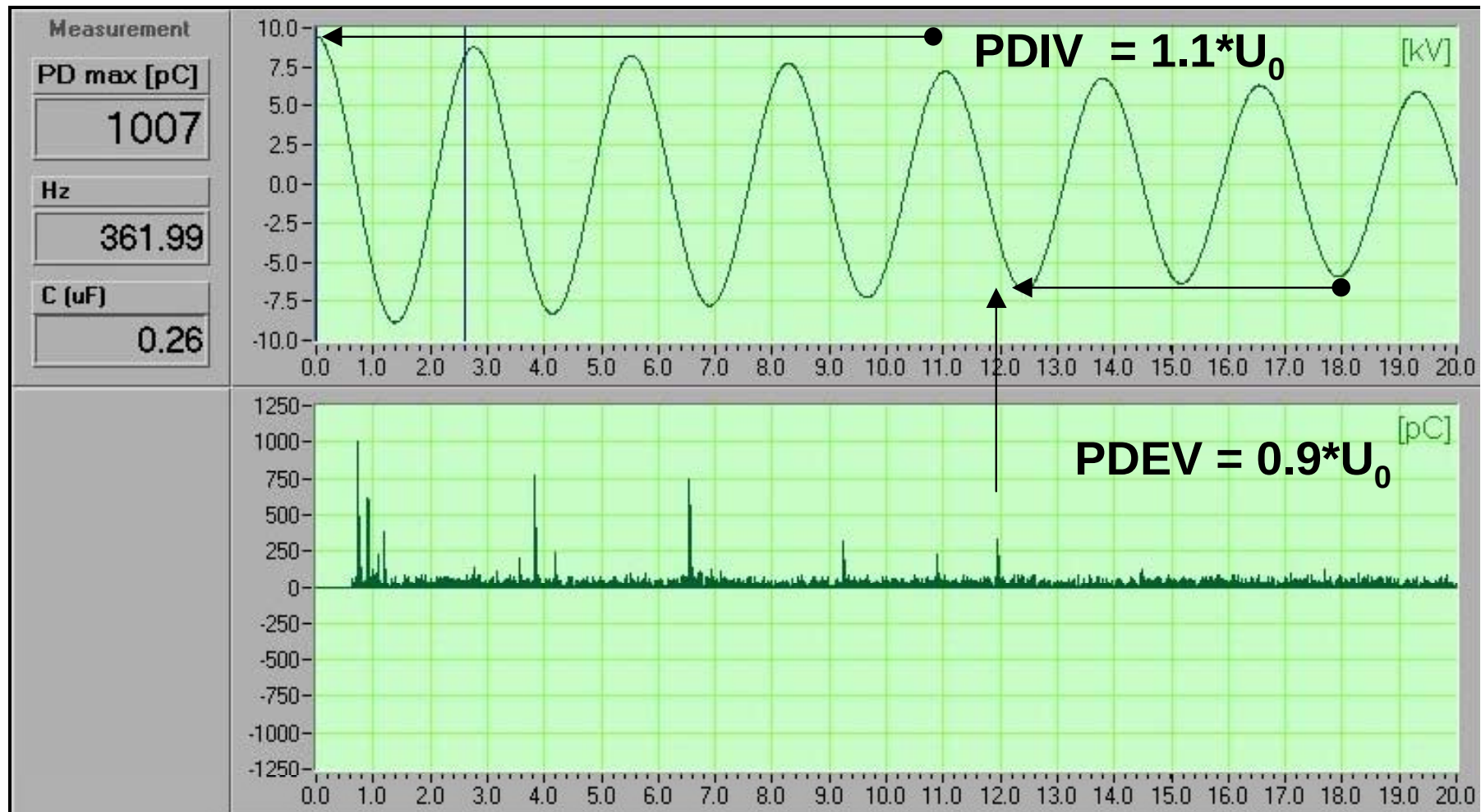
OWTS method Interpretation rules for PD diagnostics on power cables		
Inception & Extinction Voltage	<i>> cable operating voltage</i>	<i>< cable operating voltage</i>
PD magnitude	<i>< typical values (e.g. < 4000 pC)</i>	<i>> typical values (e.g. < 4000 pC)</i>
PD intensity	<i>Low (e.g. < 5 pulses/period)</i>	<i>High (e.g. < 5 pulses/period)</i>
PD pattern	<i>harmful fault type</i>	<i>less harmful fault type</i>
PD location	<i>cable insulation</i>	<i>cable accessories</i>
PD mapping	<i>PD concentration</i>	<i>scattered PD location</i>

Analysis influencing factors; operation over-stresses

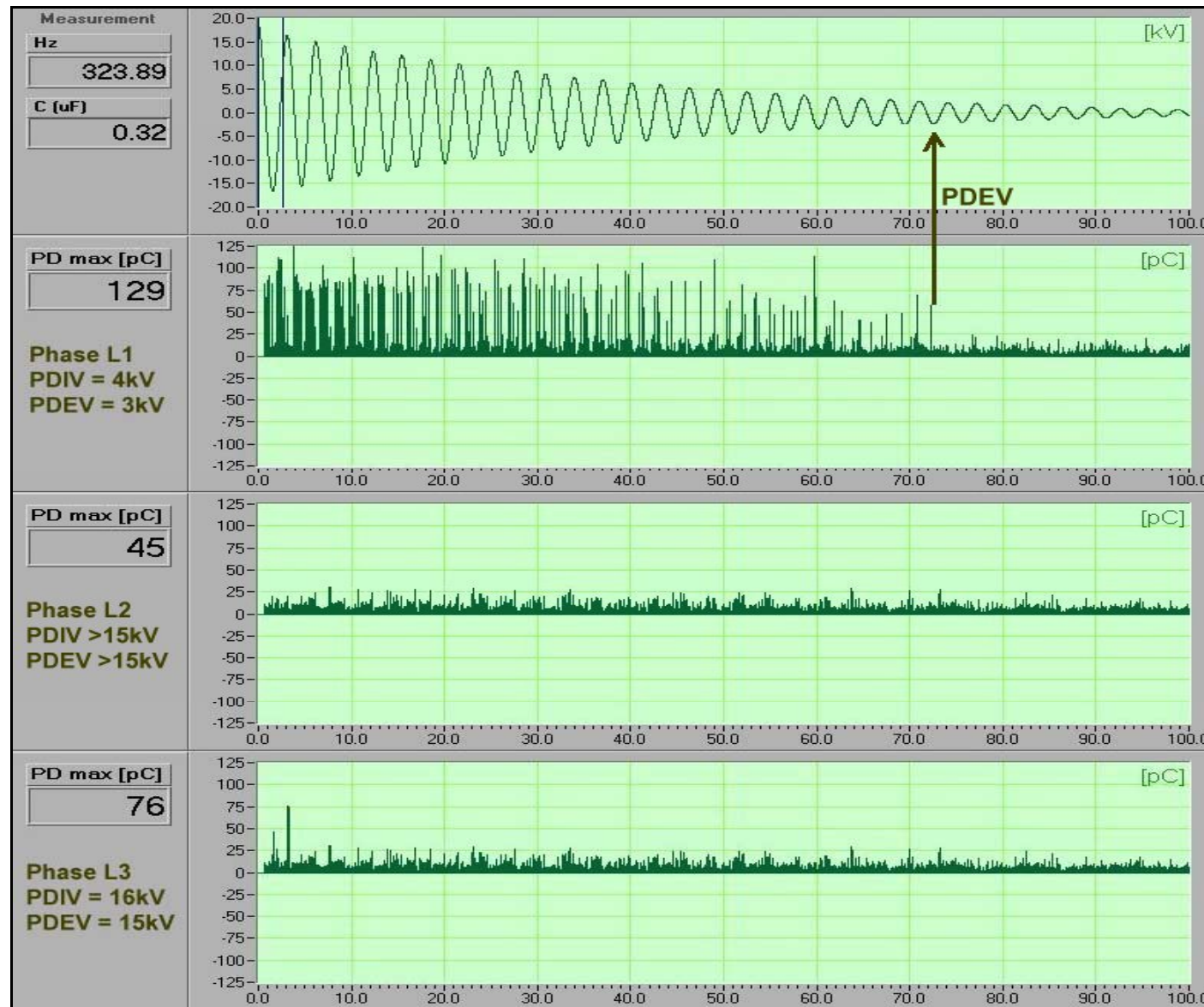


PD measuring result where

$\text{PDIV} = 1.1 U_0$ is just above U_0 and $\text{PDEV} = 0.9U_0$ is just below U_0 .



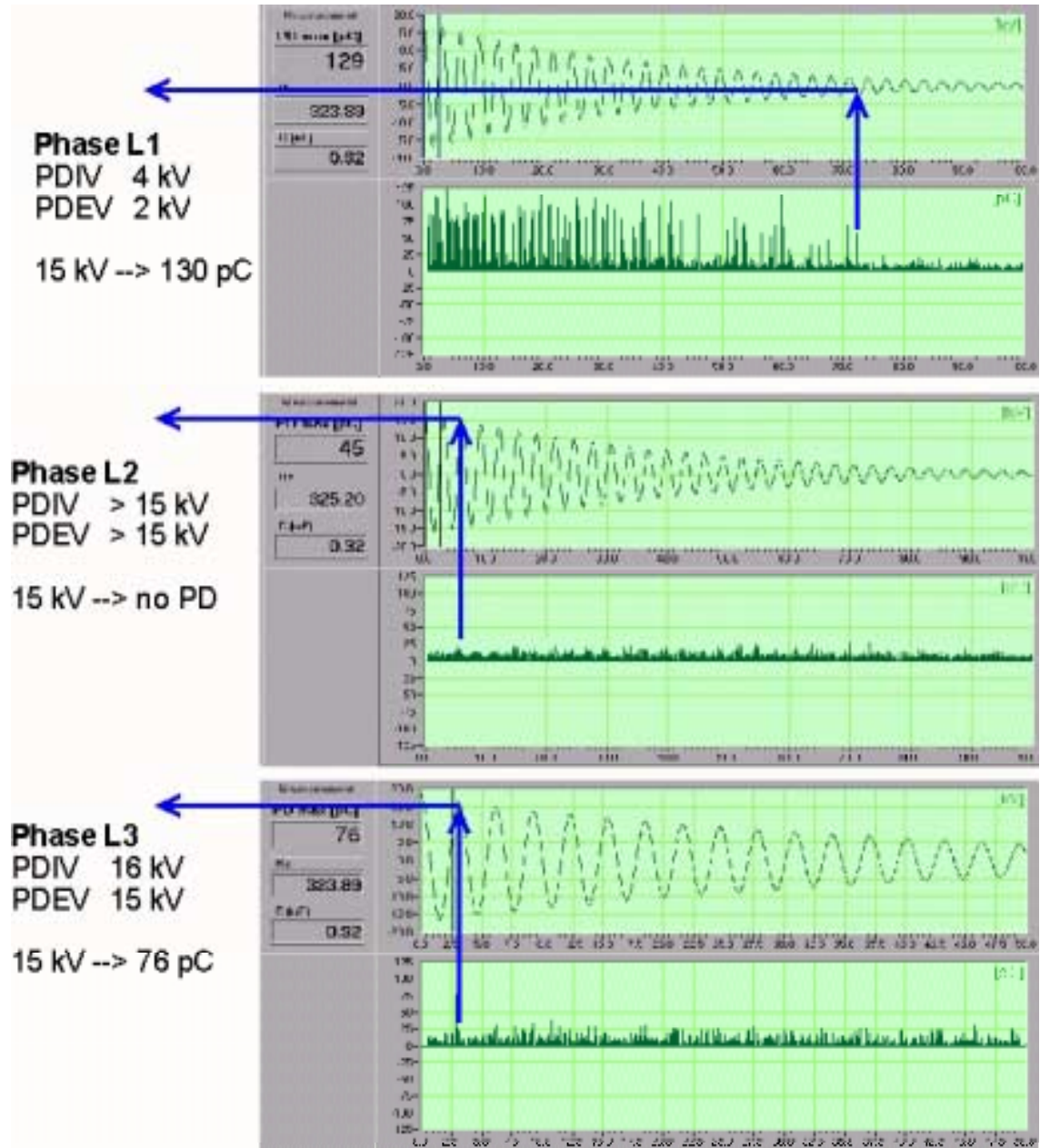
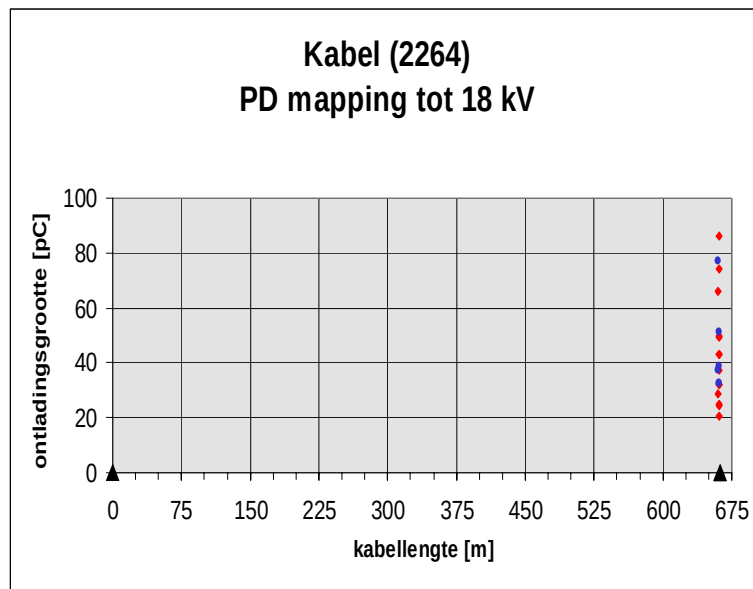
PD test results obtained from three phases of a 662 m 10kV power cable. Phase L1 shows the presence of a PD source.



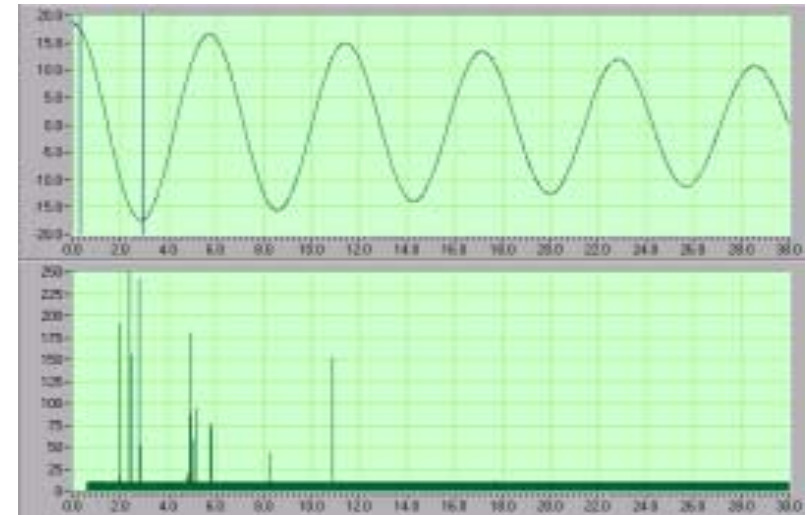
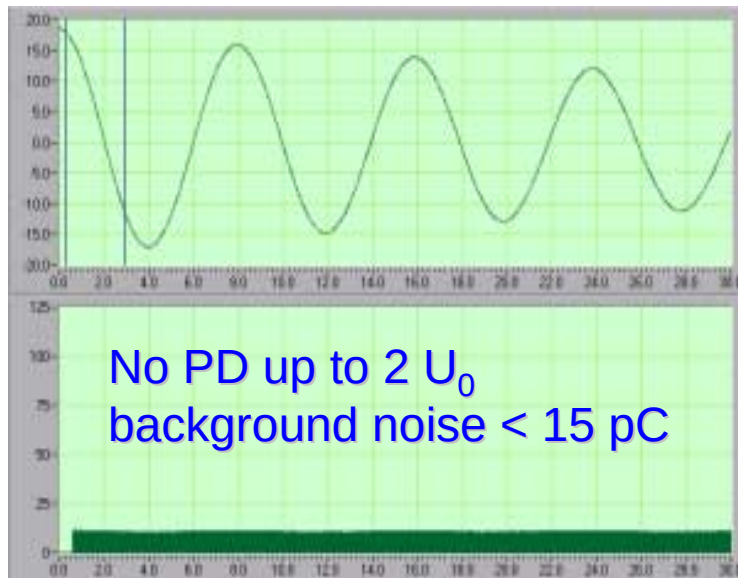
After-laying test

Cable: 6 kV XLPE
Length: 662m

Phase L1: PD in a large flat cavity in the termination



After-laying test

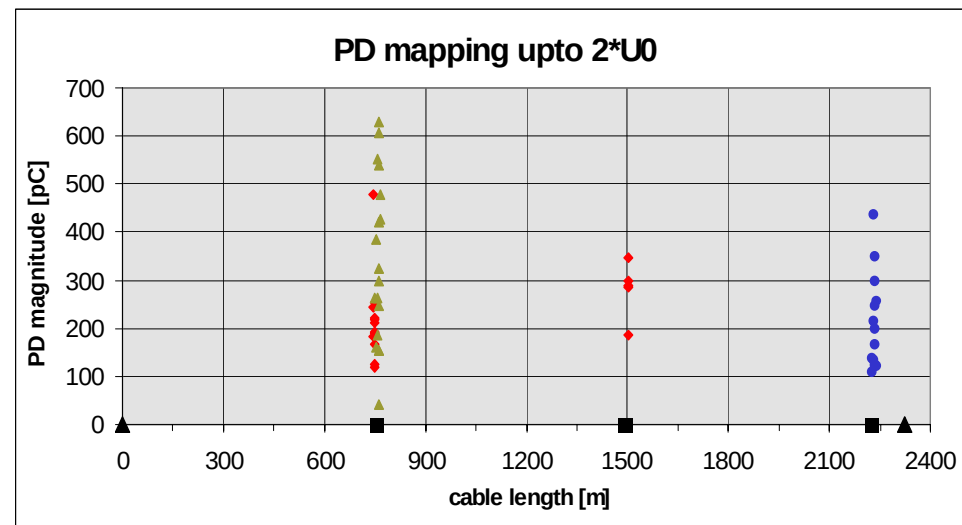


L1: 480pC; PDIV = 2.6 U₀; PDEV = 2.3 U₀

L2: 600pC; PDIV = 2.5 U₀; PDEV = 2 U₀

L3: 440pC; PDIV = 2.6 U₀; PDEV = 2 U₀

Cable: 6 kV XLPE
Length: 2322m

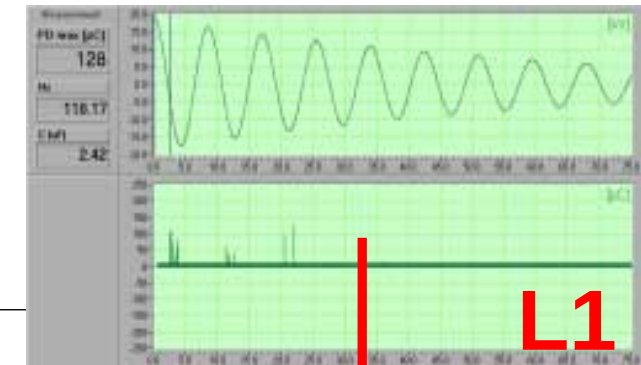
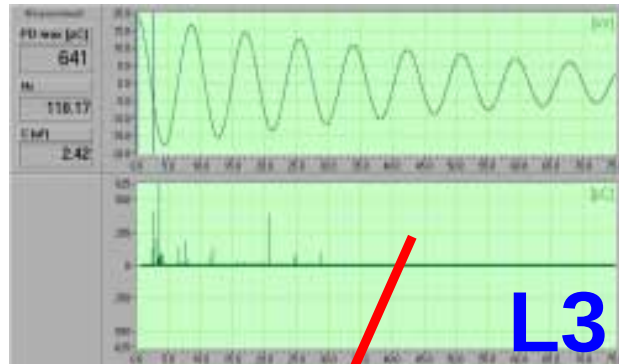


PD analysis and location of multiple discharge sites

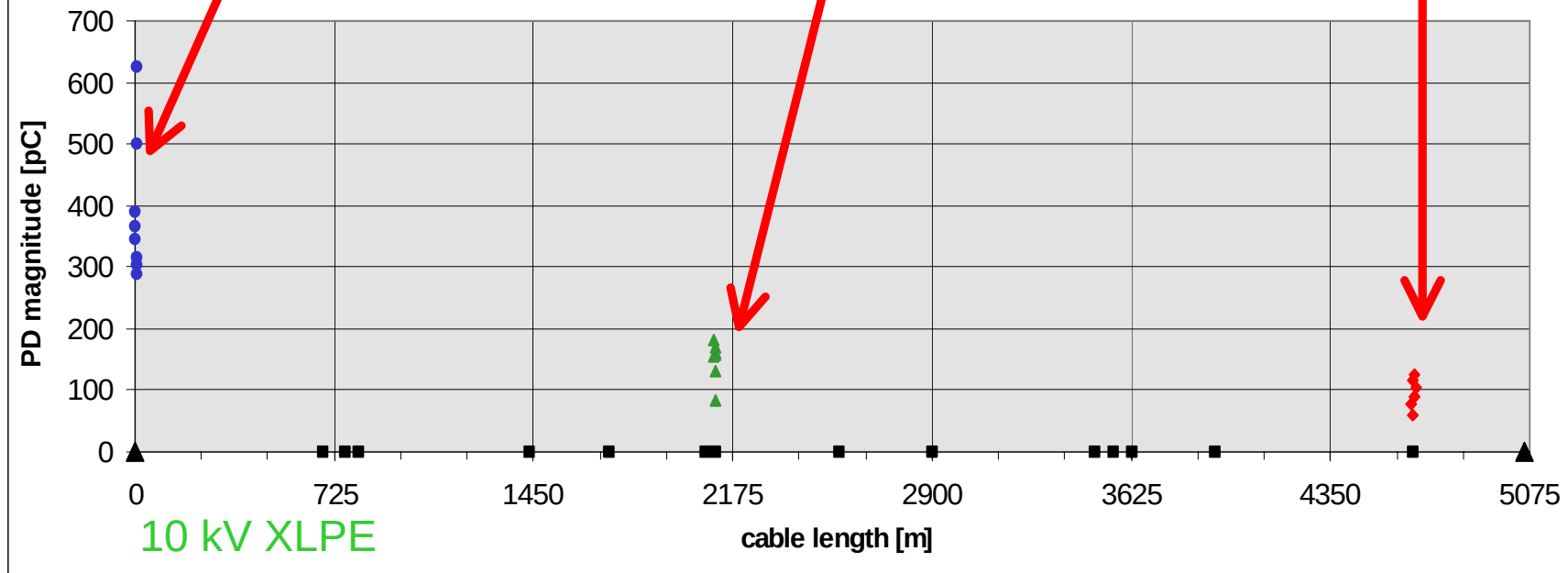
PDIV=15kV PDEV=11kV
15kV -> 50pC 18kV -> 100pC

PDIV=6kV PDEV=10kV
6kV -> 200pC 18kV -> 200pC

PDIV=12kV PDEV=12kV
12kV -> 220pC 18kV -> 800pC

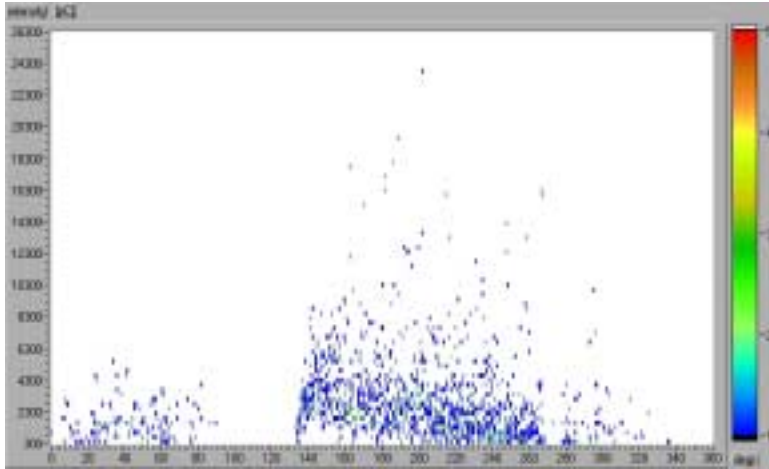


PD mapping upto 18 kV

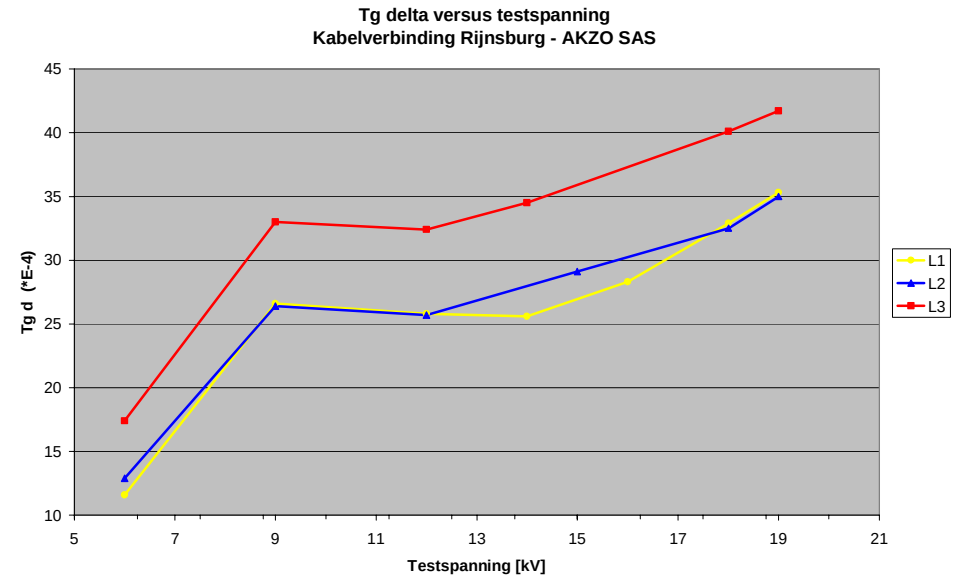
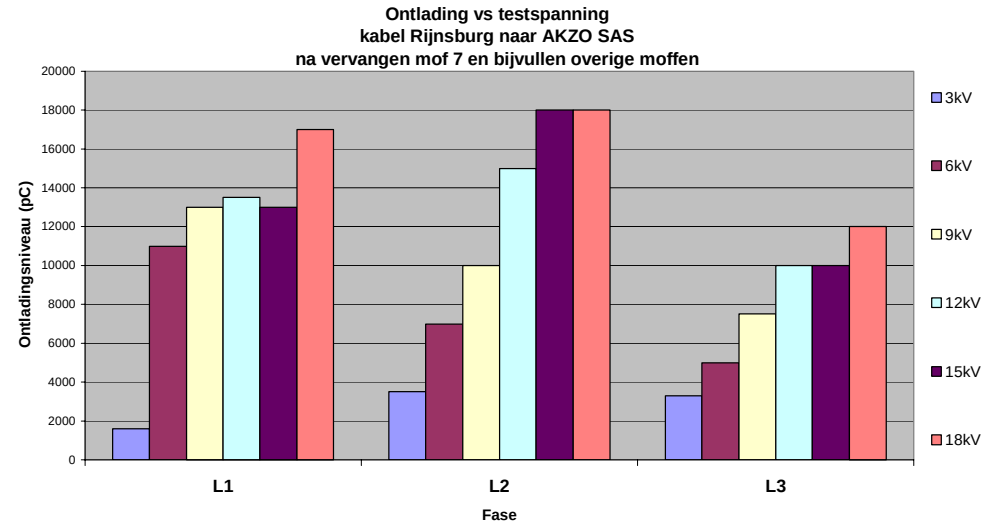


Condition assessment (1)

10 kV PILC cable; 3200m



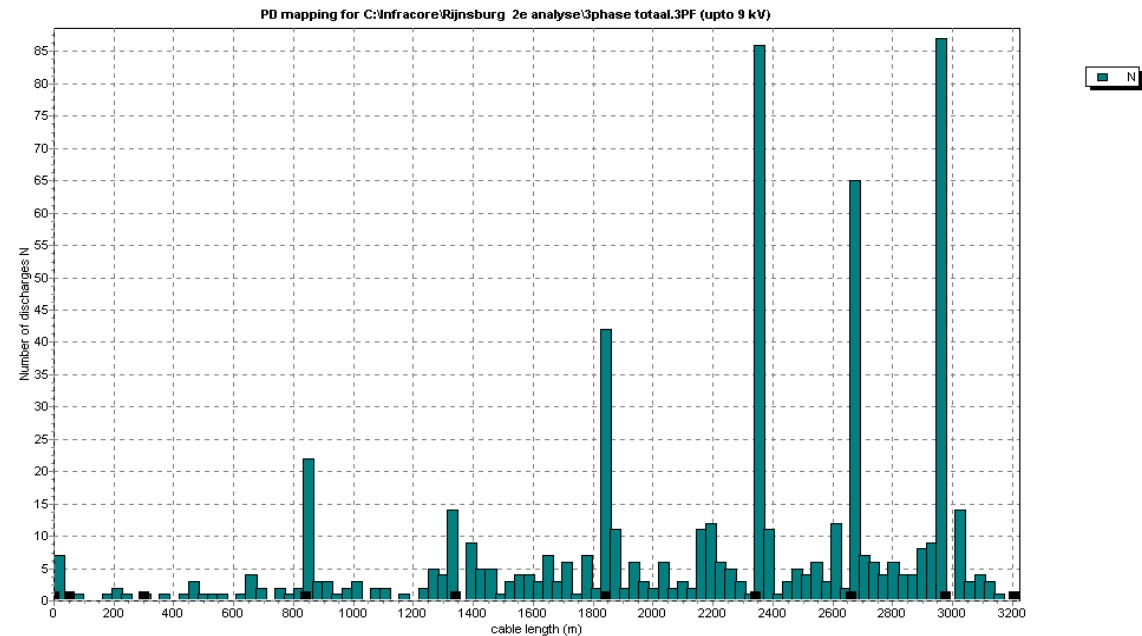
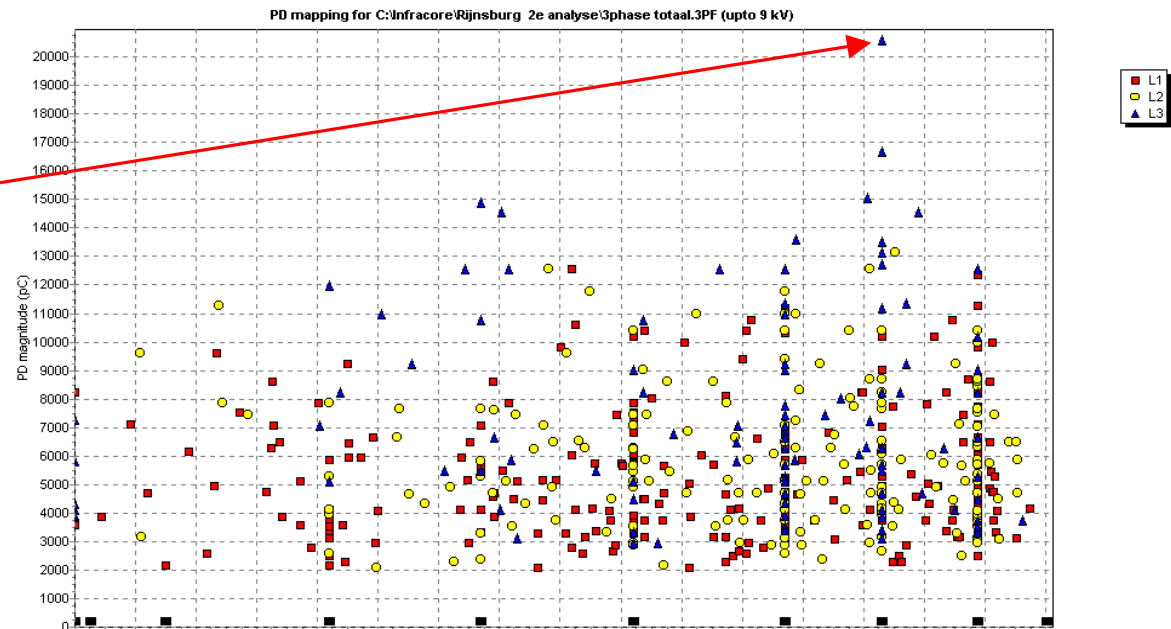
- 1) L1, L2, L3 no significant difference;
- 2) large discharging gap(s) on insulation interfaces;
- 3) defect between outer screen and HV insulation;
- 4) No significant aging due to low $\tan \delta$ value



Condition assessment (2)

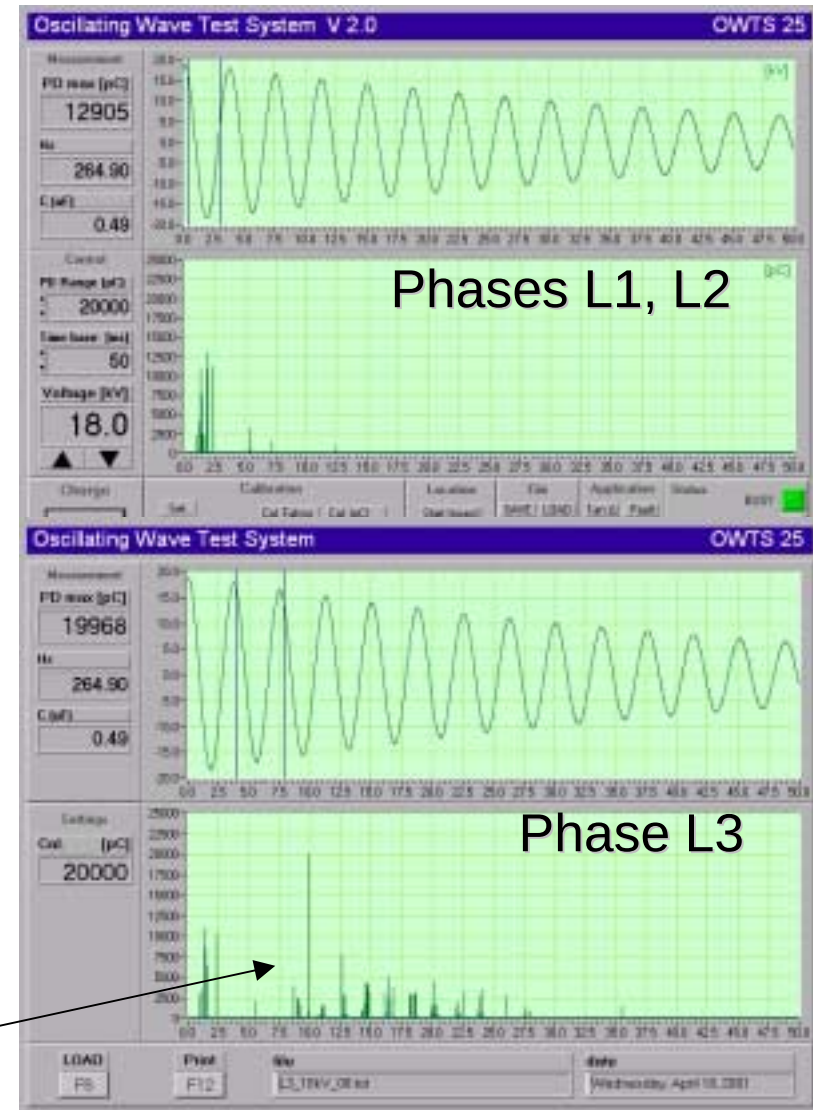
Splice No. 7

Defect: High PD concentration in oil-filled splices in a 3200m long 10kV PILC cable;



Laboratory investigation of a splice No. 7 removed from the service due to high PD concentration (3200m long 10kV PILC)

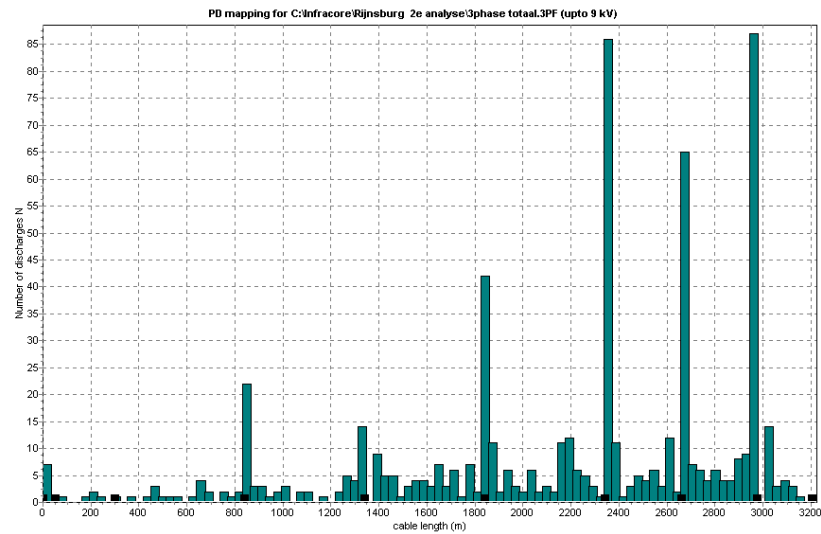
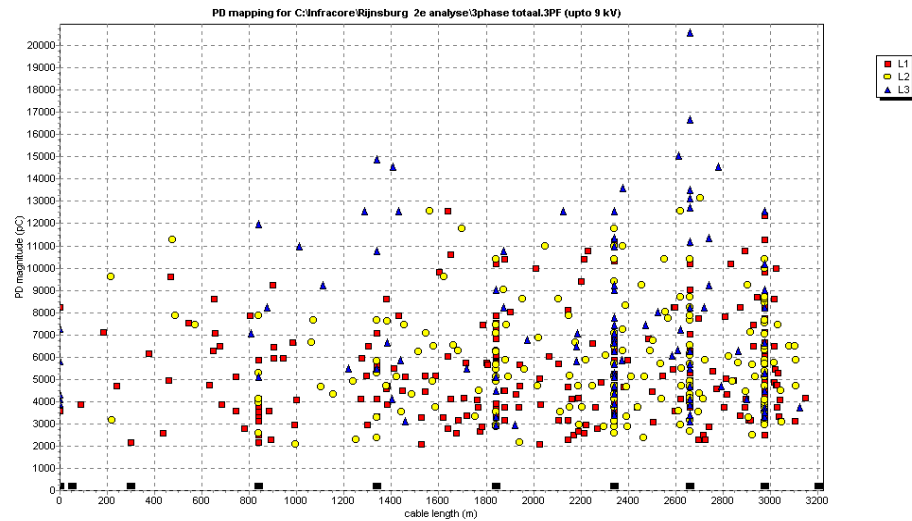
PD pattern observed at OWTS



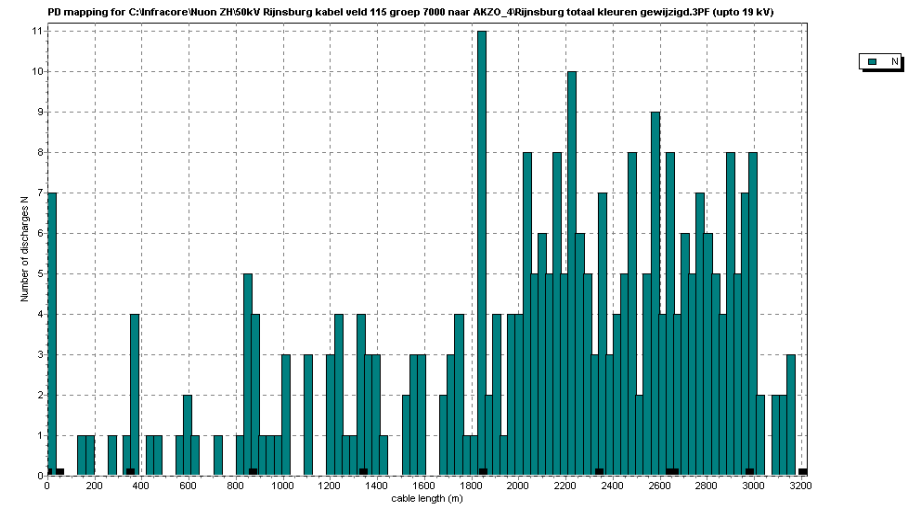
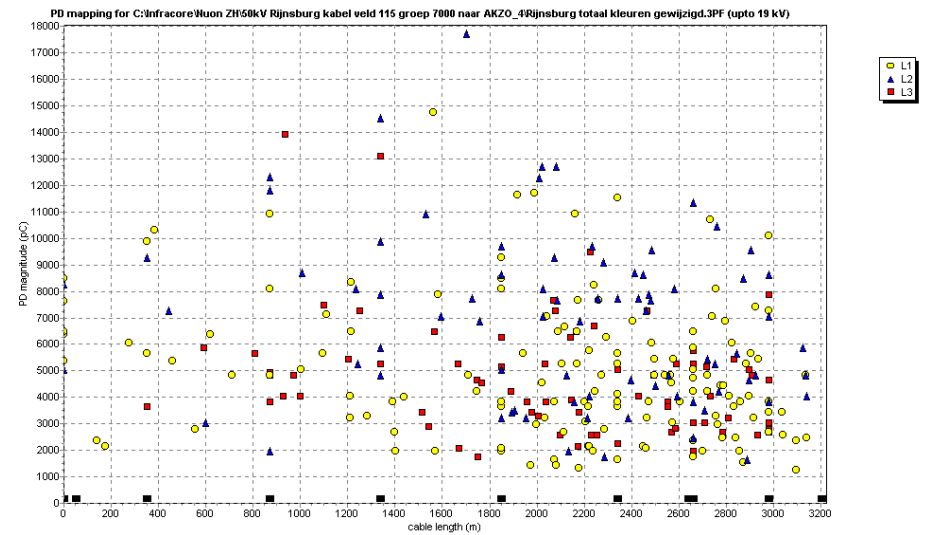
**Re-inception of PD's
only in phase L3
indicates an additional
discharging defect**

Condition assessment (3)

PD activity before the maintenance

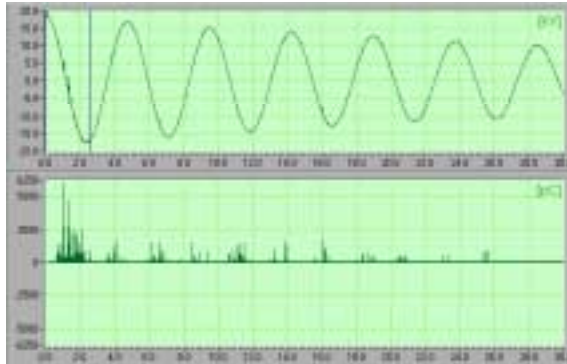


PD activity after the maintenance

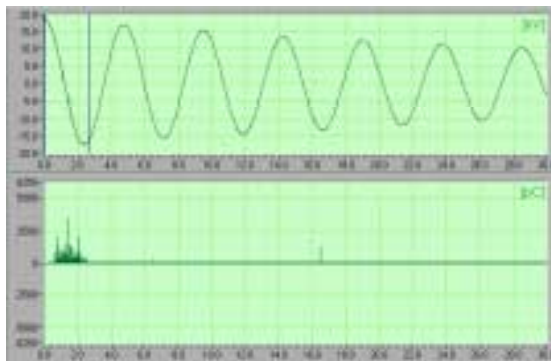


Pattern analysis

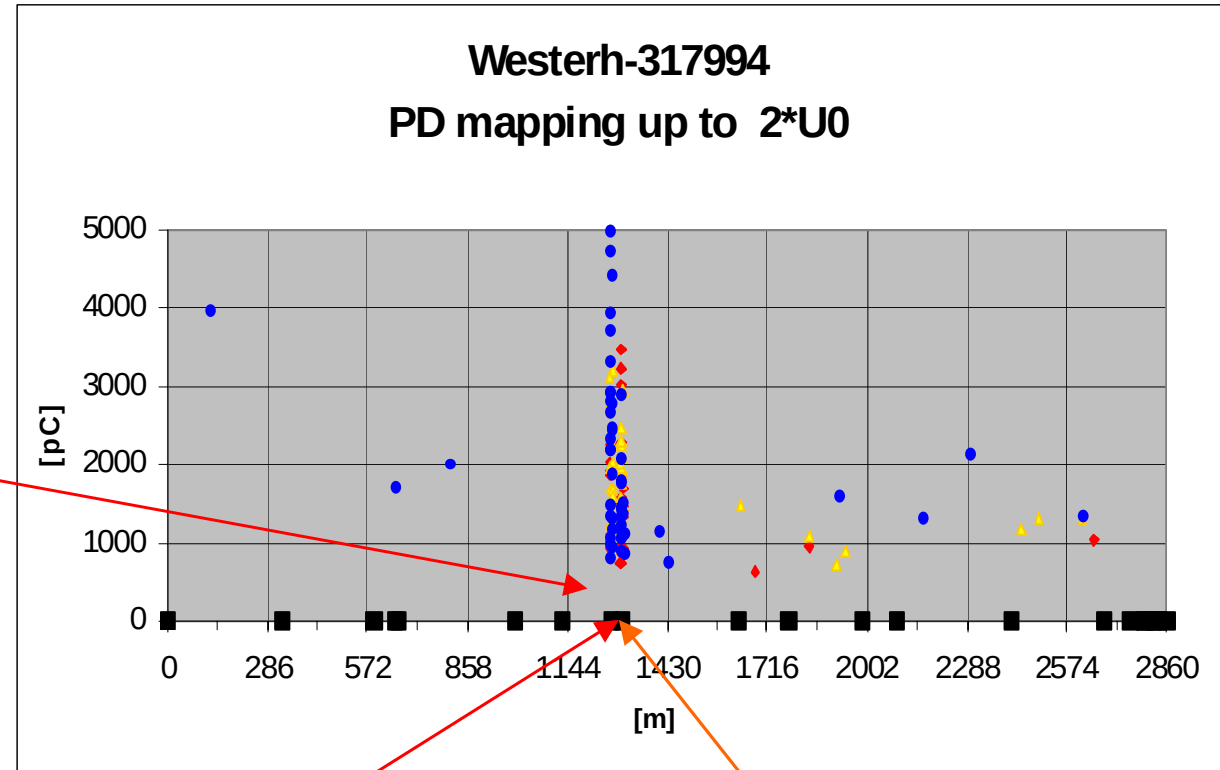
2860m long 10kV PILC



**L3 joint at 1268m:
epoxy resin type**



**L2 joint at 1301m:
oil filled type**



**L1 joint at 1301m:
oil filled type**



PD diagnostics

PD occurrence at different voltage levels measured on 4 short length PILC power cables.

Cable 1 230 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
U ₀	–	–	–
1.5 U ₀	1700	1200	–
2 U ₀	3000	3000	–

PDIV > U₀
PD at 2U₀ ~ 3 nC
Status: o.k.

Cable 2 260 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
0.5 U ₀	3200	3850	3100
U ₀	3900	4200	4300
1.5 U ₀	4200	4700	5100
2 U ₀	4800	4700	5900

PDIV < U₀
PD at 2U₀ ~ 5 nC
Status: ??

Cable 3 260 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
U ₀	–	–	–
1.5 U ₀	–	1250	–
2 U ₀	–	2000	–

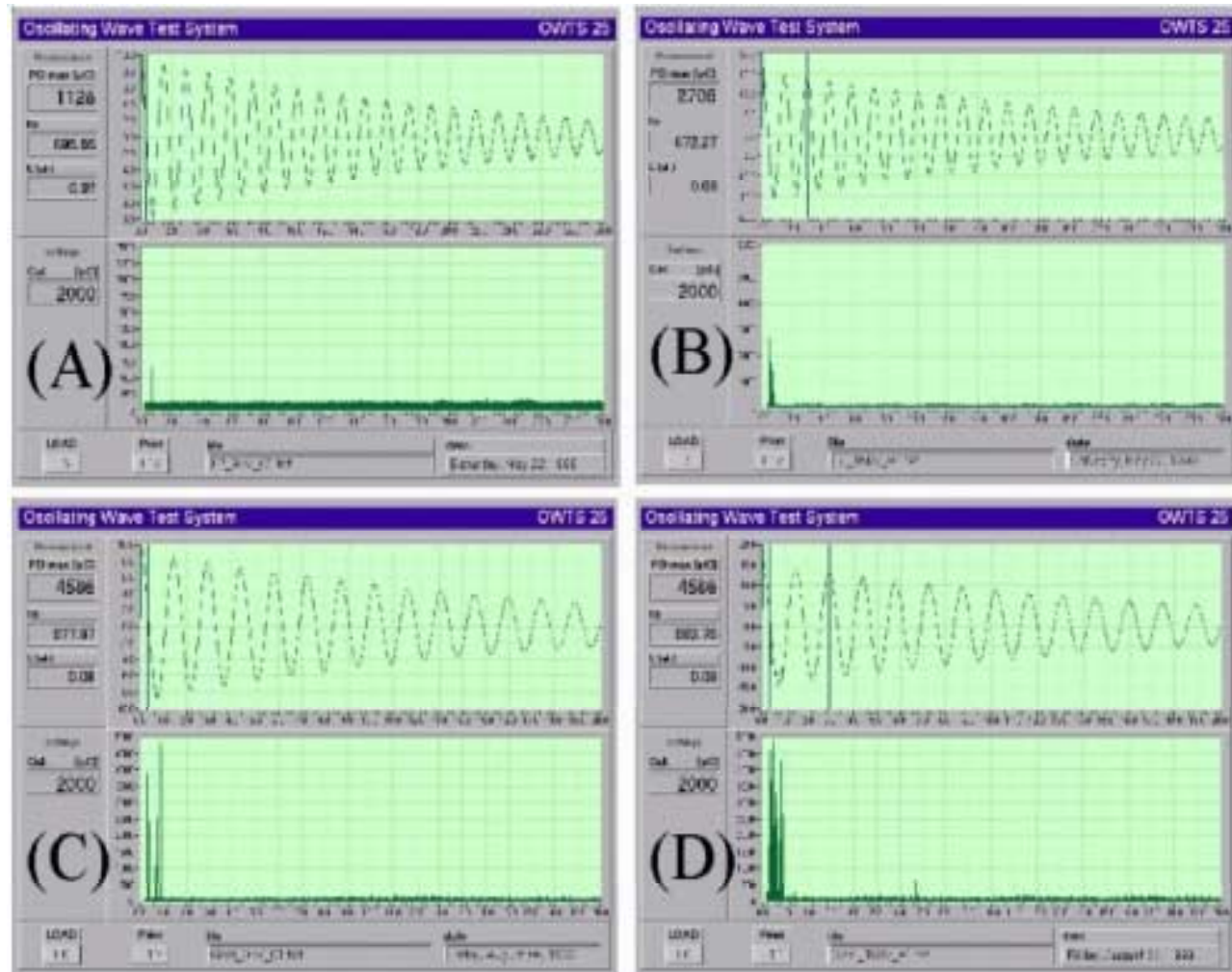
PDIV > U₀
PD at 2U₀ ~ 2 nC
Status: o.k.

Cable 4 30 m	L1 (pC)	L2 (pC)	L3 (pC)
U ₀	–	–	–
1.5 U ₀	–	–	–
2 U ₀	3200	2700	–

PDIV > 1.5U₀
PD at 2U₀ ~ 3 nC
Status: o.k.

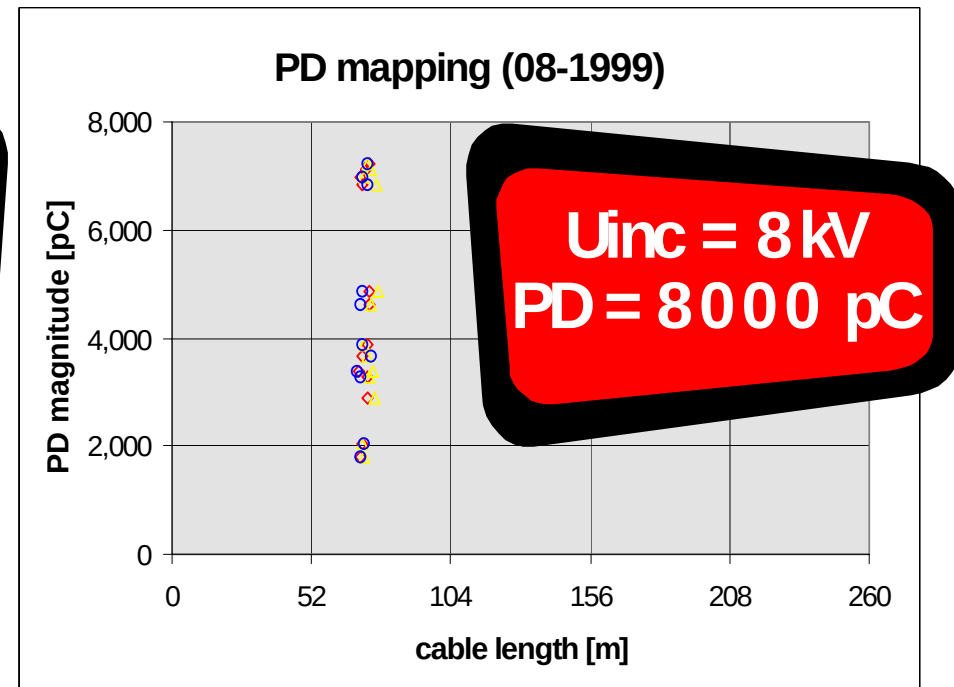
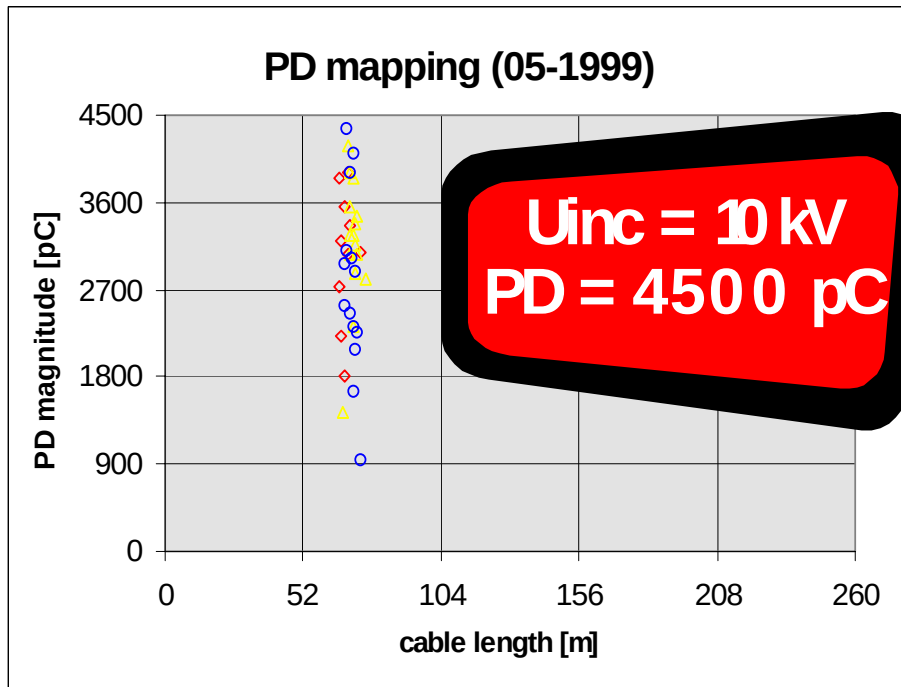
PD time analysis

3-core PILC; 260m



(A) at U_0 ;	PD = 1 nC;	N_{PD} = low
(B) at $2U_0$;	PD = 2.7 nC;	N_{PD} = low
(C) at U_0 3 months later;	PD = 4.5 nC;	N_{PD} = high
(d) at $2U_0$ 3 month later;	PD > 4.5 nC;	N_{PD} = high

Data base analysis: time analysis

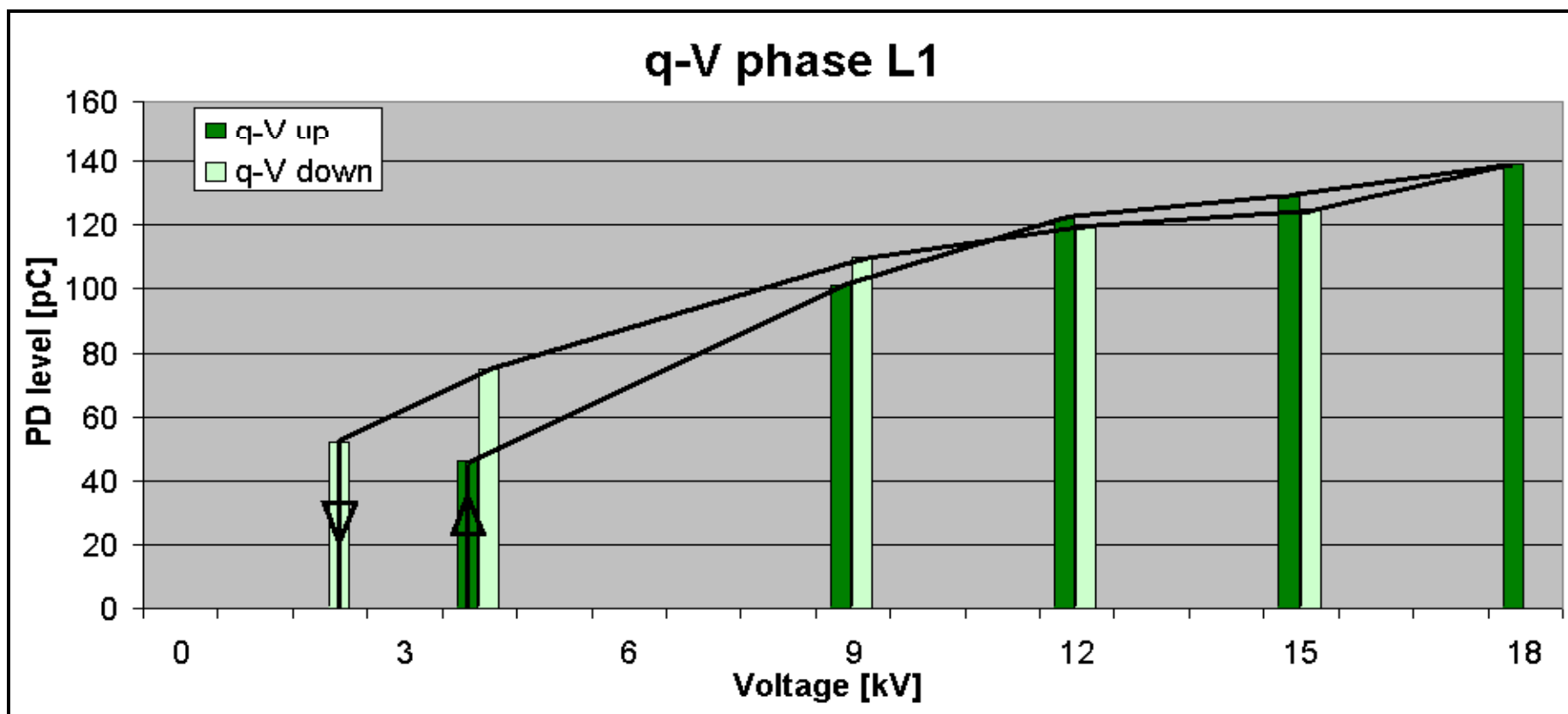


Due to the decrease in the PD inception voltage and the increase in the PD magnitude between the measurements with a time interval of three months, it was clear that the insulation PILC at 90 m was degrading.

Trending two diagnostics quantities PDIV and PD level; Green area means that the degradation process is not critical for the insulation; red area indicates increased risk of failure



q-V diagram of phase L1 of a 10kV power cable, with PD located in the near terminations. From the q-V diagram, the defect can be related to large flat cavities



PD knowledge rules: evaluation criteria's

Diagnostics of serviced aged cables and after-laying tests

PILC insulation

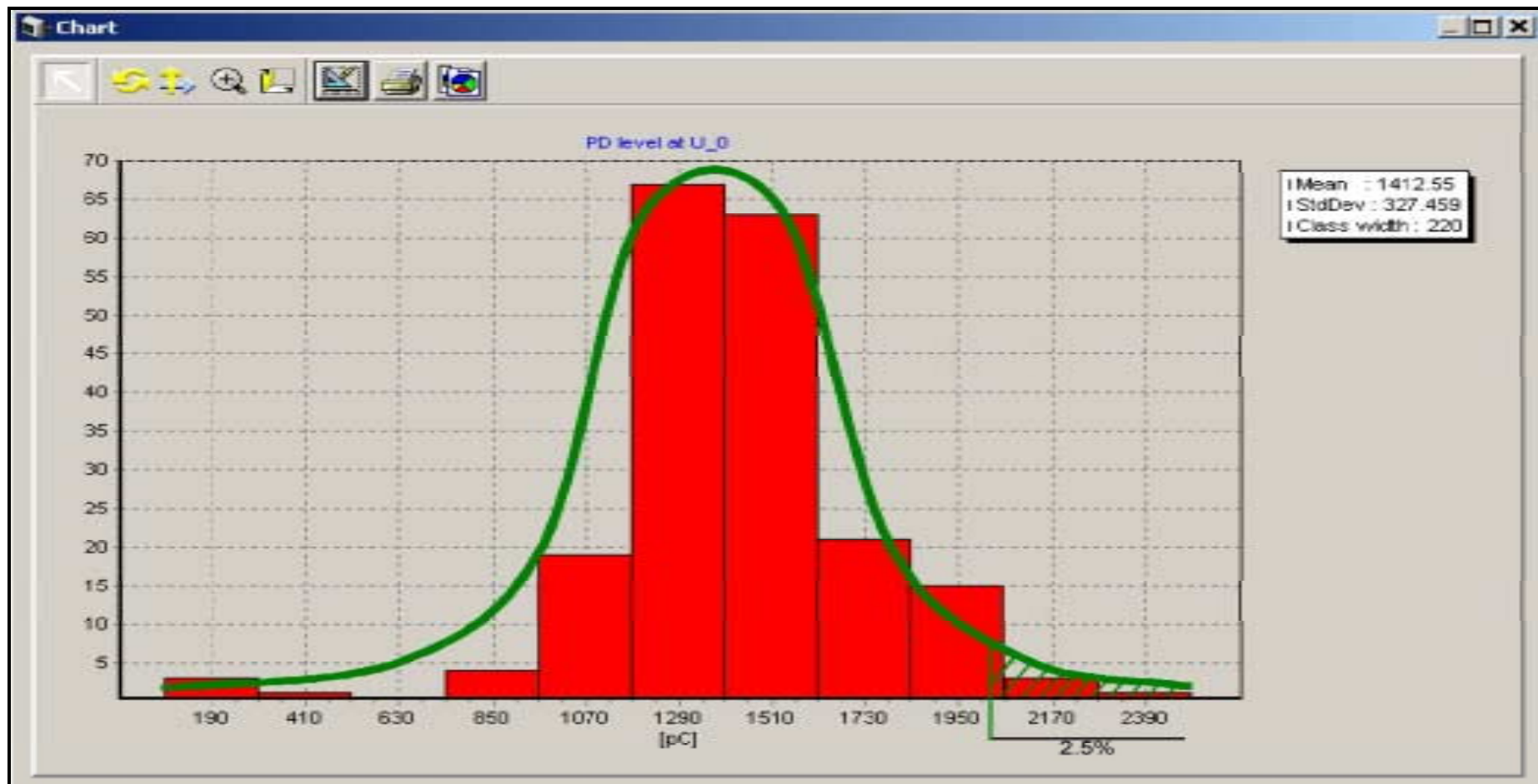
- Depending on the type of PD patterns / PD mappings certain levels of PD can be accepted in the cable insulation;
- Depending on the type of joint / termination, certain levels of PD can be accepted;
- $T_g \delta < 1e-2$.

XLPE insulation

- No PD in the cable insulation(*); on-site background noise level $< 20pC$;
- Depending on the type of joint / termination, certain levels of PD can be accepted(*);
- $T_g \delta < 1e-3$.

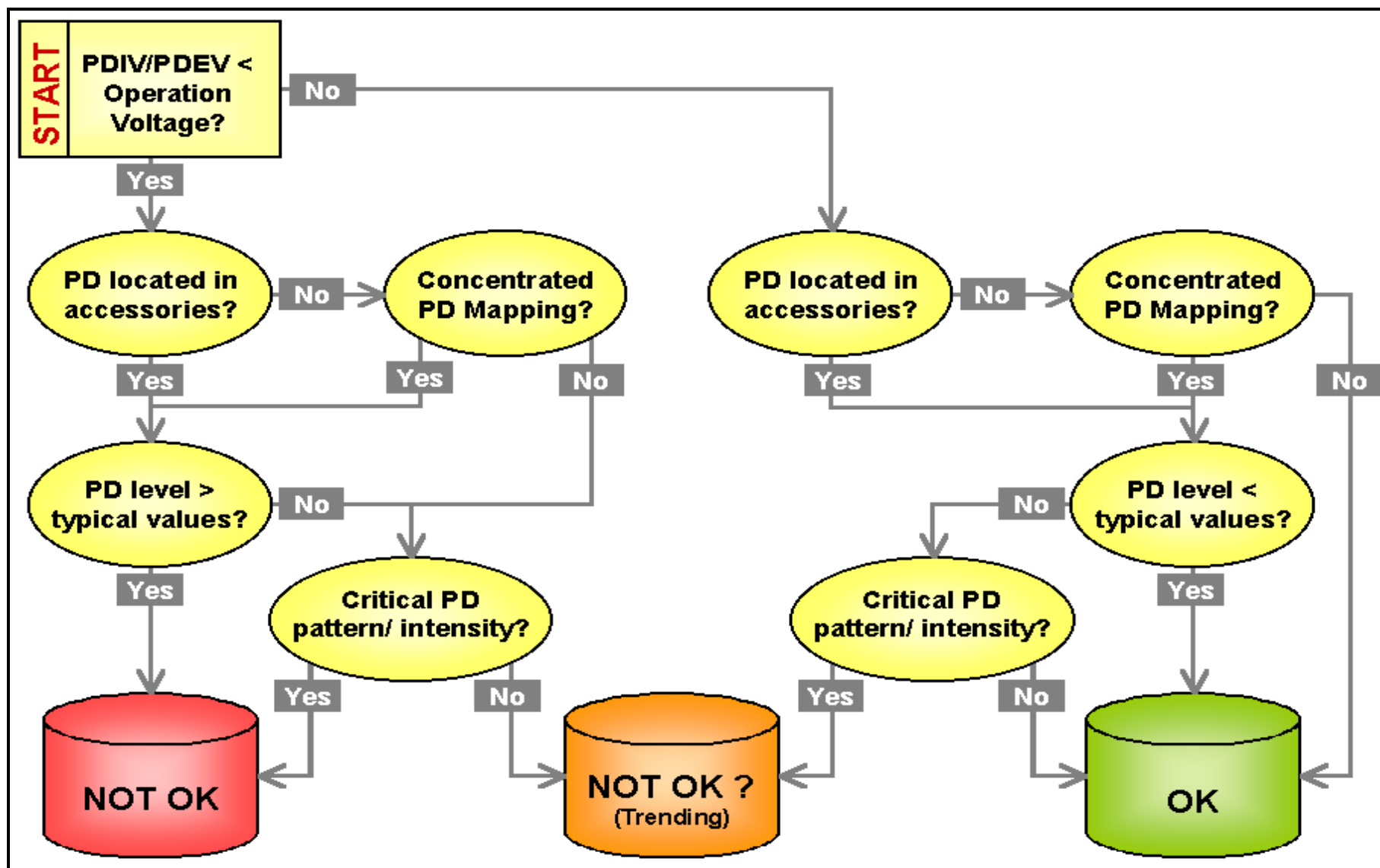
(*) PD free requirements when $PDI V > 1.3U_o$ and $PDEV > 1.1U_o$.

Example of knowledge rule generation by using databases; all detected PD levels from one type of component are reflected with the distribution



Indication of some typical PD levels for different types of cable insulation and accessories based on experiences from the Netherlands		
Cable element	Type	Trend values
insulation	PILC	10.000 pC
	XLPE	<20 pC
splices		
	Resin insulation	500 pC (<i>asymmetric</i>)
	Oil insulation	>10.000 pC
	Oil/resin insulation	5.000 pC
	Resin insulation	4.000 pC
terminations	Oil-termination	6.000 pC
	Dry termination	3.500 pC
	Shrink termination	250 pC

Decision diagram for diagnostic data analysis to categorises the insulation condition in one of the three condition classes



Example of cable classification				
Cable cat.	Description	Availability in service	Expected time for CBM (h/y)	Expected life time (years)
A	new cable in good condition	>99.9%	<24	>30
B	good condition but extra attention is required	>99%	<48	>25
C	stable situation, but moderate condition	>95%	<72	>15
D	In-stable situation	<90%	-	-
E	end of life	<75%	-	<3-5

Applicability of cable diagnostics

Medium- or High Voltage:		PLC		XLPE		XLPE/ PLC	
		mv	hv	mv	hv	mv	hv
Voltage tests							
DC test main insulation	*1						
AC test main insulation	AT			AT		AT	
Oscillating Voltage test	AT			AT		AT	
DC synthetic mantle test	AT/PQ			AT/PQ			
Dielectric measurements							
Tan δ measurement at 50 Hz	PQ			PQ		PQ	
Tan δ measurement at 0.1Hz				*4			
Oil analysis	n/a	PQ		n/a		n/a PQ	
RVM	*2			*3		*2	
Partial discharge measurements							
At 25-200 Hz test voltage	AT/PQ			AT/PQ		AT/PQ	
At 0.1 Hz test voltage(VLF)	AT/ PQ	*2		*5	*2	AT/ PQ *2	
Atj oscillating test volatge (OWTS)	AT/ PQ	*2		AT/PQ		AT/ PK *2	
High Frequency on-line	AT/PQ			AT/PQ		AT/PQ	

AT after laying test

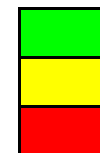
PM periodical quality measurement

*1 only at extruded insulation

*2 Not yet developed

*4 Only if water treeing is suspected

*5 Due to frequency dependency



Positive advice

Under discussion

Negative advice

*3 in development

n/a not applicable

Knowledge Rules for Condition Based Maintenance of Distribution Power Cables

CONTENT

1. General aspects

2. Economic rules

3. Influencing factors

4. Insulation condition assessment rules

5. Conclusions

Conclusions

- Studying **fault statistic** and providing visual inspection of disturbed components results in the identification of **dominant faults**. As most of these dominant faults will be PD related, PD measurements on power cables are a useful **diagnostic tool**;
- Using PD diagnostics, important information can be collected in the **PD ‘fingerprint’** of a cable section, containing PD inception/extinction voltage, PD levels, PD patterns and PD locations;
- **Standard interpretation rules** which are used in a decision diagram, can be used for optimal decision-making on the insulation condition of a cable section;
- **Trend-analysis and databases** are important tools for condition assessment.

Limitation and Pitfalls

1. Interpretation of the measured insulation condition is dependent upon the situation i.e. what is valid for one particular cable network situation is not necessarily applicable for another.
2. The network-owner has to accept a so-called “risk of failure”, based on the measured information and collected experience laid down in knowledge rules.
3. These knowledge rules prescribe the typical behavior of materials or combination of different materials under a particular service regime.
4. They are the basis of the recommendation criteria and they should avoid that all decision power about interpretation of measuring results has to be in the mind of the operator only.