

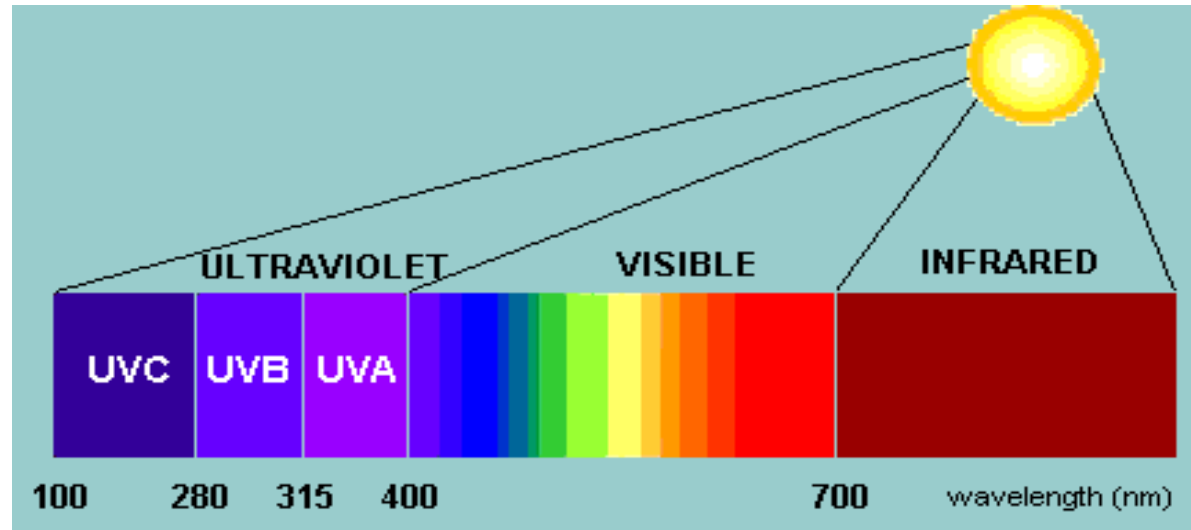
# „Dlouhodobé změny ozonové vrstvy nad územím České republiky“

*Projekt GA ČR č. P209/10/0058, nositel: ČHMÚ, 2010-2012*

Řešitelé:

K. Vaníček, M. Staněk (SOO HK), P. Skřivánková (NMK), L. Metelka (P-HK)

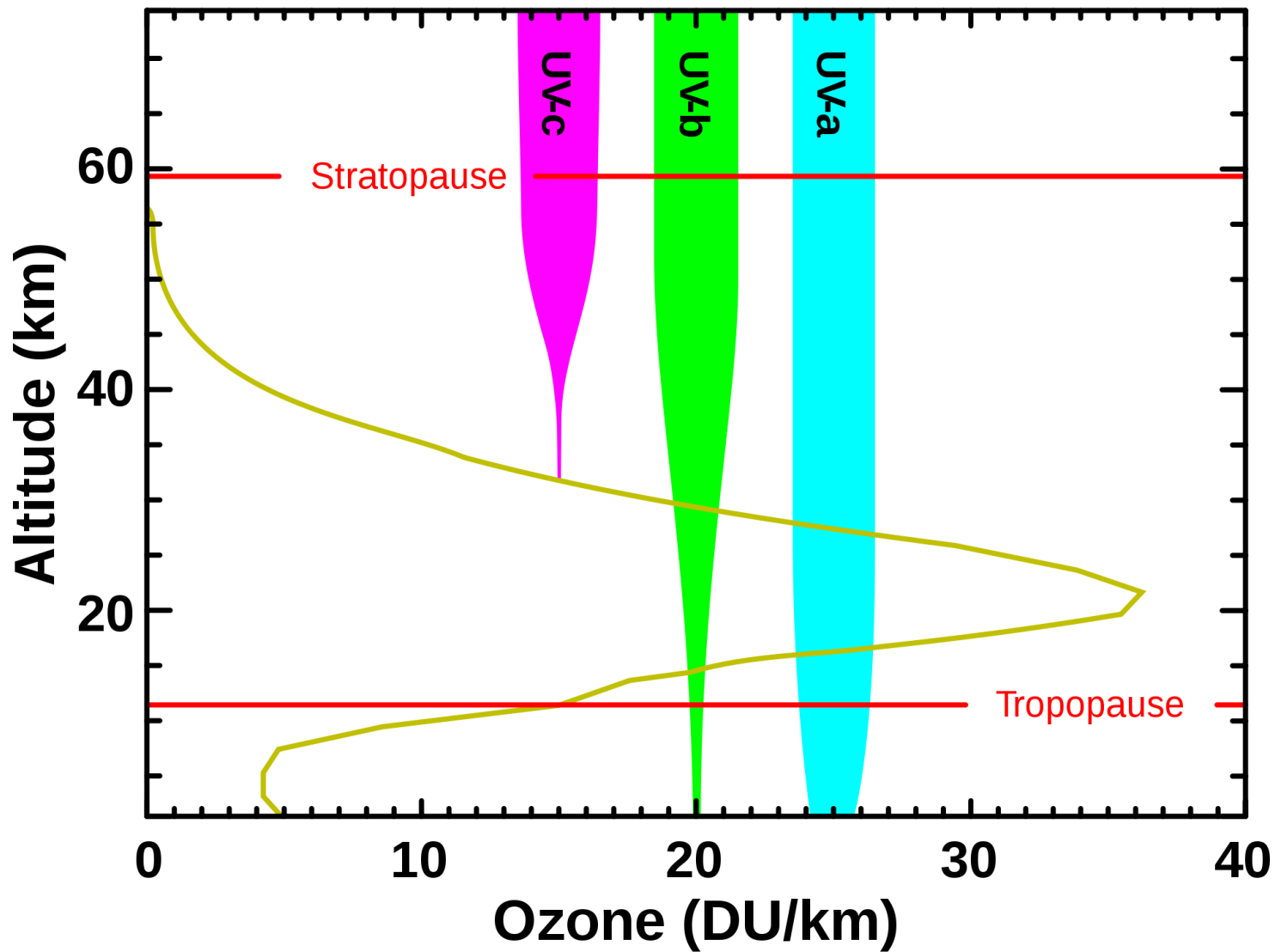
1. Ozon, jeho vznik a působení v atmosféře
2. Historie měření ozonu v ČR
3. Projekt „Dlouhodobé změny ozonové vrstvy nad územím ČR“
  - a) Adjustace časových řad
  - b) Doplnění chybějících dat, vliv doplnění na přesnost dlouhodobých průměrů
  - c) Modelování vlivu jednotlivých faktorů na celkový ozon
  - d) Změny vertikálního profilu ozonu
4. Shrnutí, závěry

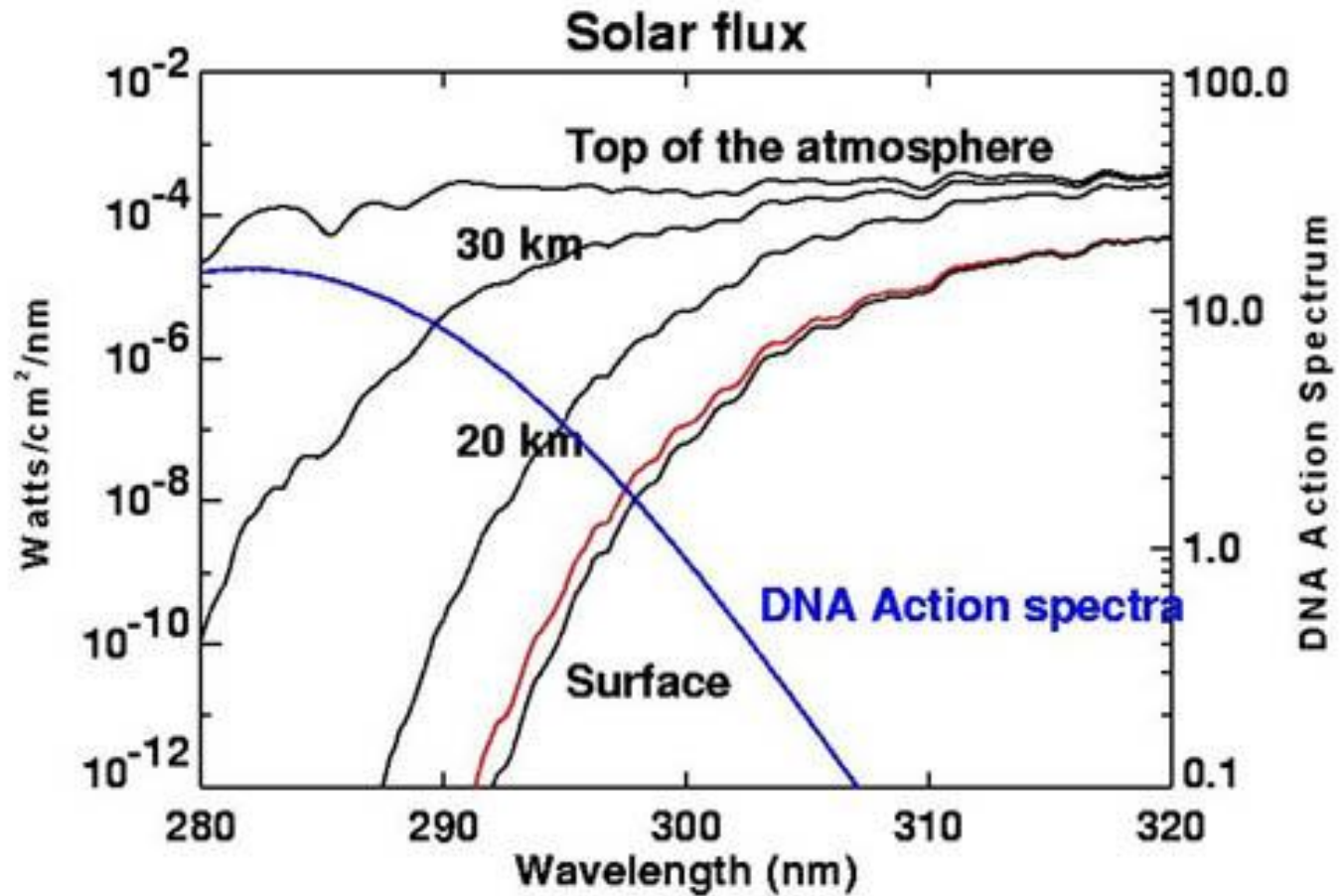


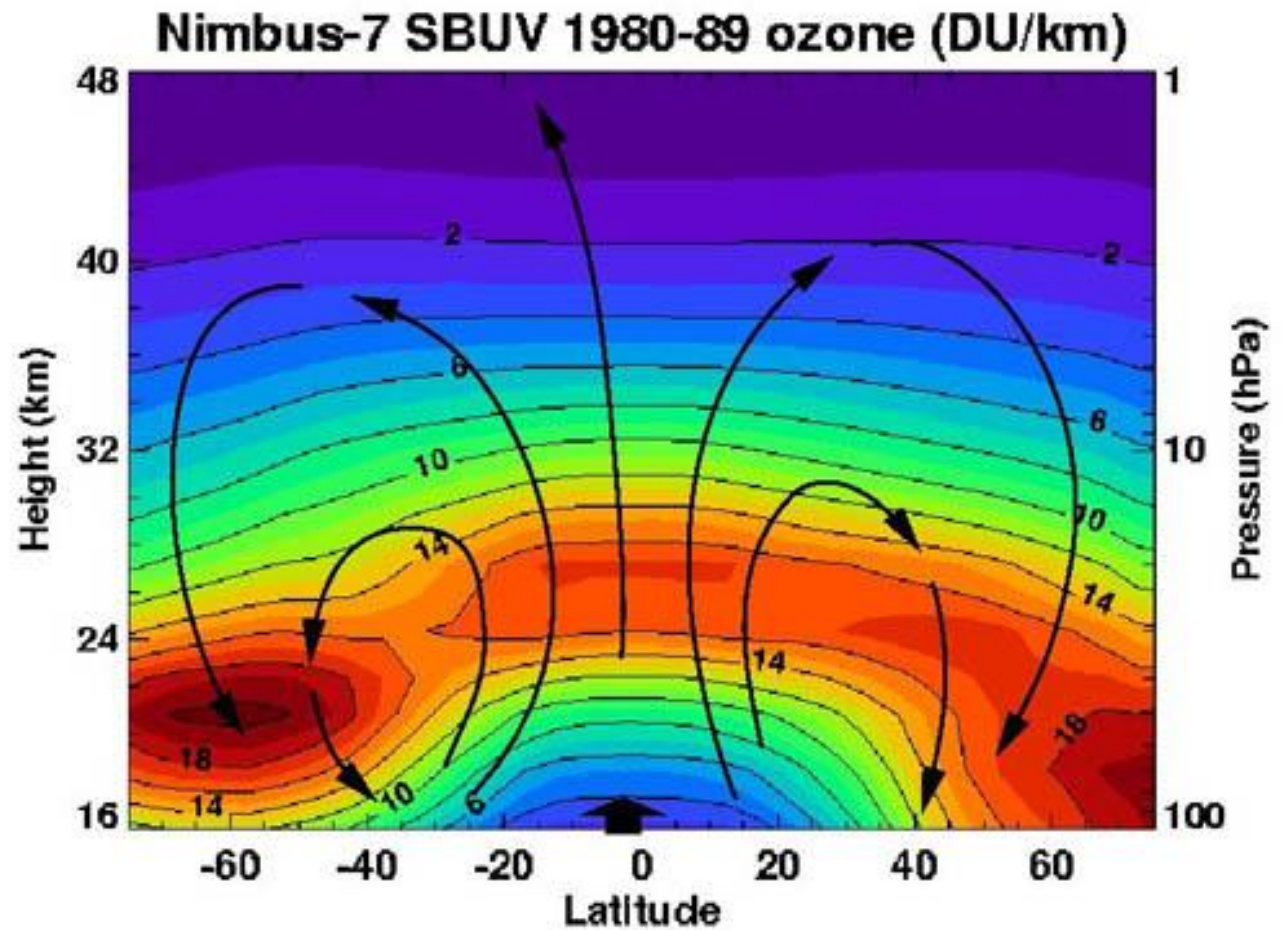
- UV-C: 100-280 nm, podílí se na vzniku ozonu, ve stratosféře zcela absorbováno



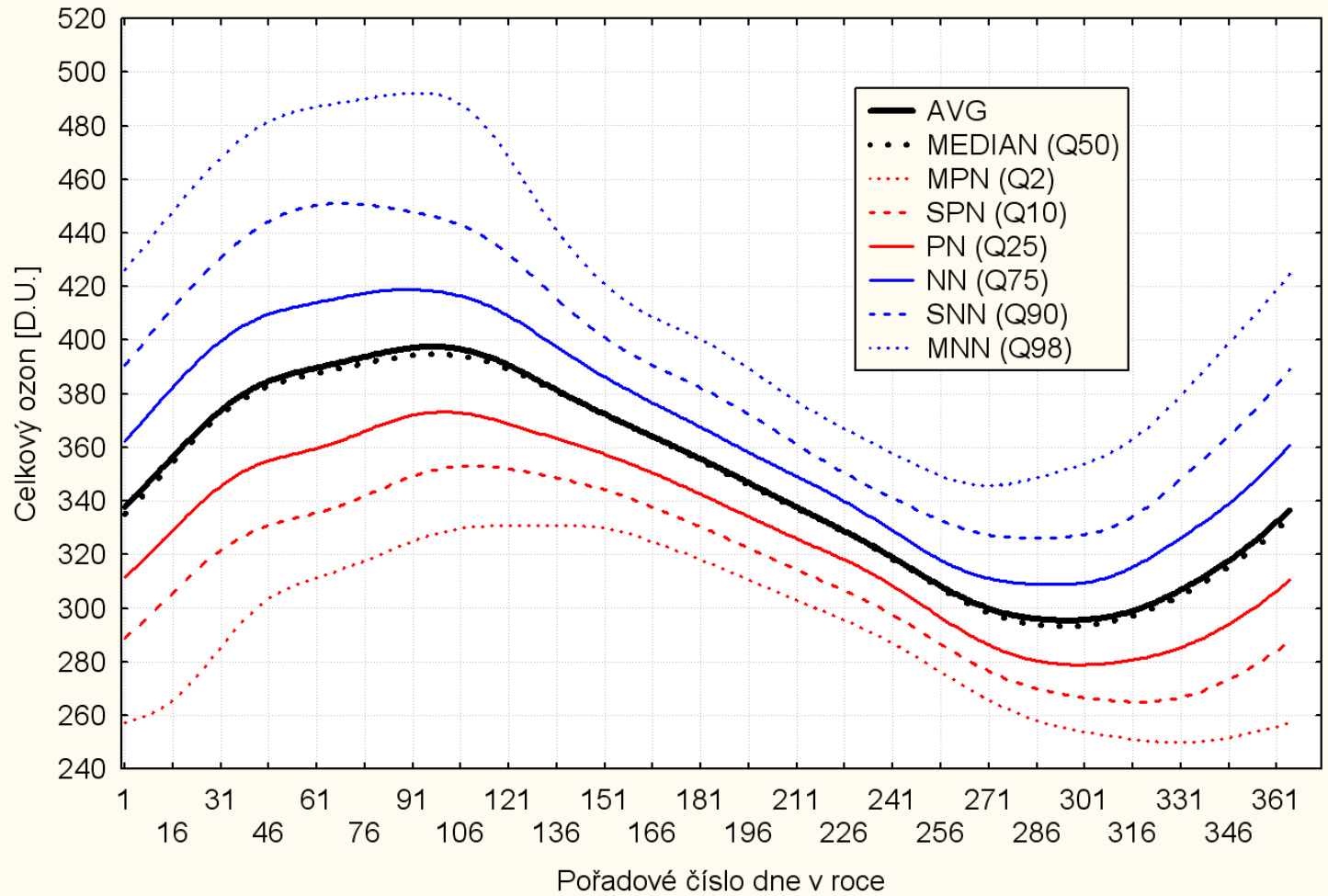
- UV-B: 280-320 nm, částečně absorbováno ozonem
- UV-A: 320-400 nm, prochází k povrchu







Denní průměry celkového ozonu 1961-1985  
(shlazen Gaussovým filtrem)



## Měření celkového ozonu od roku 1961 na SOO Nový Hradec Králové



- Ozonové spektrofotometry navázané na mezinárodní etalony
- Součást globální sítě programu SMO – Global Atmosphere Watch
- Měření uložena v databázi ČHMÚ a ve světovém centru WOUDC, Toronto
- Pravidelné analýzy datové řady (kvalita, trendy), validace družicových měření





- 1961 - dosud: Dobsonův spektrofotometr D074 (manuální)
- 1994 - dosud: Brewerův spektrofotometr MK-IV B098 (jednoduchý monochromátor)
- 2004 - dosud: Brewerův spektrofotometr MK-III B184 (dvojitý monochromátor)
- ... + Brewer MK-III B199 v Antarktidě na stanici Marambio

## Princip měření:

Dobson: Porovnání intenzit UV záření na 2 vlnových délkách, jedna s větší absorpcí ozonem a druhá s menší

*A (305.5/325.4 nm), C (311.5/332.4 nm), D (317.5/339.9 nm)*

Brewer: Lineární kombinace z měření na 306.3, 310.0, 313.5, 316.8, 320.0 nm

3 typy měření: Direct Sun (DS, přesnost 1%), Zenith Blue (ZB, přesnost 1-2%), Zenith Cloud (ZC, přesnost 1-3%)

Z odečtených hodnot se pomocí modelů absorpce a rozptylu UV záření počítá celkový ozon v D.U.

*Dobsonova jednotka (Dobson Unit) je mezinárodně zavedená jednotka reprezentující vrstvu ozonu (nebo jiného plynu), vysokou 0.01 milimetru při teplotě 0 °C a tlaku 1013 hPa. V odborné literatuře se používá rovněž ekvivalent 1 m-atm-cm.*

## Omezení:

Dobson nemůže měřit za nepříznivého počasí (déšť, sněžení, mlha,...)

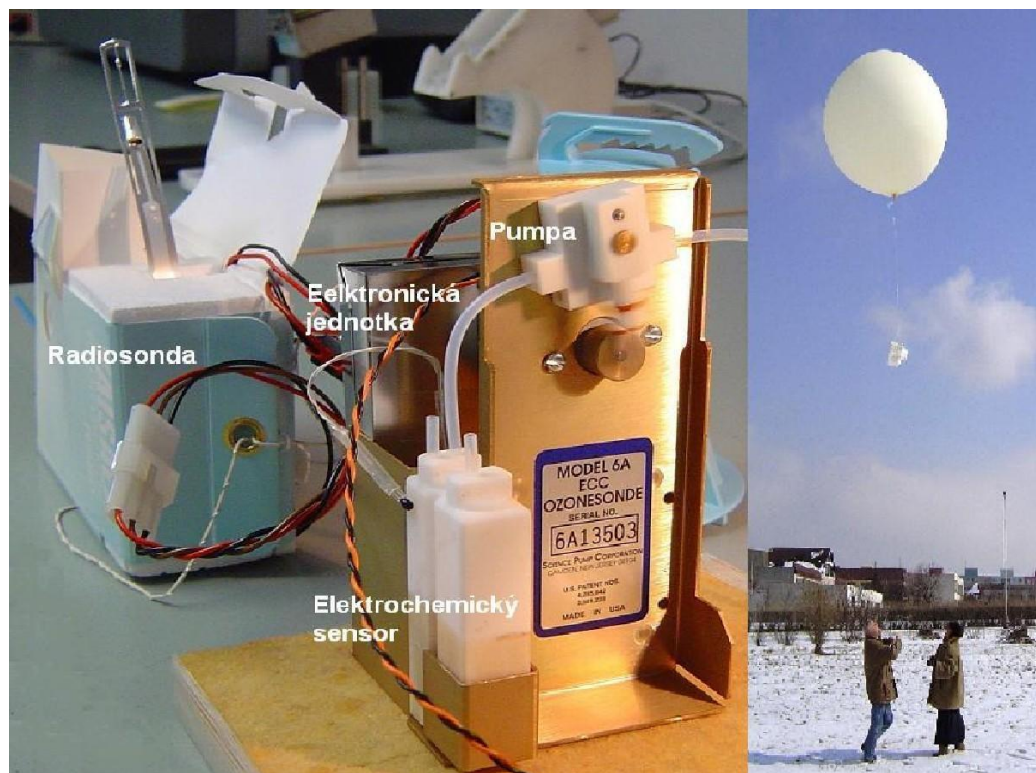
Brewer prakticky bez omezení

## Od roku 1982 ozonové sondáže na Libuši

Leden – duben, 3x týdně (finančně náročné)

Do r. 1991 méně kvalitní (sondy z NDR), od roku 1992 kvalitnější (sondy ECC z USA).

Následně Praha-Libuš přijata do monitorovacího systému NDACC (Network for Detection of Atmospheric Composition Change).



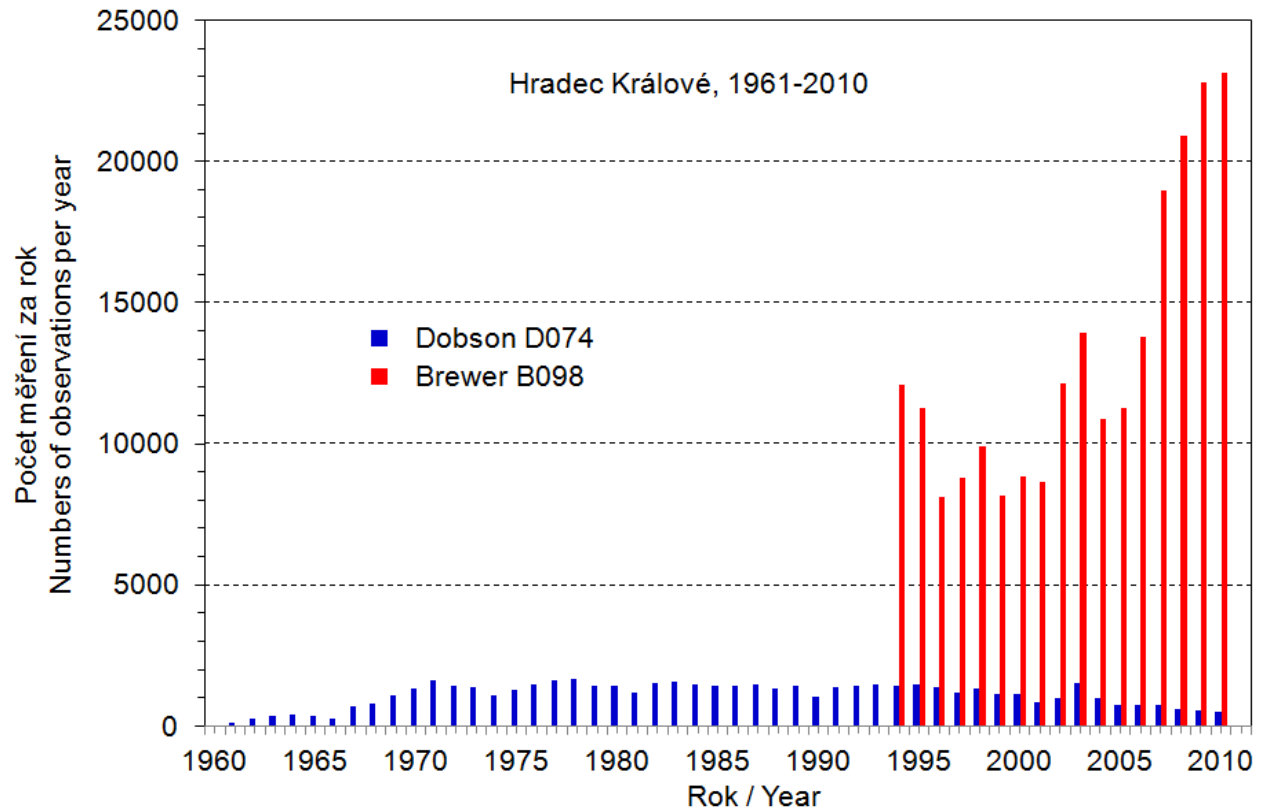
## Pozemní měření vertikálních profilů – UMKEHR metoda

Využívá zvýšení rozptylu UV záření ozonem směrem k zemskému povrchu během průchodu slunečních paprsků jednotlivými vrstvami atmosféry při východu nebo západu Slunce.

Číslo vrstvy Number of the layer	Tlaková vrstva Pressure level hPa	Nadm. výška Altitude km	Číslo vrstvy Number of the layer	Tlaková vrstva Pressure level hPa	Nadm. výška Altitude km
1	1000 - 250	0 – 10,3	6	15,6 – 7,81	28,0 – 32,6
2	250 - 125	10,3 – 14,7	7	7,81 – 3,91	32,6 – 37,5
3	125 – 62,5	14,7 – 19,1	8	3,91 – 1,95	37,5 – 42,6
4	62,5 – 31,2	19,1 – 23,5	9	1,95 – 0,98	42,6 – 47,9
5	31,2 – 15,6	23,5 – 28,0	10	0,98 -	47,9 -

V porovnání se sondáží méně přesné, menší vertikální rozlišení, ale výhodou jsou prakticky nulové náklady (využití již existující technologie – Dobson nebo Brewer).

Po automatizaci měření (Brewerovy spektrofotometry) není ani náročná personálně (není nutná přítomnost obsluhy v době východu nebo západu Slunce), od roku 2005 se standardně provádí i na SOO Nový Hradec Králové



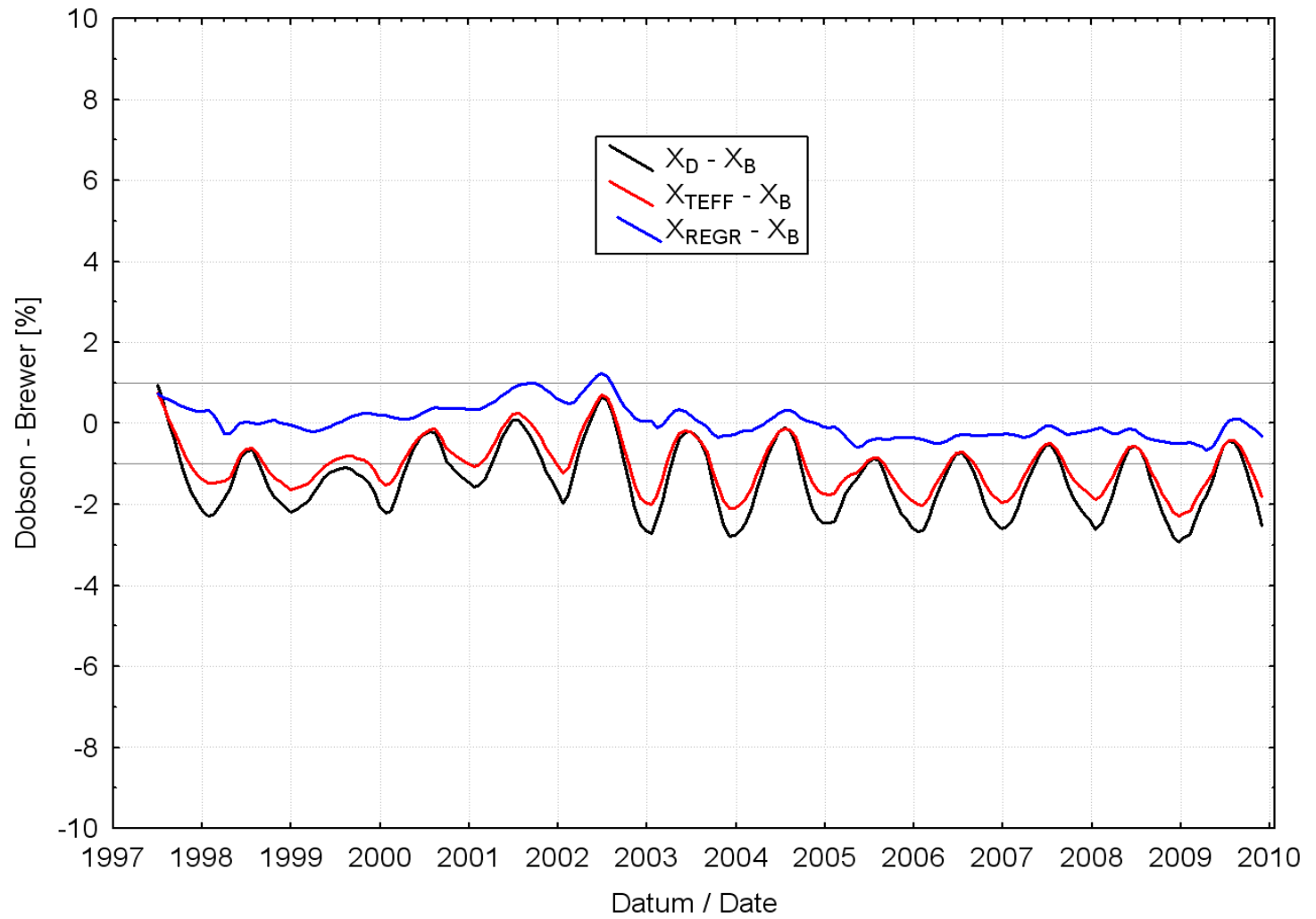
### Dobson versus Brewer:

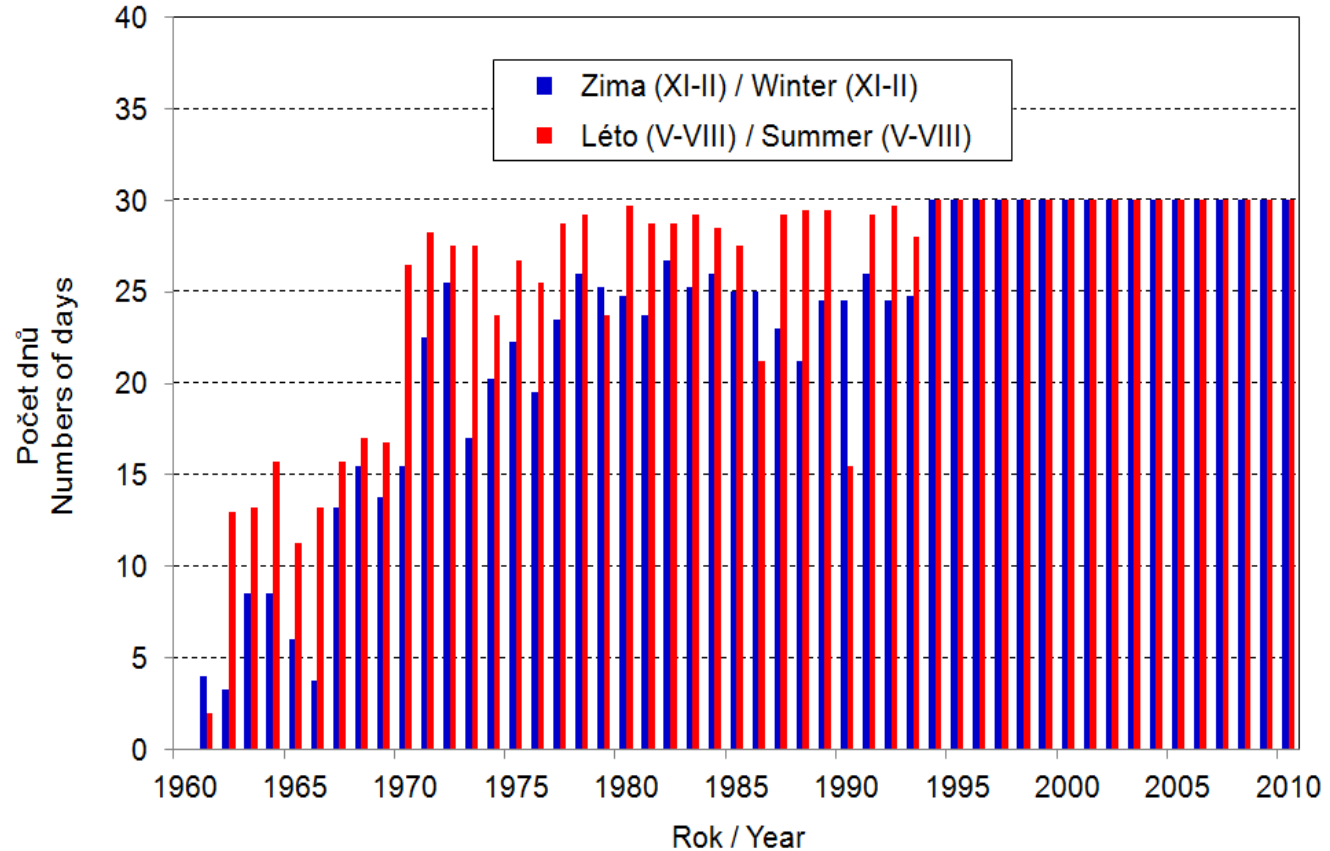
Stejný princip měření, ale jiné vlnové délky  
Dobson manuální, Brewer automatický

**Nelze obě řady jen spojit dohromady**

## Nutná adjustace řad:

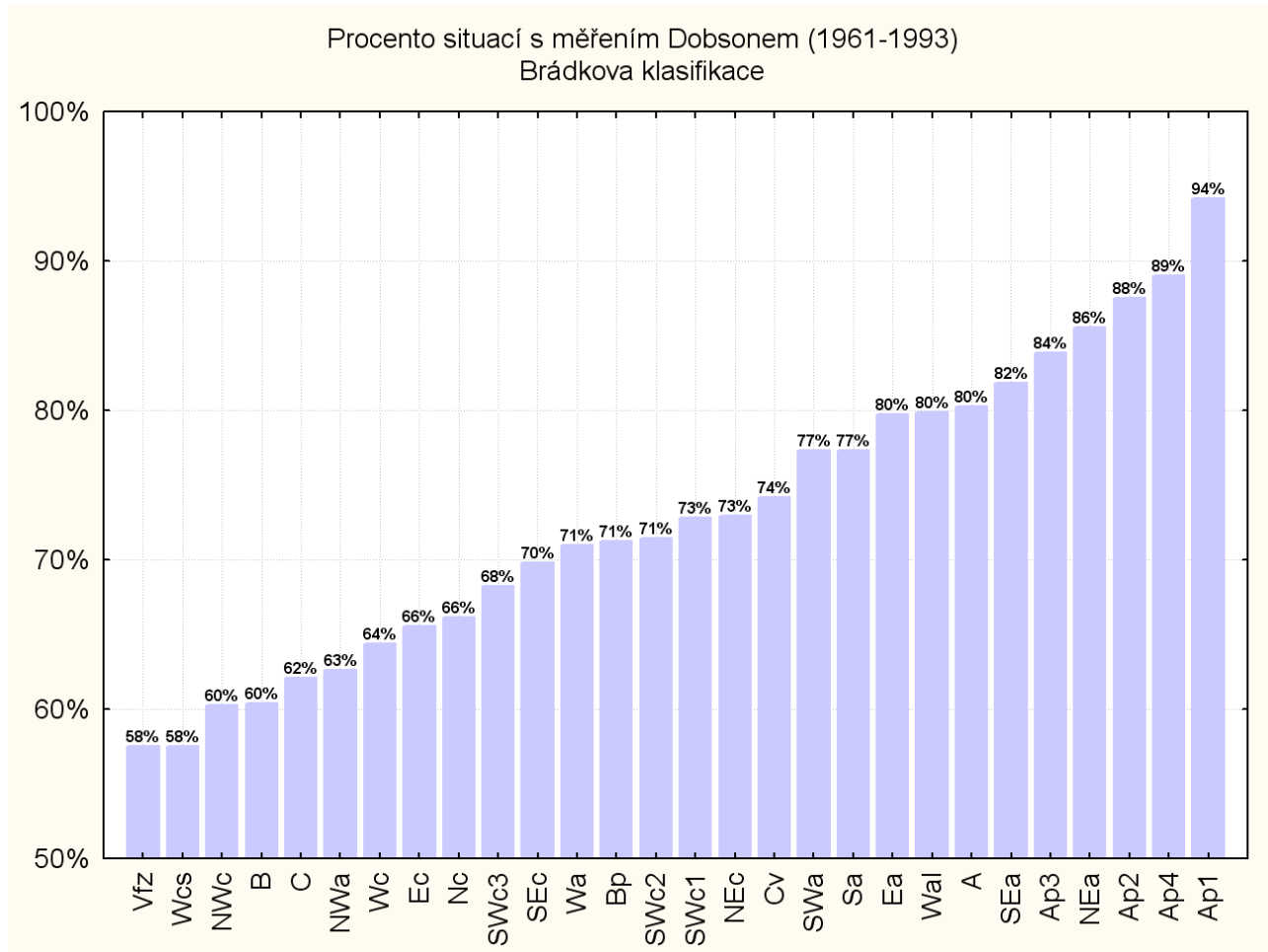
1. Adjustace Dobsonovské řady na kalibrační úroveň Brewerovské řady: *jednak přesnější, jednak pokračuje v současnosti a bude pokračovat dál*
2. Přepočítání všech hodnot Dobsonovské řady podle nových modelů absorpce a rozptylu UV záření: *všechny hodnoty, odečtené z přístrojů k dispozici*
3. Korekce na efektivní teplotu stratosféry: *modely absorpce a rozptylu standardně počítají s efektivní teplotou  $-46,3^{\circ}\text{C}$ , ale existuje mírná teplotní závislost. Pro roky 1971-2010 použity skutečné teploty ze sondáží na Libuši, pro 1961-1970 z reanalýz ERA-40. Kvalita reanalýz testována na období 1971-2010 – s velice dobrým výsledkem.*
4. Následně kvalita adjustace testována na datech 1997-2010 (souběžná měření Dobsonem i Brewerem), zbytkové disproporce v Dobsonovské řadě opraveny pomocí regresních metod (statisticky)





Brewer (od 1994) prakticky kompletní  
 Dobson (do 1993) – dny bez měření (počasí)  
 Vliv počasí asi vázán na některé synoptické situace.  
**Vede to k systematické chybě např. v měsíčních průměrech?**



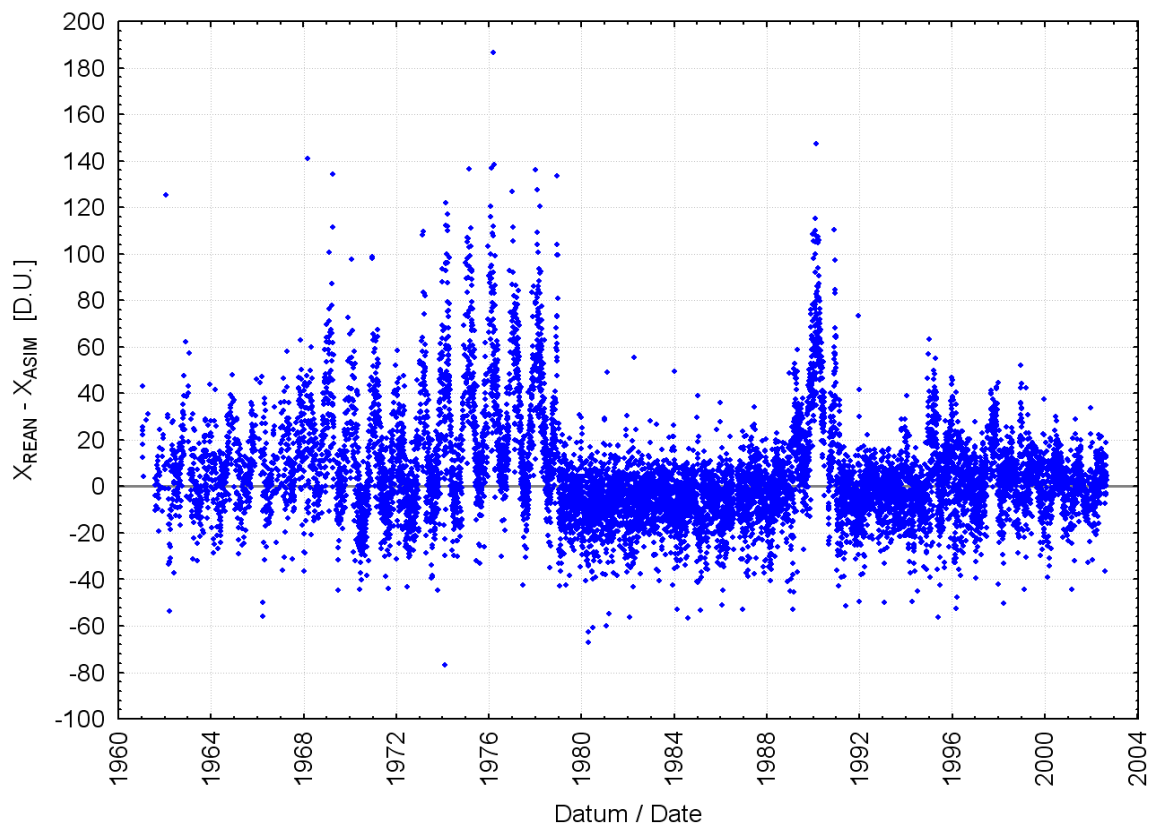


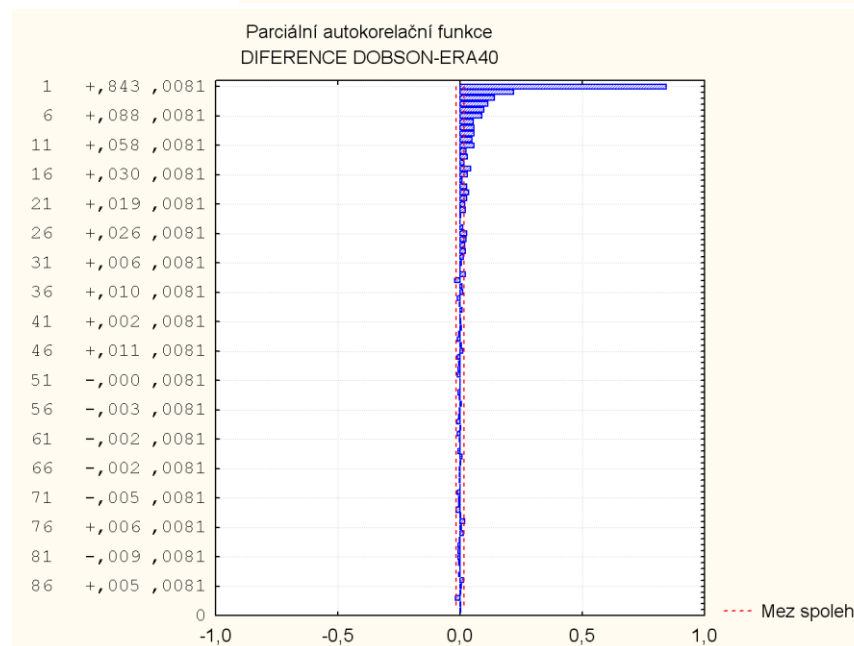
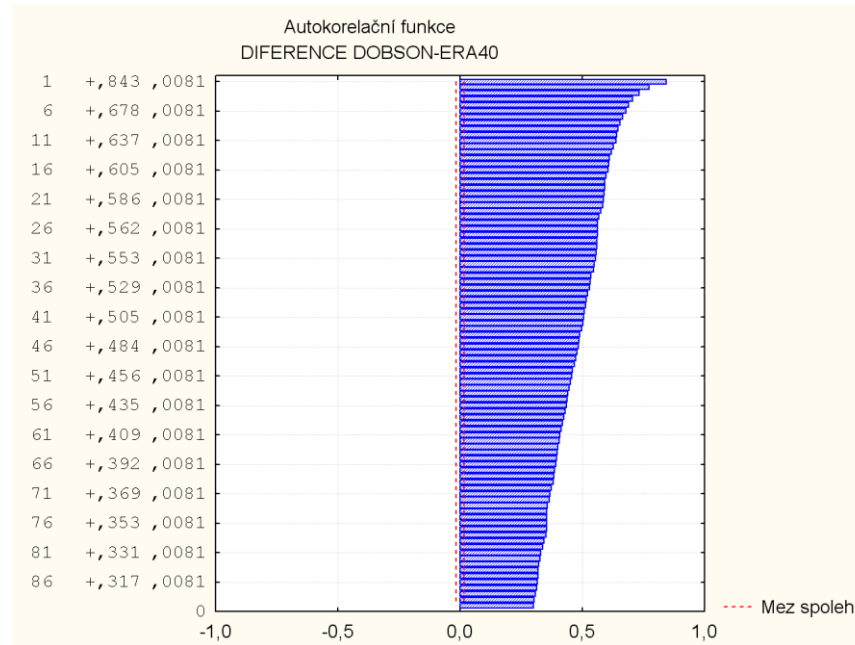
Cyklonální situace proměřeny jasně méně než anticyklonální,  
systematické ovlivnění dat nelze vyloučit (výběr není náhodný)

Korekce vlivu nenáhodného výběru – doplnění chybějících dat z nezávislého zdroje

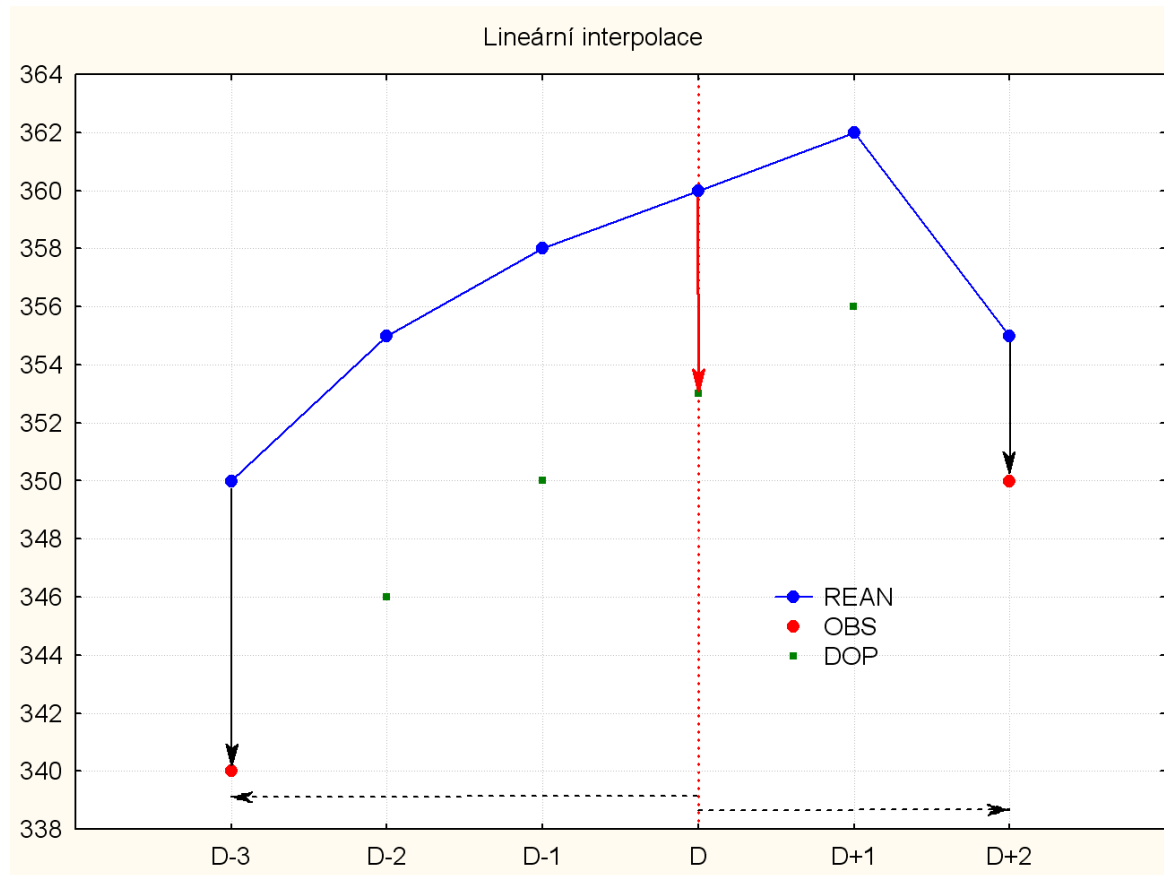
Celkový ozon v reanalýzách ERA-40 a ERA-Interim (*testována i 20CR V2 – horší než ERA*)

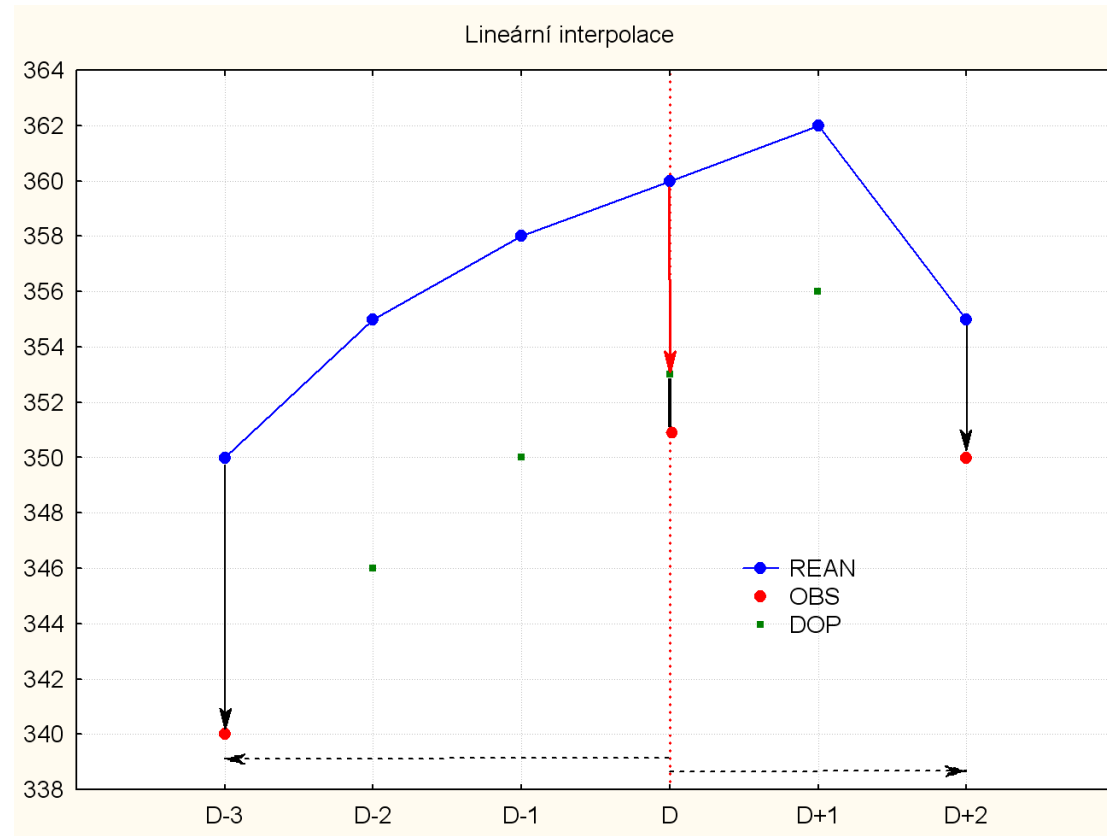
ERA-40 versus asimilovaná řada (od 1979 – satelitní data v ERA-40):





Statisticky významné autokorelace diferencí i pro posun několik dní – pro doplnění chybějících dat zvolena metoda lineární interpolace diferencí





Pro dané datum ze všech ostatních roků najdeme stejnou konfiguraci dat, ale tak, že je k dispozici i měření pro den D.

- hodnotu pro den D odhadneme interpolací
- interpolovanou hodnotu porovnáme s měřením a vyhodnotíme chybu odhadu
- přes všechny roky tak dostaneme soubor chyb, z nich lze vyhodnotit  $\sigma$

**ALE**

Zpravidla málo případů na vyhodnocení (nutno zvláště 1961-1978 a 1979-2002)  
Ne jen pro daný kalendářní den, ale i pro „okolí“  $\pm 10$  dní



Data: vysledna\_rada (10s krát 18262f)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	DATE	YEAR	MONTH	DAY	BREWER	DOBSON_BPH	DOBSON_ALL	TOZ	STD_DEV	SOURCE
3618	27.11.1970	1970	11	27				300,058939	18,2566304	ERA-40/1
3619	28.11.1970	1970	11	28				293,234465	17,1760953	ERA-40/1
3620	29.11.1970	1970	11	29				304,527413	19,4087043	ERA-40/1
3621	30.11.1970	1970	11	30				303,93432	19,3833612	ERA-40/1
3622	1.12.1970	1970	12	1		303,5	303,5	303,5		DOBSON
3623	2.12.1970	1970	12	2				314,652535	18,14198	ERA-40/1
3624	3.12.1970	1970	12	3				290,7769	16,1713547	ERA-40/1
3625	4.12.1970	1970	12	4		267,4	267,4	267,4		DOBSON
3626	5.12.1970	1970	12	5				273,215842	21,1587278	ERA-40/1
3627	6.12.1970	1970	12	6			266,7	266,7		DOBSON???
3628	7.12.1970	1970	12	7				302,125786	17,0592769	ERA-40/1
3629	8.12.1970	1970	12	8		323,5	323,5	323,5		DOBSON
3630	9.12.1970	1970	12	9				281,470738	15,569931	ERA-40/1
3631	10.12.1970	1970	12	10				274,61581	14,1133396	ERA-40/1
3632	11.12.1970	1970	12	11				261,694345	29,5270455	ERA-40/1
3633	12.12.1970	1970	12	12				260,275999	24,9689223	ERA-40/1
3634	13.12.1970	1970	12	13				272,140899	28,6306919	ERA-40/1
3635	14.12.1970	1970	12	14				276,896962	36,5172078	ERA-40/1
3636	15.12.1970	1970	12	15				330,46551	28,7688157	ERA-40/1
3637	16.12.1970	1970	12	16				335,742723	32,4063934	ERA-40/1
3638	17.12.1970	1970	12	17				342,460569	24,1047176	ERA-40/1
3639	18.12.1970	1970	12	18				291,034269	23,6927983	ERA-40/1
3640	19.12.1970	1970	12	19		325,6	325,6	325,6		DOBSON
3641	20.12.1970	1970	12	20			322,5	322,5		DOBSON???
3642	21.12.1970	1970	12	21			326,5	275,598807	26,4468238	ERA-40/1
3643	22.12.1970	1970	12	22		348,3	348,3	348,3		DOBSON
3644	23.12.1970	1970	12	23		357,2	357,2	357,2		DOBSON
3645	24.12.1970	1970	12	24				350,626891	15,8413859	ERA-40/1
3646	25.12.1970	1970	12	25		341,3	341,3	341,3		DOBSON
3647	26.12.1970	1970	12	26		330,9	330,9	330,9		DOBSON
3648	27.12.1970	1970	12	27			353,9	353,9		DOBSON???
3649	28.12.1970	1970	12	28			323,9	323,9		DOBSON???
3650	29.12.1970	1970	12	29			315,5	315,5		DOBSON???
3651	30.12.1970	1970	12	30			330,5	312,454075	17,0621951	ERA-40/1
3652	31.12.1970	1970	12	31		331,2	331,2	331,2		DOBSON
3653	1.1.1971	1971	1	1		378,6	378,6	378,6		DOBSON
3654	2.1.1971	1971	1	2		380,3	380,3	380,3		DOBSON
3655	3.1.1971	1971	1	3				366,609433	14,3234158	ERA-40/1
3656	4.1.1971	1971	1	4		387	387	387		DOBSON
3657	5.1.1971	1971	1	5		358,9	358,9	358,9		DOBSON
3658	6.1.1971	1971	1	6		343,1	343,1	343,1		DOBSON
3659	7.1.1971	1971	1	7		343,6	343,6	343,6		DOBSON

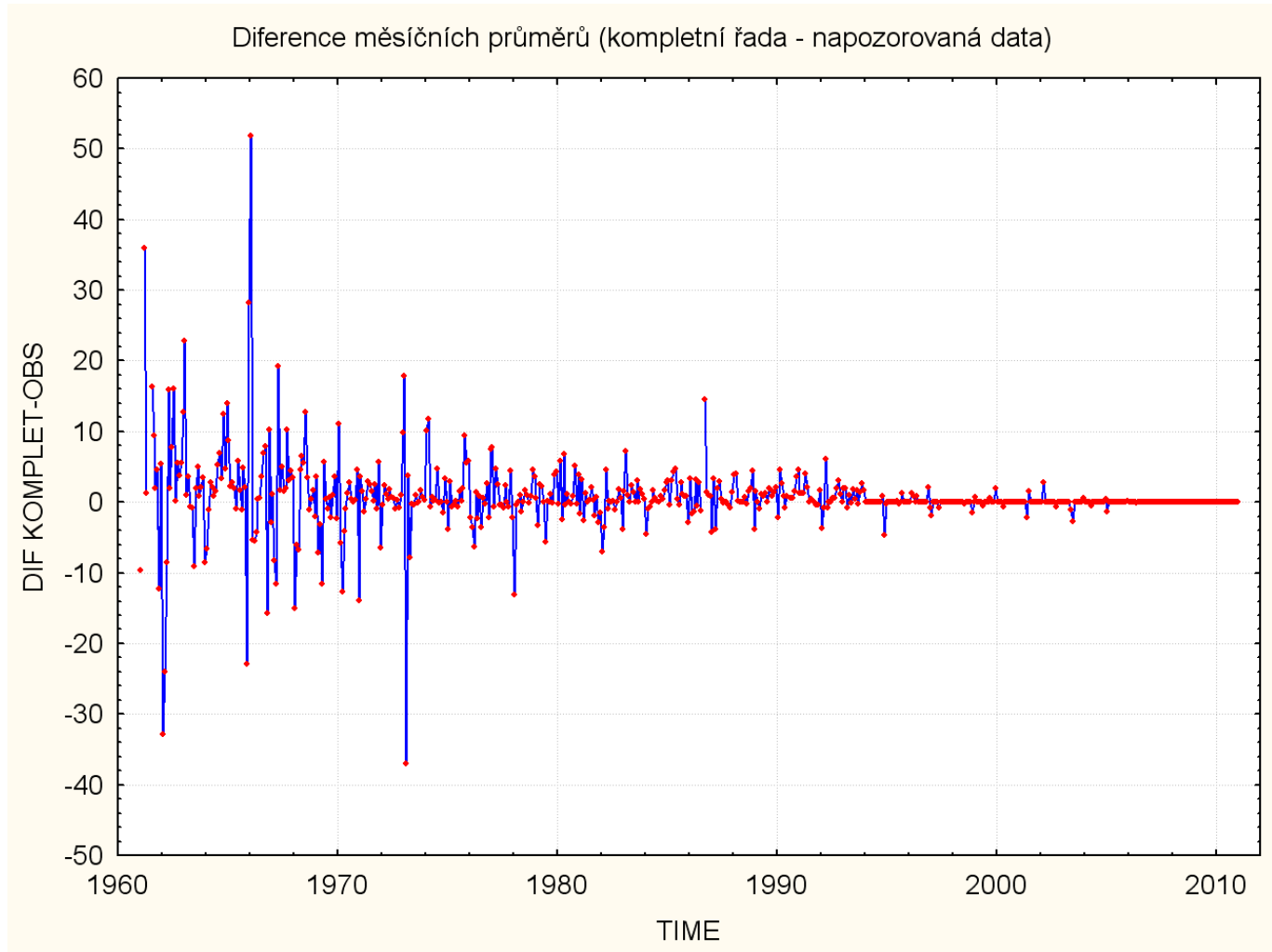
1961-1978 = adjustovaný Dobson, doplň. ERA-40/1

1979-1988 = adjustovaný Dobson, doplň. ERA-40/2

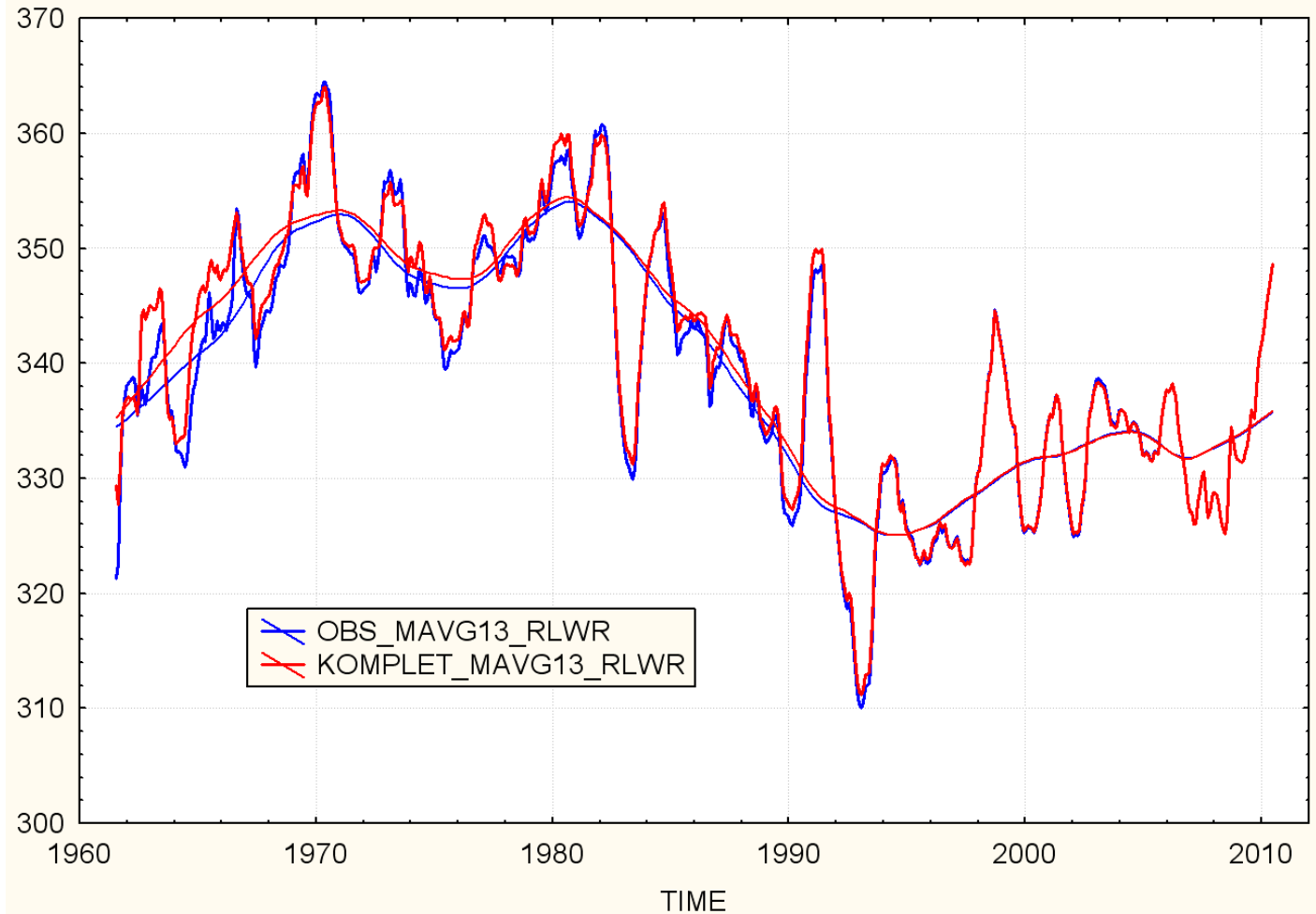
1989-1993 = adjustovaný Dobson, doplň. ERA-Interim

1994-2010 = Brewer, doplň. ERA-Interim

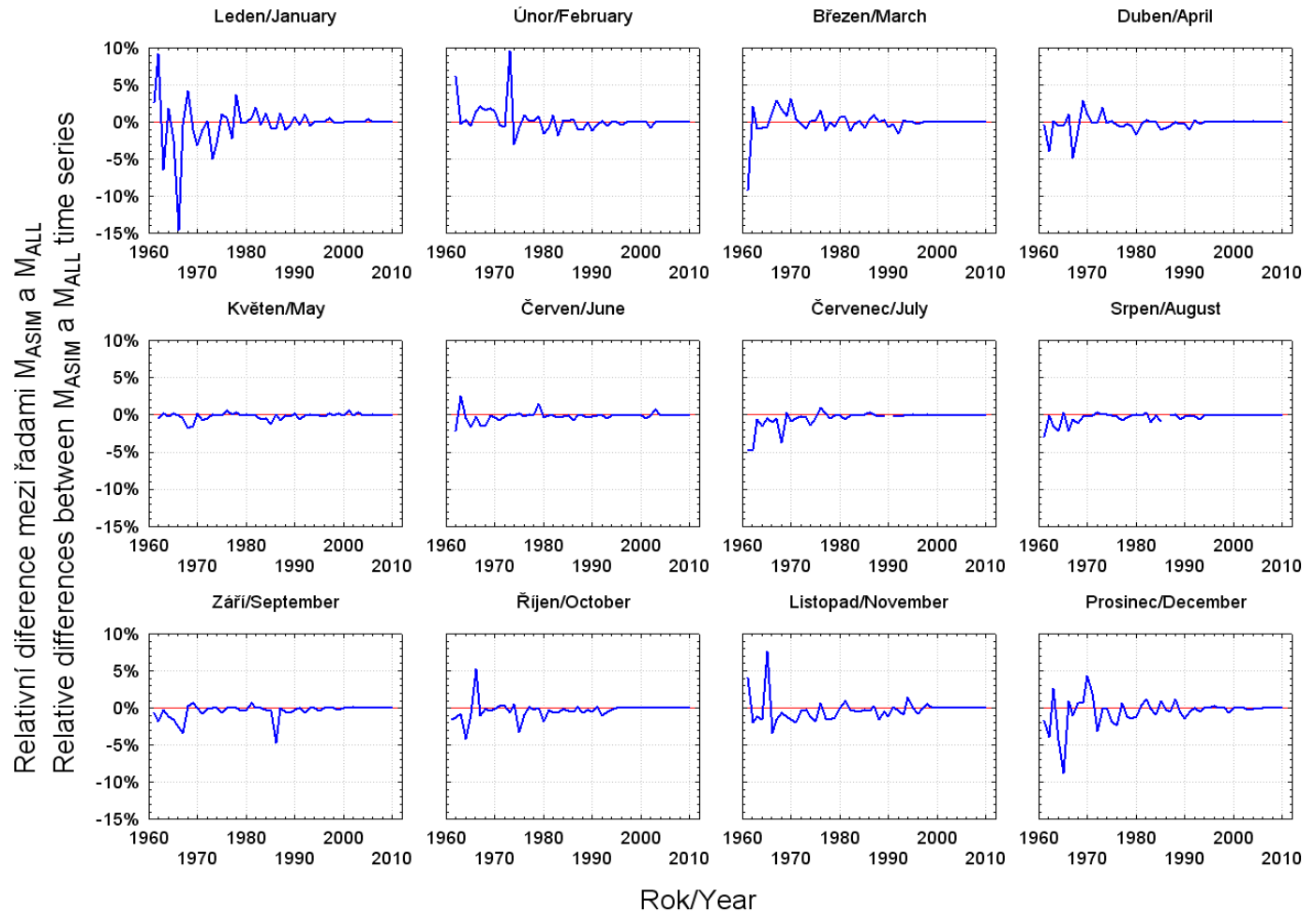
## Jak se projeví doplnění chybějících denních dat na měsíčních průměrech?



Porovnání shlazených měsíčních průměrů







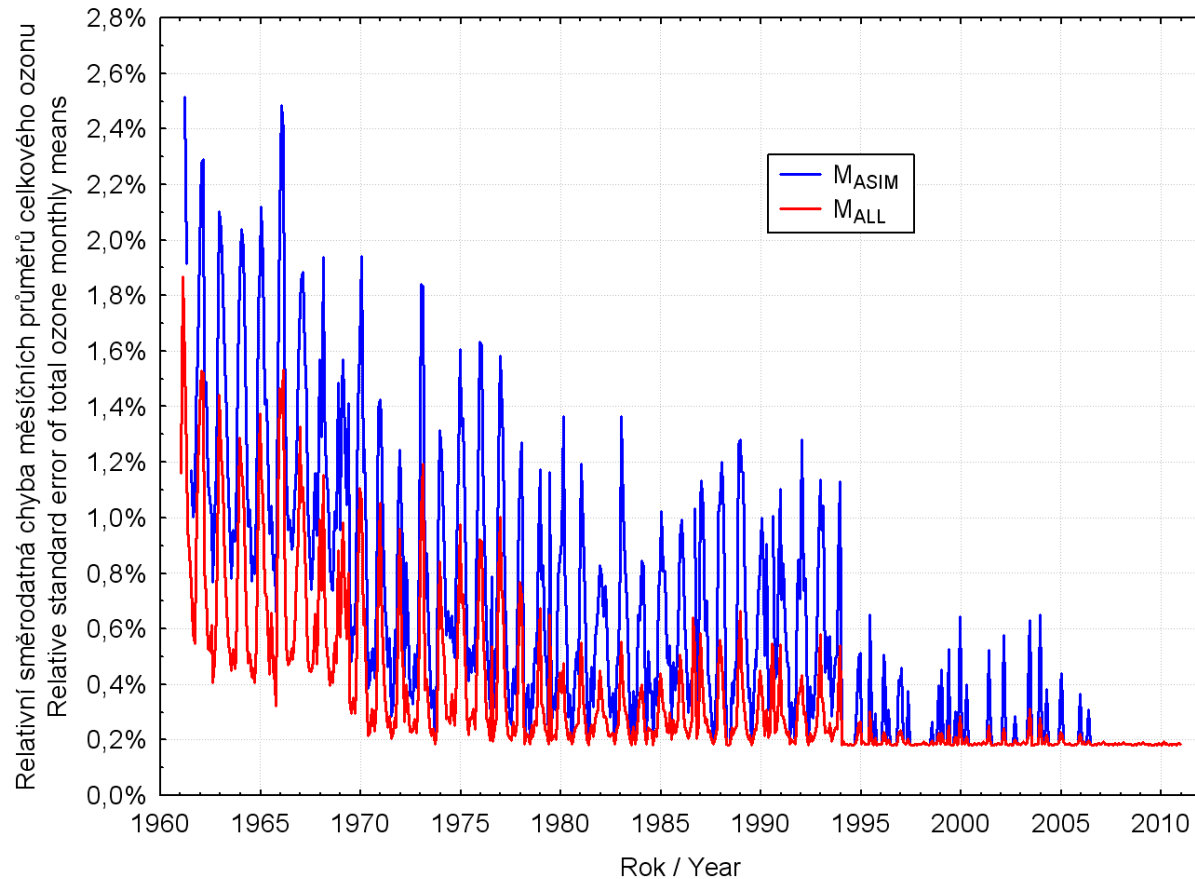
Projeví se doplnění dat i na přesnosti odhadu měsíčních průměrů?

Zdroje nejistoty denních hodnot:

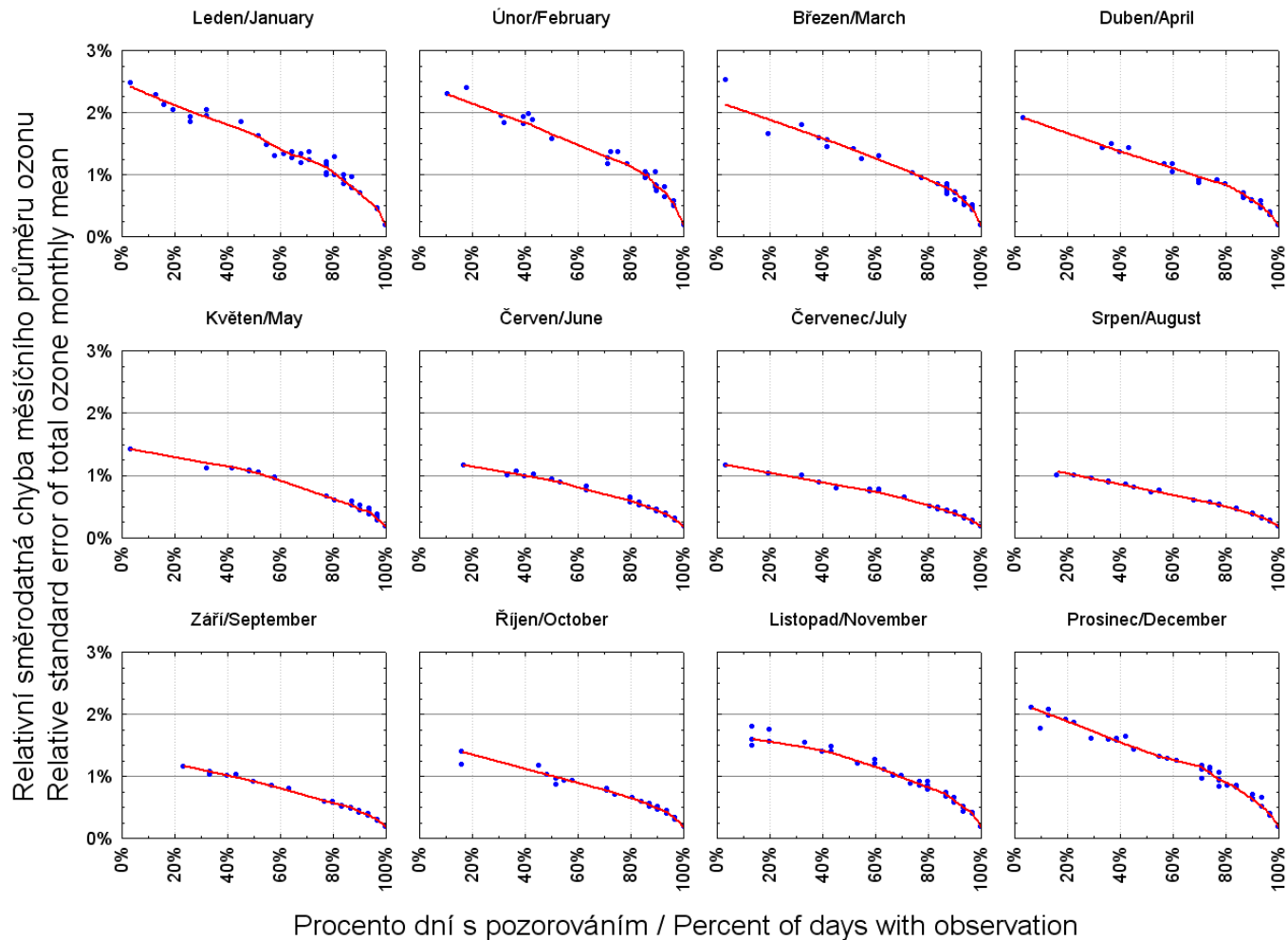
- Doplněná data –  $\sigma$  odhadnuto křížovou validací
- Napozorovaná data –  $\sigma$  na úrovni 1% naměřené hodnoty
- Chybějící (neměřená) data –  $\sigma$  odpovídá rozptylu naměřených dat v dané roční době (kalendářní den  $\pm 10$  dní) přes všechny roky v časové řadě

Zákon šíření chyb: 
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_n^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

Pro každý měsíc tedy můžeme spočítat nejen měsíční průměr celkového ozonu, ale i hodnotu  $\sigma$ , vyjadřující míru nejistoty tohoto průměru. Lze to udělat jak pro nedoplněnou, tak i pro doplněnou řadu (využití – viz dále...)

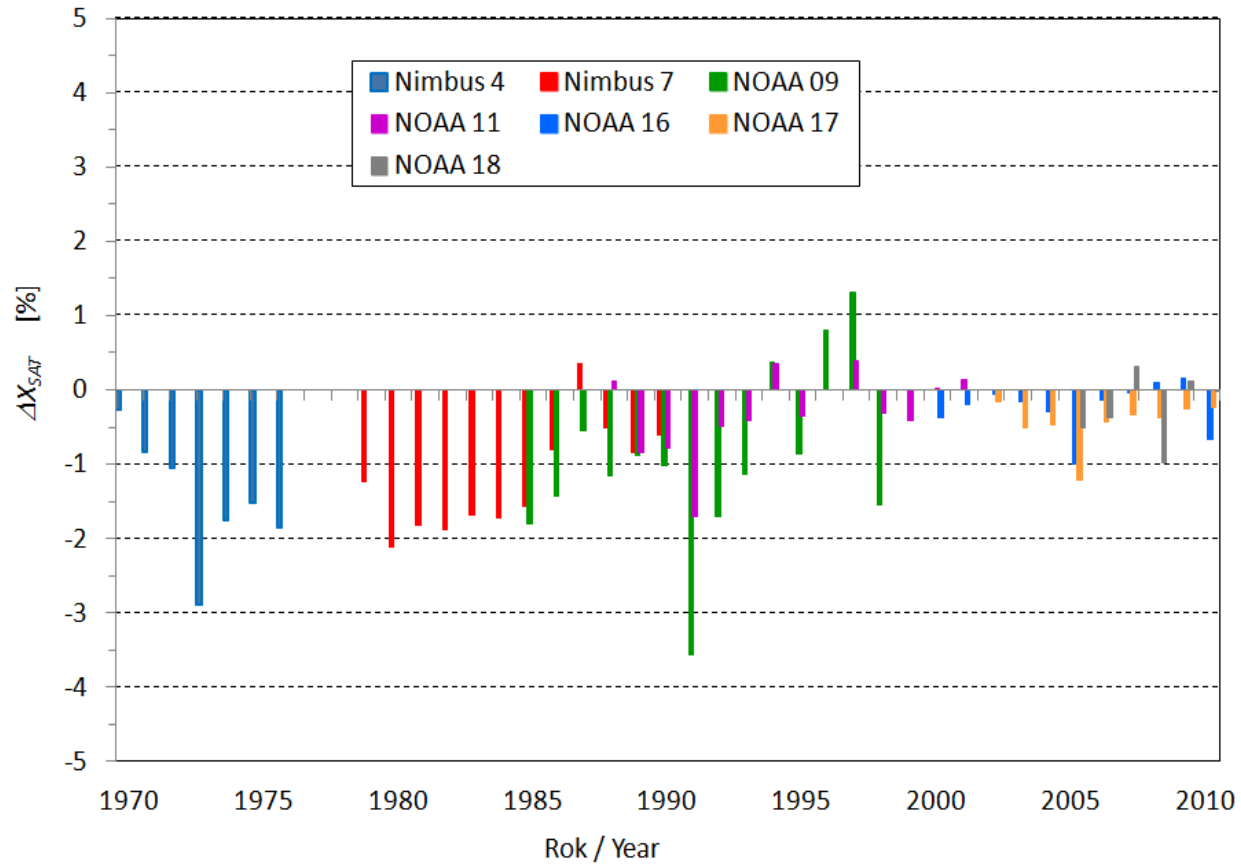


Doplnění dat většinou snižuje směrodatnou chybu odhadu měsíčního průměru u Dobsona cca na polovinu, u Brewera výrazně redukuje vliv jednotlivých chybějících dat

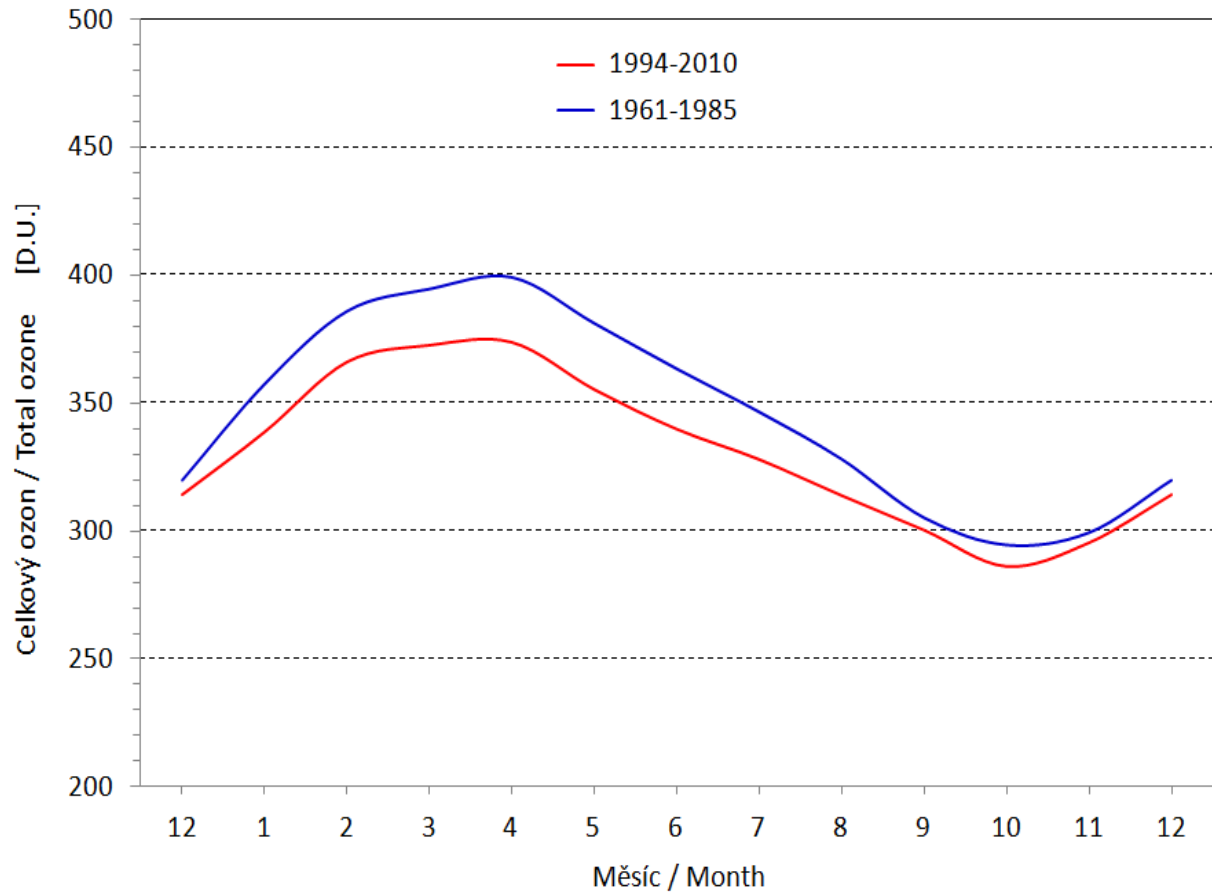


Např. pro směrodatnou chybu odhadu měsíčního průměru na úrovni 1% je třeba v zimě mít měření z alespoň 90% dní, zatímco v létě stačí z cca 50% dní. Záleží ale i na rozdělení chybějících dat během měsíce.

## Porovnání asimilované a doplněné řady se satelitními měřeními (pro HK)



## Systematické změny ročního chodu ozonu za posledních 50 let



Na podzim a v zimě malé, největší na jaře a počátkem léta

### Otázky:

- Na čem jsou závislé měsíční průměry ozonu?
- Jak ty závislosti vypadají?
- Jak jednotlivé faktory ovlivňovaly celkový ozon v minulosti?
- Co lze očekávat do budoucnosti?

**Řešení = regresní model**

### ALE

- Faktorů, ovlivňujících ozon je určitě více (= násobný regresní model)
- Vliv jednotlivých faktorů obecně nelineární (= nelineární model)

Úloha pro klasické regresní řešení příliš složitá

### **Zvolena metoda pomocí neuronových sítí regresního typu**

- není nutno zadávat předem tvary jednotlivých závislostí, model je odvodí přímo z dat
- model dokáže zobecnit výsledky, najít obecné závislosti, potlačil vliv šumu

**Potenciální** (možné) **prediktory** (nezávisle proměnné), z nich vybrat ty, které prokazatelně a významně ovlivňují ozon (**relevantní prediktory**) a ty pak použít v modelu

### Potenciální prediktory

#### a) Parametry UT/LS:

- **10 prvků** (teplota, geopotenciál, zonální vítr, meridionální vítr, vertikální rychlost, relativní vlhkost, specifická vlhkost, relativní vorticity, potenciální vorticity, divergence) **v 10 hladinách** (300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 a 10 hPa) = **celkem 100 potenciálních jednohladinových prediktorů** z reanalýz ERA-40 (1961-1988, 15E, 50N) a ERA-Interim (1989-2010, 15E, 49.5N).
- Z nich po jednotlivých prvcích přes vertikální profil od 300 do 10 hPa spočítány hlavní komponenty (PCA) = dalších **100 potenciálních prediktorů**, popisujících **variabilitu vertikálních profilů jednotlivých prvků**
- Přidána **teplota a tlak v tropopauze** z reanalýz NCEP/NCAR (kontrolováno proti sondážím Praha-Libuš)

**Celkem 202 potenciálních UT/LS prediktorů**



**b) Forcingy:**

- **EESC** (Equivalent Effective Stratospheric Chlorine) podle modelu WMO2010
- **AOD** (Aerosol Optical Depth) ve vrstvách 15-20, 20-25 a 25-30 km (zonální průměr kolem 50N) + **PCA vertikálního profilu AOD**
- **Sluneční aktivita** (Wolfovo relativní číslo slunečních skvrn, sluneční radiový tok na 2800 MHz ze stanic Ottawa a Penticton, Kanada)

**Celkem 9 potenciálních prediktorů pro forcingy**

**c) Velkoprostorové oscilační systémy (vnitřní dynamika klimatického systému):**

Indexy NAO, NINO1+2, NINO3, NINO4, NINO3.4, QBO (zonální vítr Singapore)

**Celkem 6 potenciálních prediktorů pro oscilační systémy**

+ **SIN** a **COS** polohy měsíce v rámci ročního chodu (aby byl model schopen pracovat se závislostmi, měnícími se v průběhu roku, potřebuje vědět, ke které části roku se data vztahují)

**Celkem 219 potenciálních prediktorů**

Z 219 potenciálních prediktorů nutno vybrat ty, které jsou **relevantní pro model** (přispívají k vysvětlení variability ozonu)

**3 metody, použity opakovaně:**

- Dopředná kroková regrese
- Zpětná kroková regrese
- Genetický algoritmus

... a to zvláště pro popis vysokofrekvenční variability (měsíční průměry) a zvláště pro nízkofrekvenční variabilitu (roční průměry)

**U vysokofrekvenční variability vybrány jen ty prediktory, které prošly opakovaně všemi třemi testy**



# Genetický algoritmus

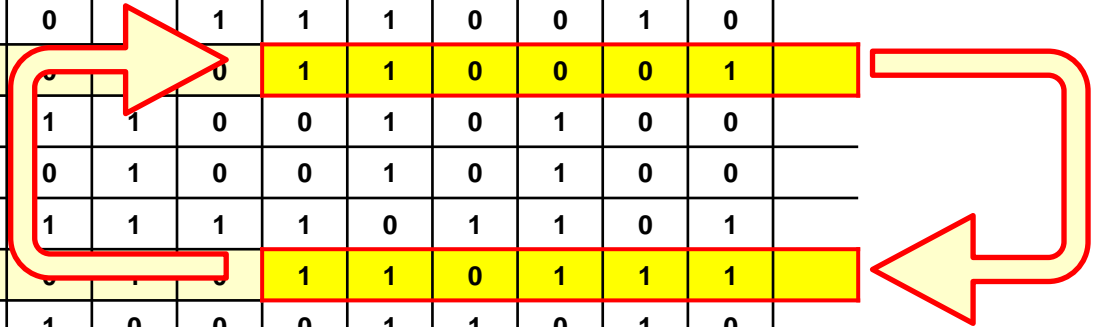
## 1) Přirozený výběr

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15		ERR
1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0		E1
0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0		E2
1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1		E3
0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0		E4
0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0		E5
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1		E6
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1		E7
0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0		E8
1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1		E9
0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0		E10
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0		E11
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1		E12
<del>1</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>1</del>		<del>En-6</del>
0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1		En-5
1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0		En-4
0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	0		En-3
0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1		En-2
1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1		En-1
<del>0</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>0</del>	<del>1</del>	<del>1</del>		<del>En</del>

## Genetický algoritmus

### 2) Křížení

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	
1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	
0	0	1	1	0	1	0		1	1	1	0	0	1	0	
1	1	1	0	0	1			0	1	1	0	0	0	1	
0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	
0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	
1	0	0	0	1	0			0	1	1	0	1	1	1	
0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	
1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	
0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	
1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	
1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	



## Genetický algoritmus

### 3) Mutace

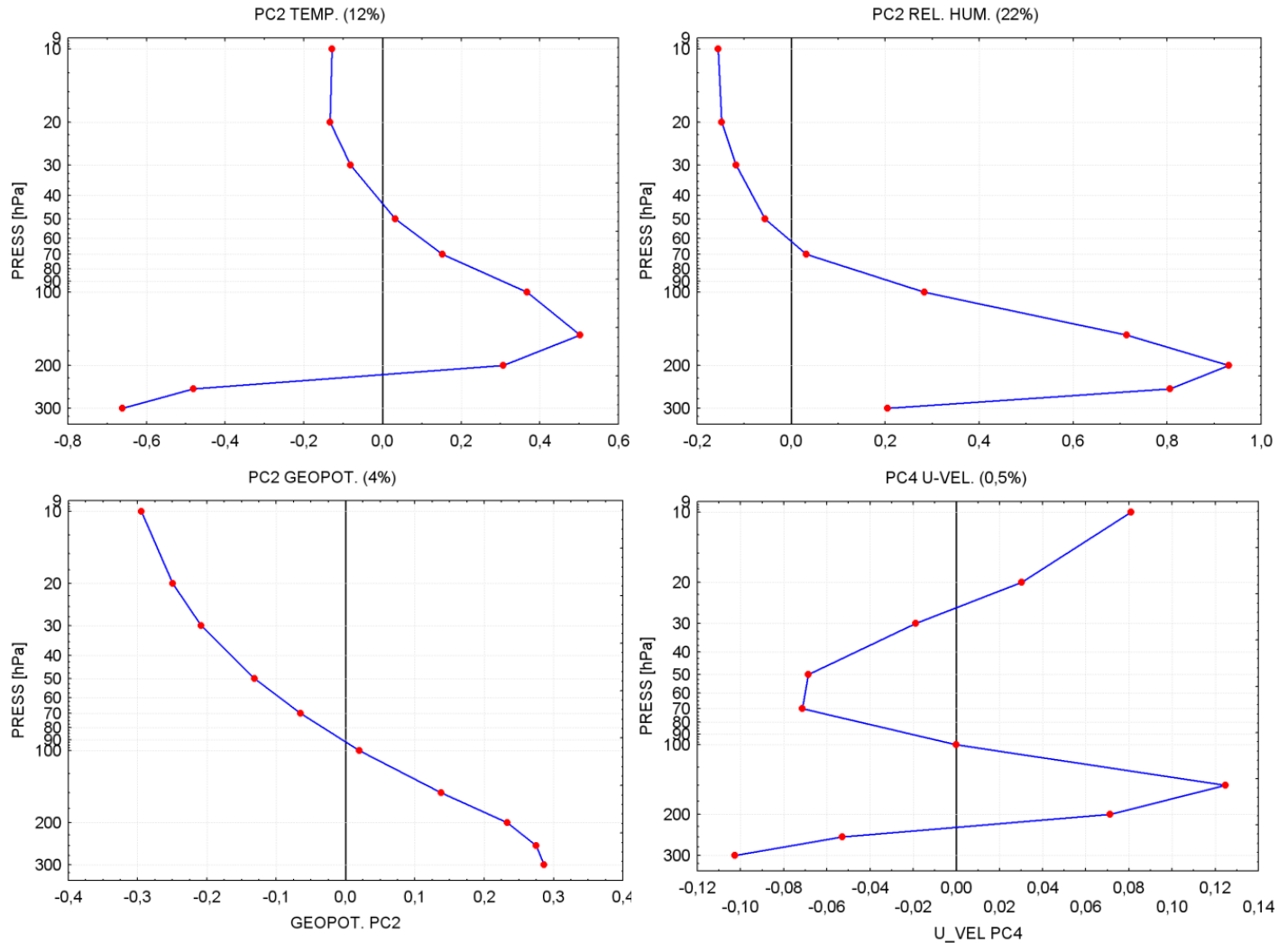
P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	
1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	
0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	
1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	
0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	
0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	
1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	
0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	
1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	
0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	
0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	
1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	
1	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	
1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	

## Vybrané relevantní prediktory pro model (19)

Typ Type	Hladina/PCA komp. Level/PCA comp.	Prediktor Predictor	Variabilita Variability
UT/LS jednohladinové UT/LS one-level	300 hPa	Teplota / Temperature	VF
	200 hPa	Potenciální vorticitá / Potential vorticity	VF
		Specifická vlhkost / Specific humidity	VF
		Relativní vlhkost / Relative humidity	VF
		Teplota / Temperature	VF
	150 hPa	Specifická vlhkost / Specific humidity	VF
		Relativní vlhkost / Relative humidity	VF
		Teplota / Temperature	VF
	100 hPa	Relativní vlhkost / Relative humidity	VF
		Teplota / Temperature	VF
UT/LS - PCA	2.PCA komponenta 2 <sup>nd</sup> PCA component	Teplota / Temperature	VF
	2.PCA komponenta 2 <sup>nd</sup> PCA component	Relativní vlhkost / Relative humidity	VF
	2.PCA komponenta 2 <sup>nd</sup> PCA component	Geopotenciál / Geopotential height	VF
	4.PCA komponenta 4 <sup>th</sup> PCA component	Zonální vítr / Zonal wind	VF
TPP	Tropopauza/Tropopause	Tlak / Pressure	VF
Forcing	1.PCA komponenta 1 <sup>st</sup> PCA component	AOD	Epizodická Episodic
	-	Sluneční radiový tok / Solar radio flux	NF
	-	EESC (model WMO 2010)	NF
Roční chod Annual course	-	Sin pozice měsíce / Sine of a moth	Harmonická Harmonic
	-	Cos pozice měsíce / Cosine of a month	Harmonická Harmonic

Jednohladinové jen do 100 hPa, nebyly vybrány prediktory z vyšších hladin

## Co jednotlivé PCA-prediktory fyzikálně popisují? Loadings (zátěže) PCA:



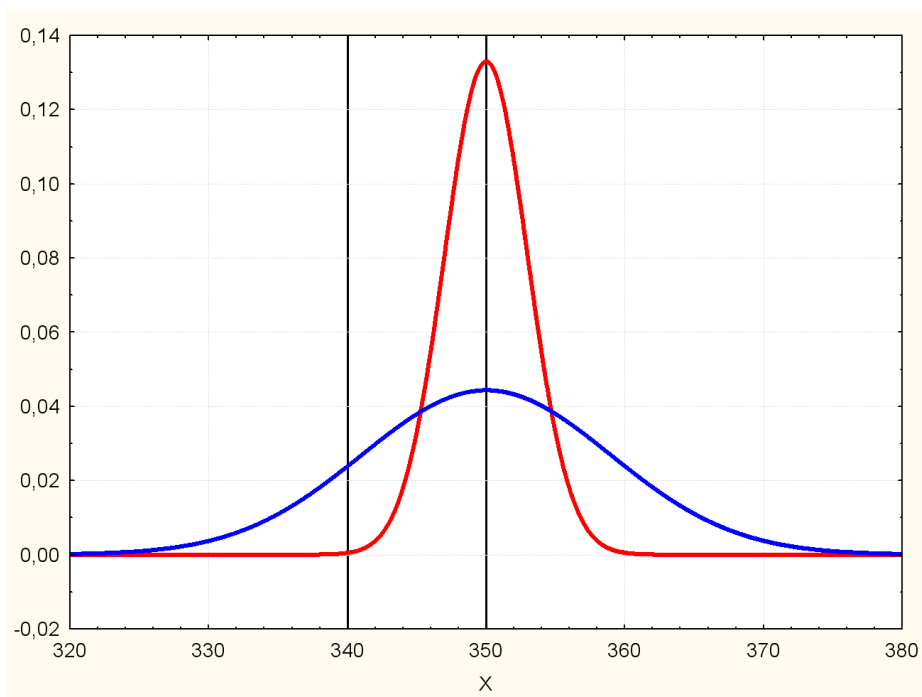
Klasická regresní analýza - předpoklad, že všechna data známe přesně (a pracujeme jen s příslušnými hodnotami, bez uvážení míry jejich nejistoty). My ale máme k dispozici nejen měsíční průměry celkového ozonu, ale i informace o jejich přesnosti (škoda nevyužít).

Modely často pracují se součtem čtverců chyb, který se snaží minimalizovat. Význam chyby je ale závislý na tom, jak přesně danou závisle proměnnou známe.

Bylo by dobré vztáhnout absolutní velikost chyby k příslušné hodnotě  $\sigma$  (*metoda vážených nejmenších čtverců chyb: větší  $\sigma$  = menší váha*) – někdy problém, často není implementováno.

Řešení = převzorkování dat s opakováním (menší  $\sigma \rightarrow$  větší počet opakování)

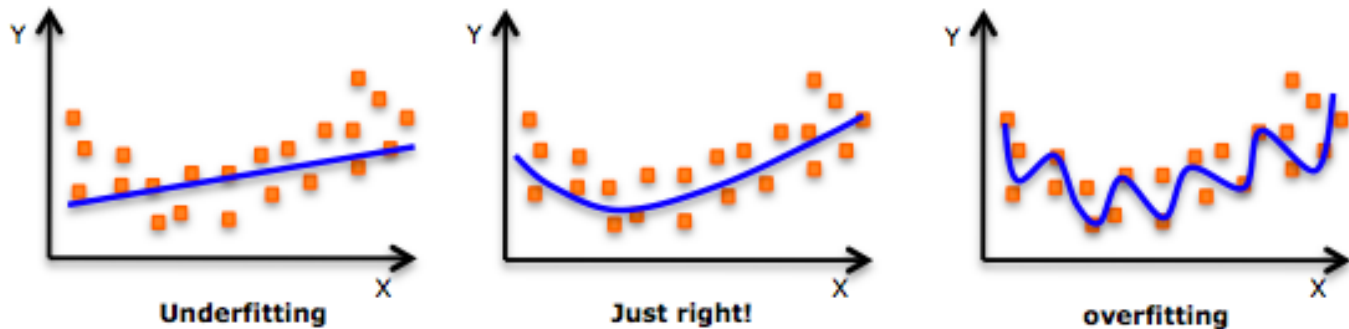
$$N_A/N_B = \sigma_B/\sigma_A$$





Testování optimálního typu sítě, architektury sítě atd. – dost náročné, ale zásadní, protože komplexnost sítě určuje, jak složité nelineární závislosti bude síť schopna namodelovat.

Zejména je nutno síť z tohoto pohledu nepoddimenzovat (příliš jednoduchá síť = podparametrizování, „underfitting“), ale ani nepředimenzovat (příliš složitá síť = přeparametrizování, „overfitting“)



Nakonec zvolena síť typu MLP (vícevrstvá perceptronová síť)

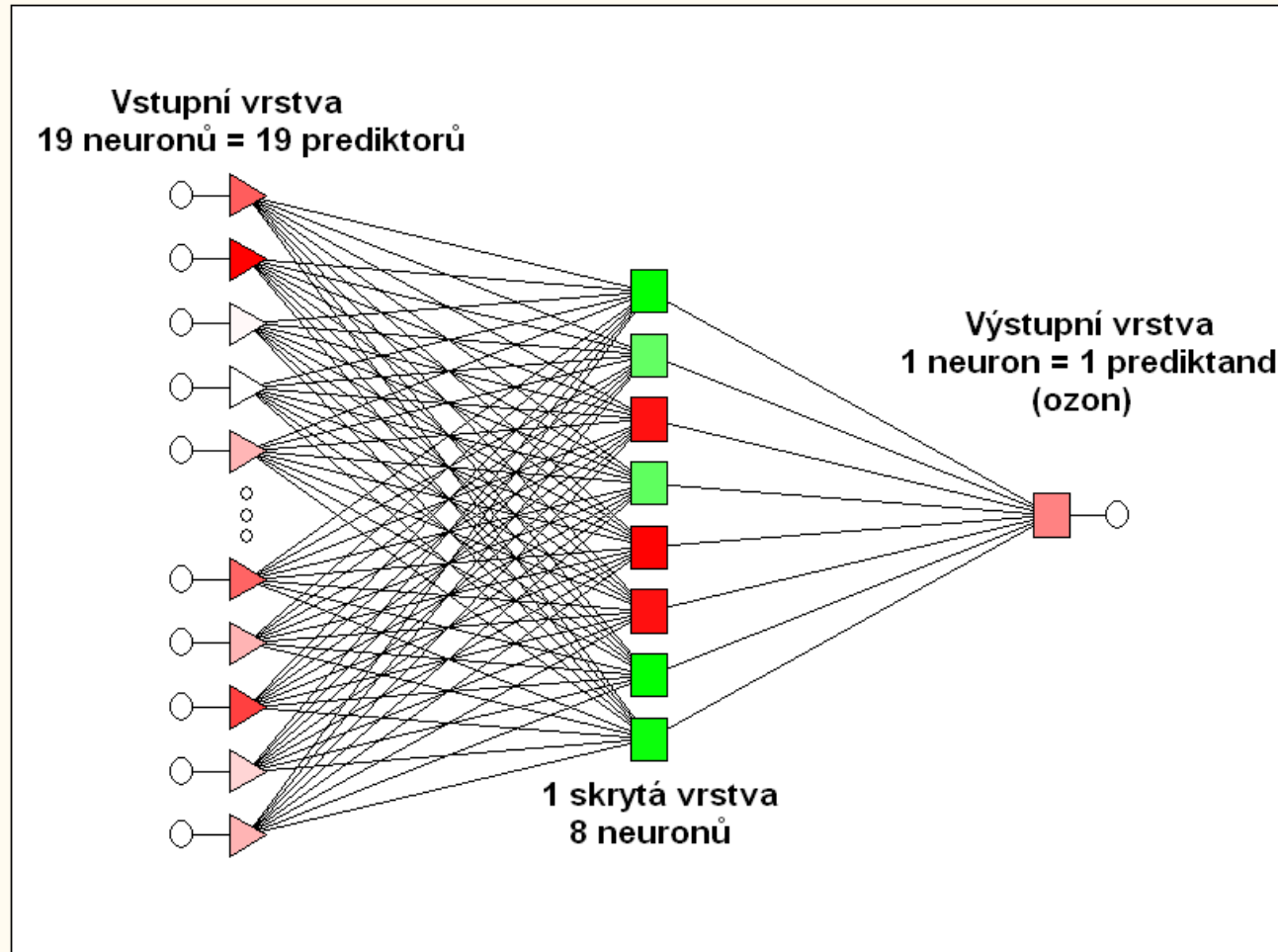
**19 neuronů ve vstupní vrstvě** nelze měnit (dáno počtem nezávisle proměnných - prediktorů)

**1 neuron ve výstupní vrstvě** rovněž nelze měnit (dáno počtem závisle proměnných – prediktandů)

Lze měnit počet skrytých vrstev a počet neuronů v nich

**Výsledek testů:**

síť s **1 skrytou vrstvou** a **8 neurony** v ní (architektura **19-8-1**)



Vytrénován ansámbl celkem 99 jednotlivých sítí s křížovou validací  
Výsledek = průměr přes ansámbl

## Kvalita výsledného modelu:

Měsíc Month	AVG	STE	STD	REL STD	$r_{xy}$	Měsíc Month	AVG	STE	STD	REL STD	$r_{xy}$
I	0,68	1,36	9,62	3,0%	0,92	VII	-0,59	0,56	3,94	1,2%	0,95
II	-0,02	0,73	5,18	1,3%	0,98	VIII	-0,85	0,63	4,46	1,4%	0,92
III	-0,77	0,86	6,09	1,5%	0,97	IX	0,39	0,69	4,86	1,6%	0,87
IV	0,08	1,03	7,29	1,9%	0,94	X	1,06	0,64	4,54	1,6%	0,94
V	0,95	0,79	5,60	1,5%	0,95	XI	-0,12	0,90	6,37	2,2%	0,82
VI	1,27	0,70	4,98	1,4%	0,94	XII	2,02	1,02	7,24	2,3%	0,90

Korelace mezi modelovými výstupy a naměřenými daty:

- poměrně vysoké
- vykazují sezonní závislost

Relativní směrodatná odchylka

- nízká (nižší než u dosud publikovaných výsledků lineárních modelů)
- rovněž se sezonní závislostí

Hodnoty AVG srovnatelné s STE → systematická chyba malá ve srovnání s nejistotou jejího odhadu

## Citlivostní analýza:

ukazuje, jak by se model zhoršil, kdybychom vyřadili daný prediktor  
(*vyšší poměr = větší zhoršení = důležitější prediktor*)

Prediktor Predictor	Hladina nebo PC komponenta Level or the PC component	Poměr Ratio
SIN polohy měsíce v ročním chodu	---	3,13
Teplota	300 hPa	2,67
Teplota	PC 2	2,31
Geopotenciál	PC 2	2,22
Teplota	100 hPa	2,21
Specifická vlhkost	200 hPa	2,05
Tlak	TROPOPAUZA	1,71
COS polohy měsíce v ročním chodu	---	1,65
Teplota	150 hPa	1,65
Potenciální vorticity	200 hPa	1,58
Relativní vlhkost	100 hPa	1,43
EESC (model WMO 2010)	---	1,36
Specifická vlhkost	150 hPa	1,34
Relativní vlhkost	200 hPa	1,31
Relativní vlhkost	PC 2	1,30
Relativní vlhkost	150 hPa	1,16
AOD	PC 1	1,12
Zonální vítr	PC 4	1,08
Sluneční aktivita (radiový tok na 2800 MHz)	---	1,07

Např. z UT/LS prediktorů je důležitější teplota (i její vertikální profil) než vlhkost (a její vertikální profil), důležitý je i tlak v tropopauze, málo důležitý je naopak zonální vítr nebo sluneční aktivita.

EESC je nejsilnější forcing, následují aerosoly a sluneční aktivita

## Odhad vlivu jednotlivých faktorů na celkový ozon:

„Kontrolní“ výpočet“ - všechny prediktory z pozorování

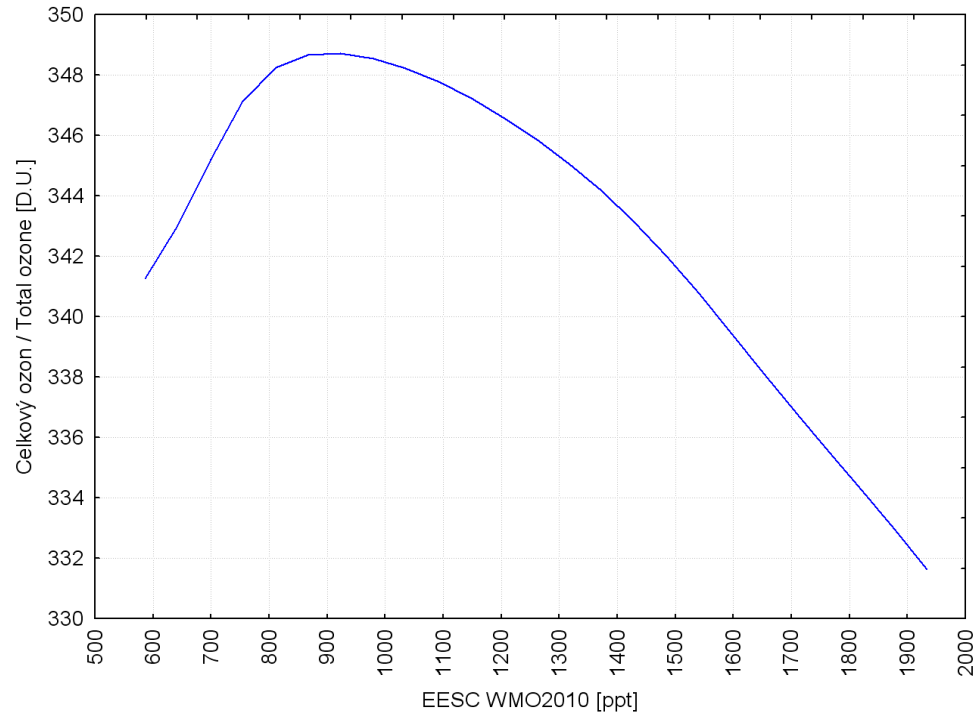
„Experimentální“ výpočet – jeden prediktor na konstantní hodnoty, ostatní z pozorování

Rozdíl hodnot celkového ozonu mezi „kontrolním“ a „experimentálním“ výpočtem = vliv daného prediktoru na celkový ozon

Experiment s:

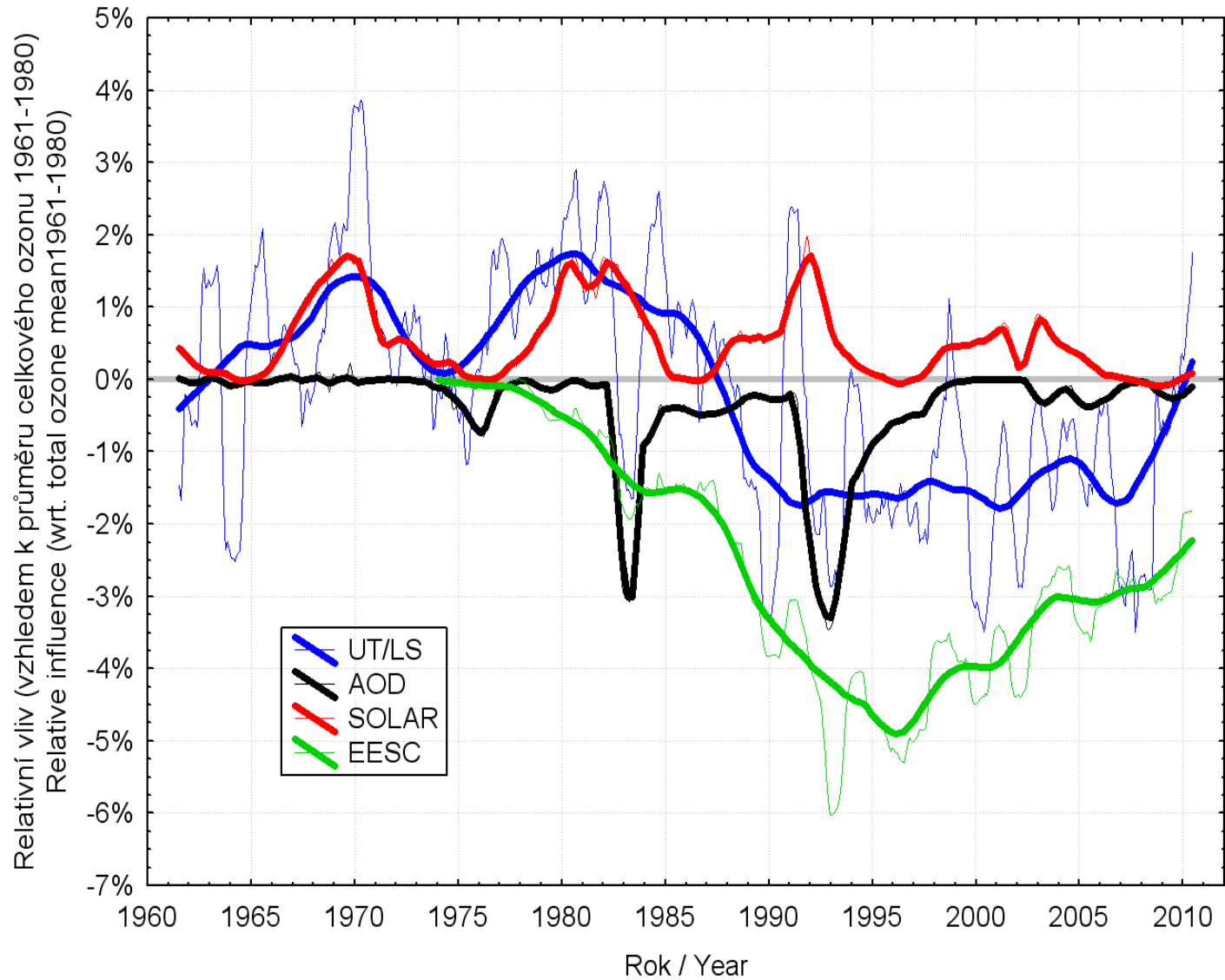
- AOD - hodnoty AOD nastaveny na nulu („čistá“ stratosféra)
- Sluneční aktivitou – radiový tok nastaven na konstantní hodnotu, odpovídající minimu sluneční aktivity
- UT/LS – není možné měnit jednotlivé hodnoty nezávisle na ostatních (fyzikální vazby mezi nimi) – nutno brát jako celek. V experimentu nastaveny hodnoty všech prvků na jejich měsíční mediány (průměry ne – vazby jsou nelineární). To zachovává střední roční chod, ale odstraňuje trend a do značné míry i šum.

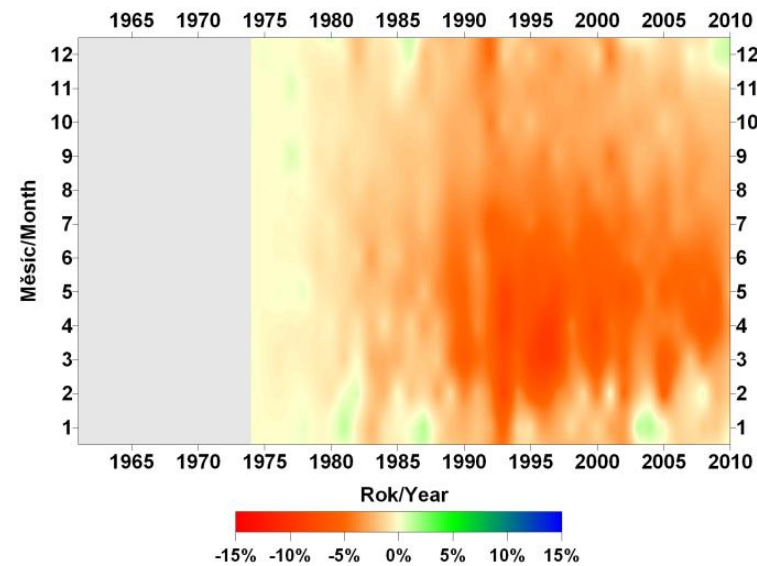
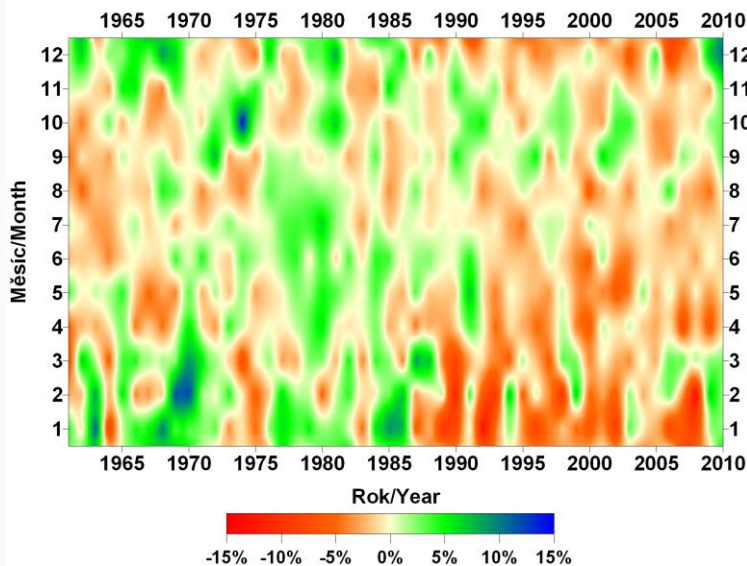
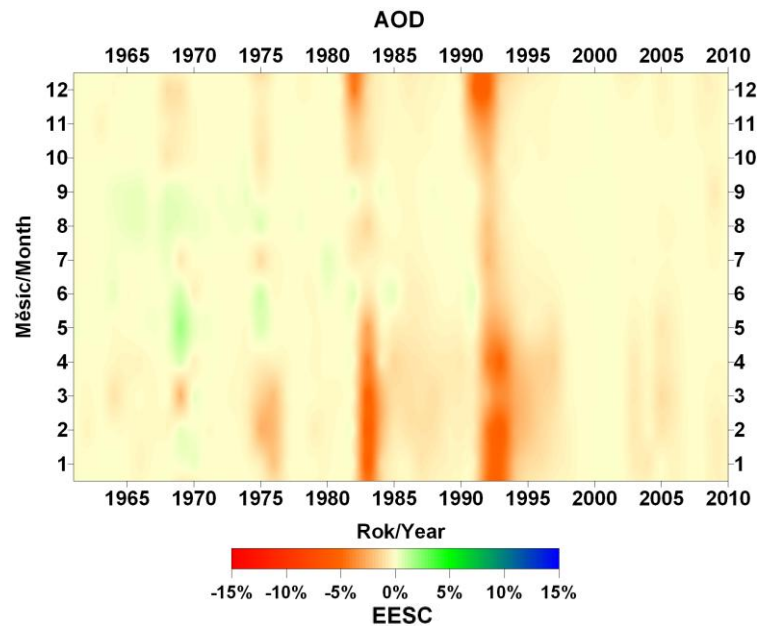
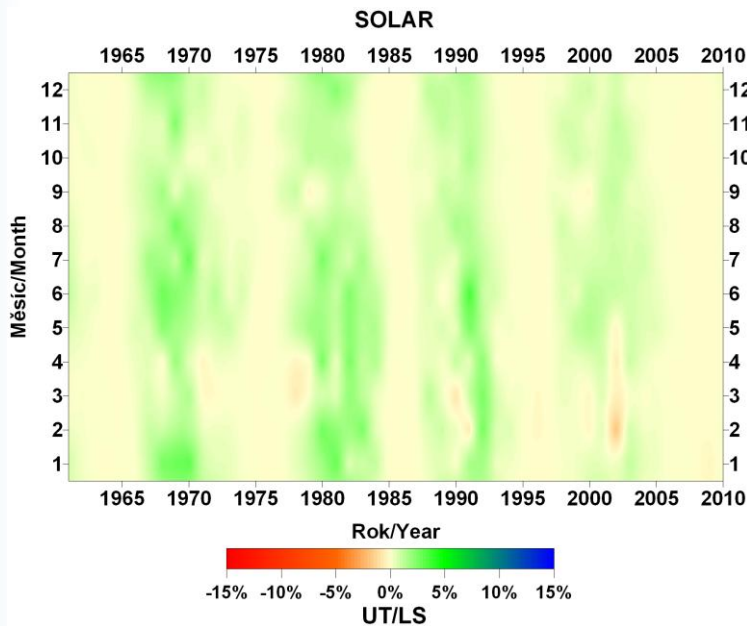
- EESC – odezvový graf modelu:



Do 900 ppt závislost nelogická (???), slabý signál zřejmě překryt šumem → 900 ppt je mez detekovatelnosti signálu EESC modelem  
Pro experiment zvoleny hodnoty  $\min(900; EESC)$

## Vliv jednotlivých faktorů:

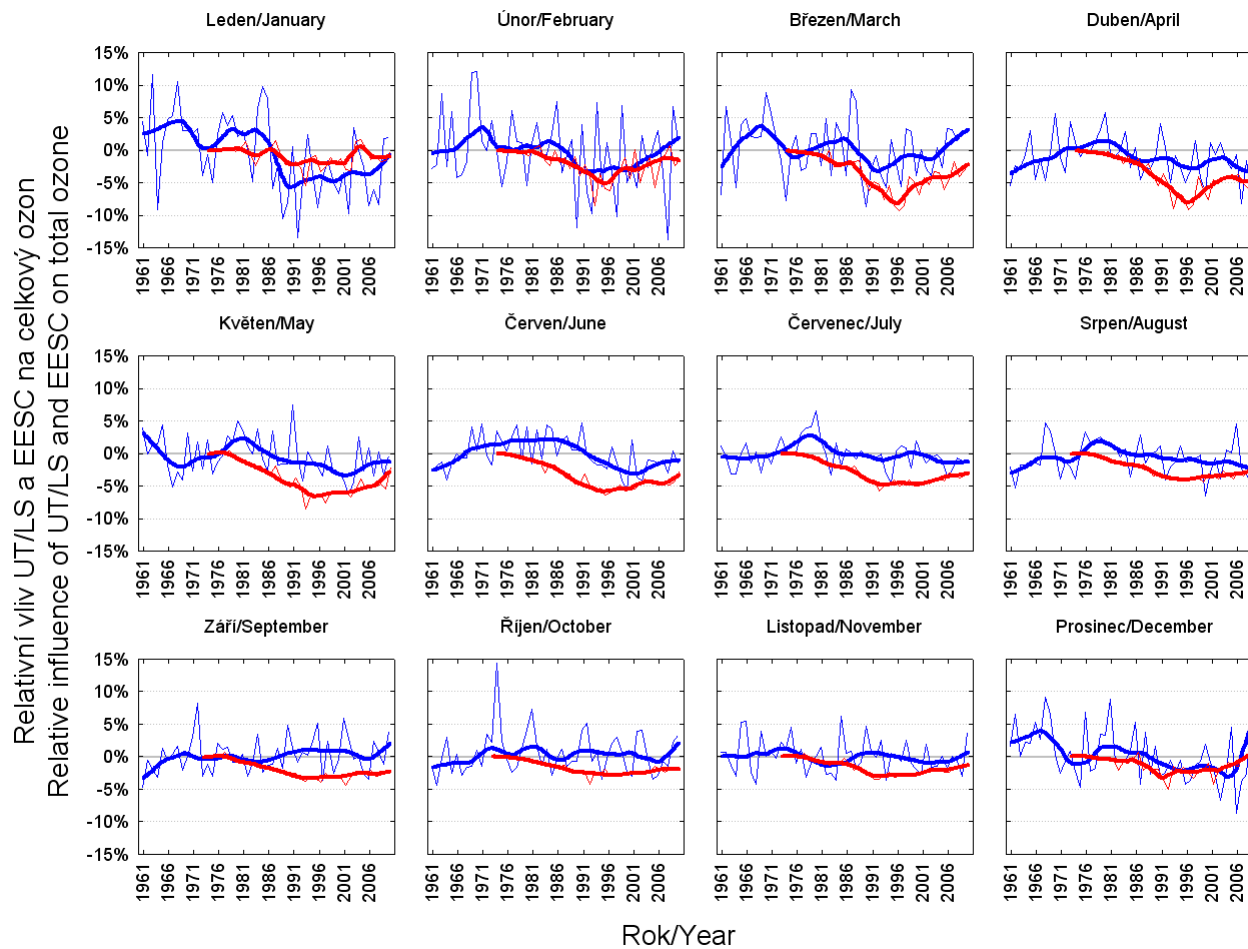






## Porovnání vlivu EESC a UT/LS po měsících

### EESC UT/LS





## UT/LS prediktory

Vzájemně propojeny fyzikálními vazbami – nemění se nezávisle na sobě – PCA

Měsíc Month	PC1	Měsíc Month	PC1
I	67%	VII	69%
II	67%	VIII	67%
III	66%	IX	77%
IV	68%	X	80%
V	76%	XI	70%
VI	74%	XII	69%

Potvrzuje vysoký podíl „společné“ variability a vzájemnou souvislost

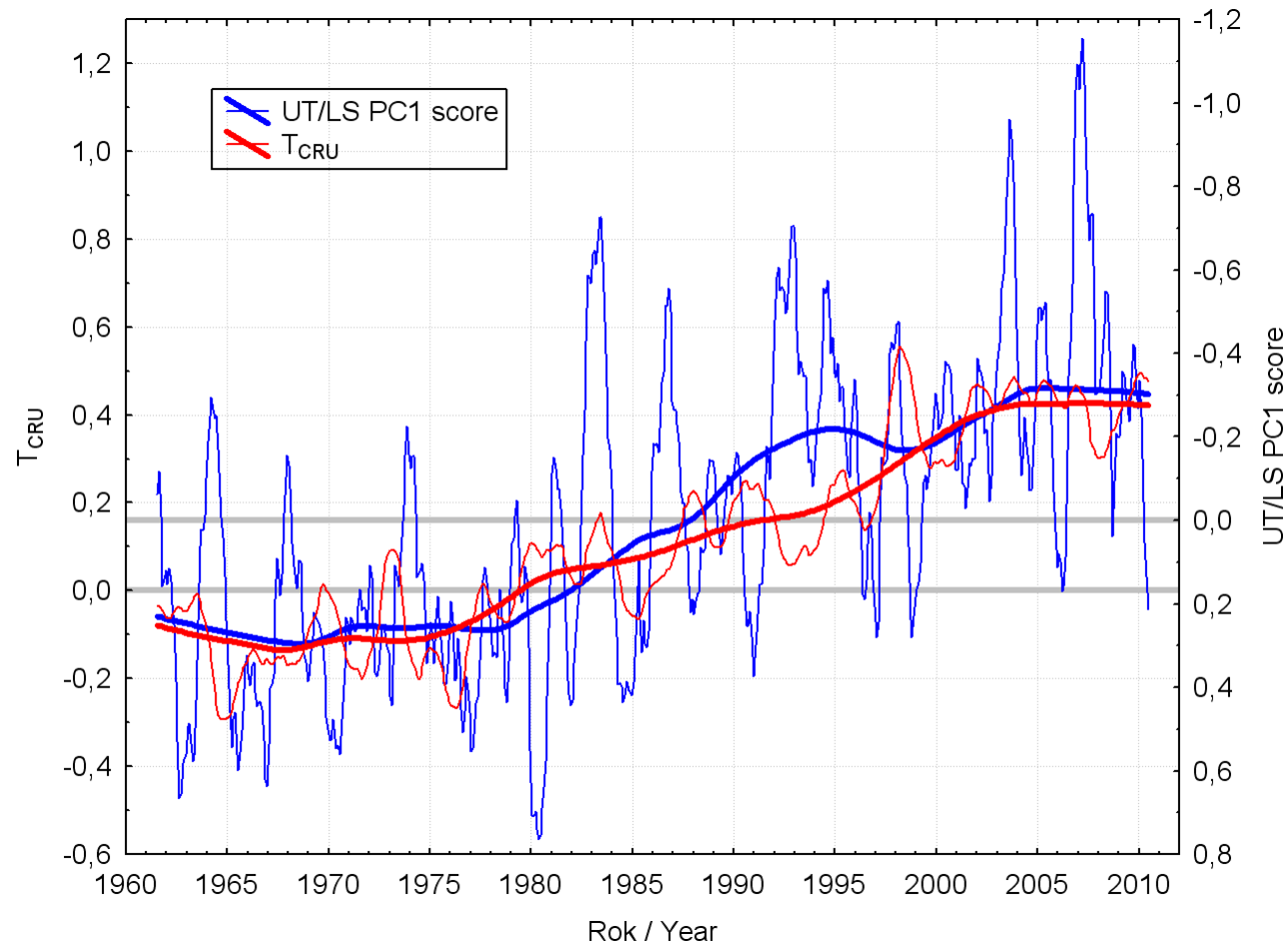
Další analýzy změn UT/LS parametrů:

- Nárůst teploty v horní troposféře a pokles teploty ve spodní stratosféře a s tím spojené změny vertikálního profilu geopotenciálu
- Pokles tlaku v tropopauze (tropopauza výše)
- Nárůst specifické a relativní vlhkosti ve spodní stratosféře

Konzistentní s předpokládanými i pozorovanými důsledky změny klimatu

Propojení problematiky změn klimatu se změnami ozonové vrstvy

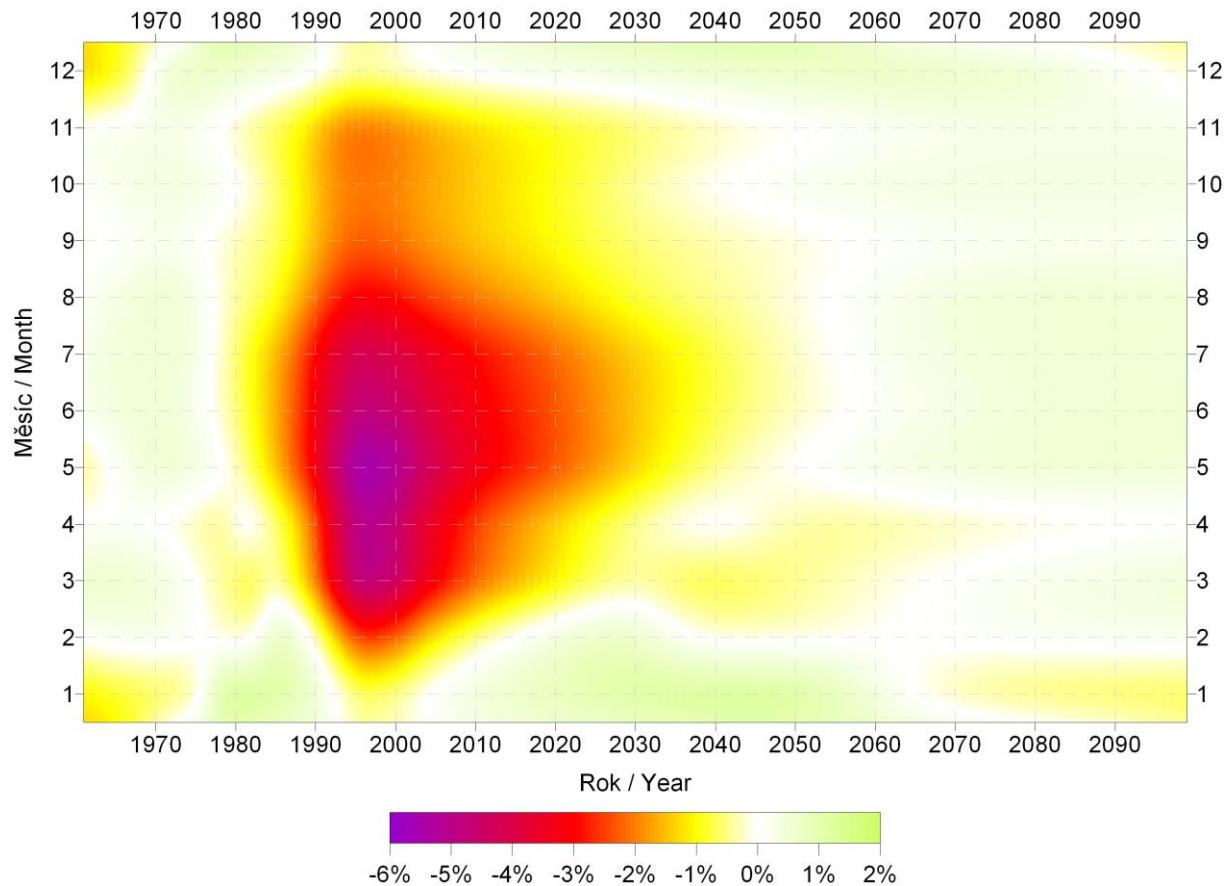
## Pravděpodobná souvislost je vidět i z porovnání 1.hlavní PCA komponenty UT/LS parametrů a vývoje průměrné globální teploty podle CRU



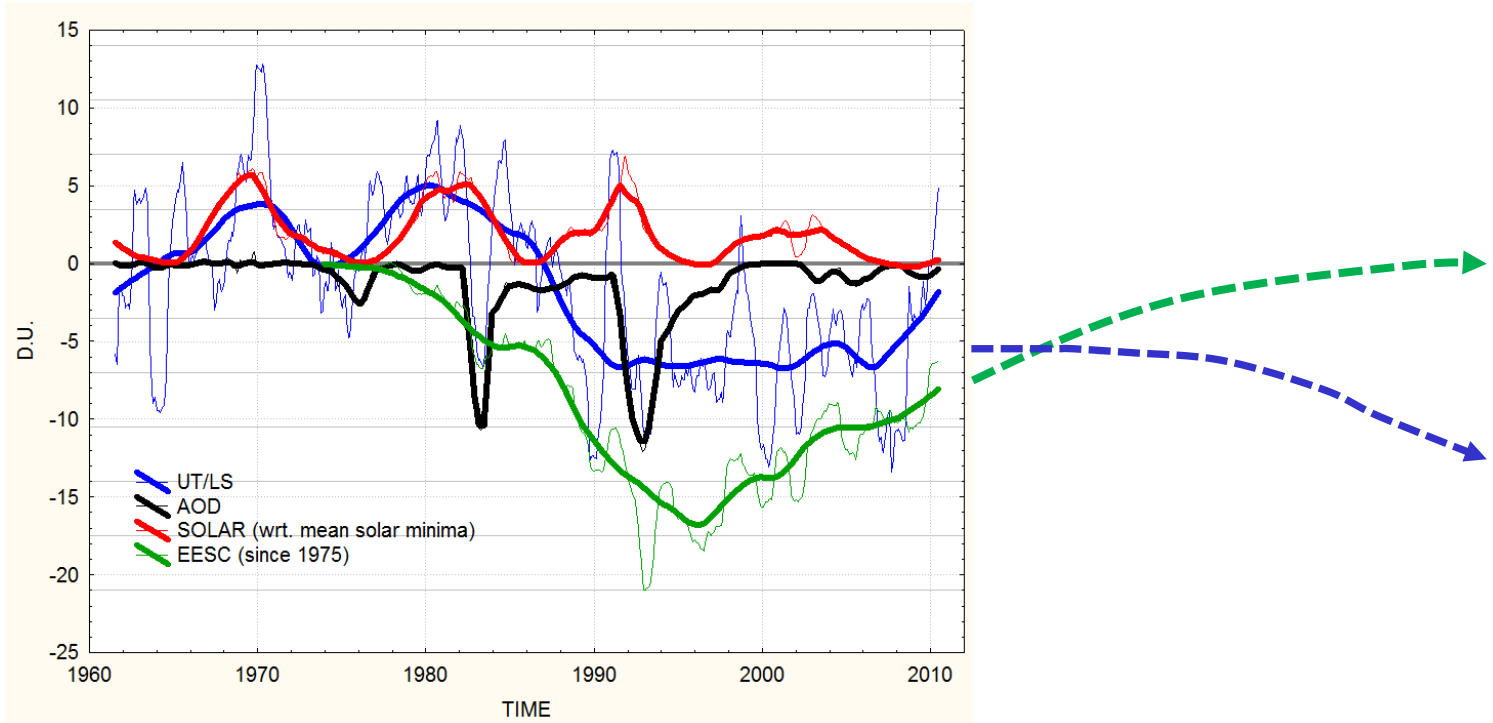
## Vliv EESC do budoucnosti

Experiment s AOD = 0, UT/LS = mediány, sluneční aktivita = průměr  
EESC podle modelu WMO2010

Změny celkového ozonu vyjádřeny relativně k průměru 1961-1980



## Možné scénáře



Vliv změn EESC: pokles (Montrealský protokol a jeho dodatky)

Vliv změn UT/LS: možný nárůst (souvislost se změnami klimatu)

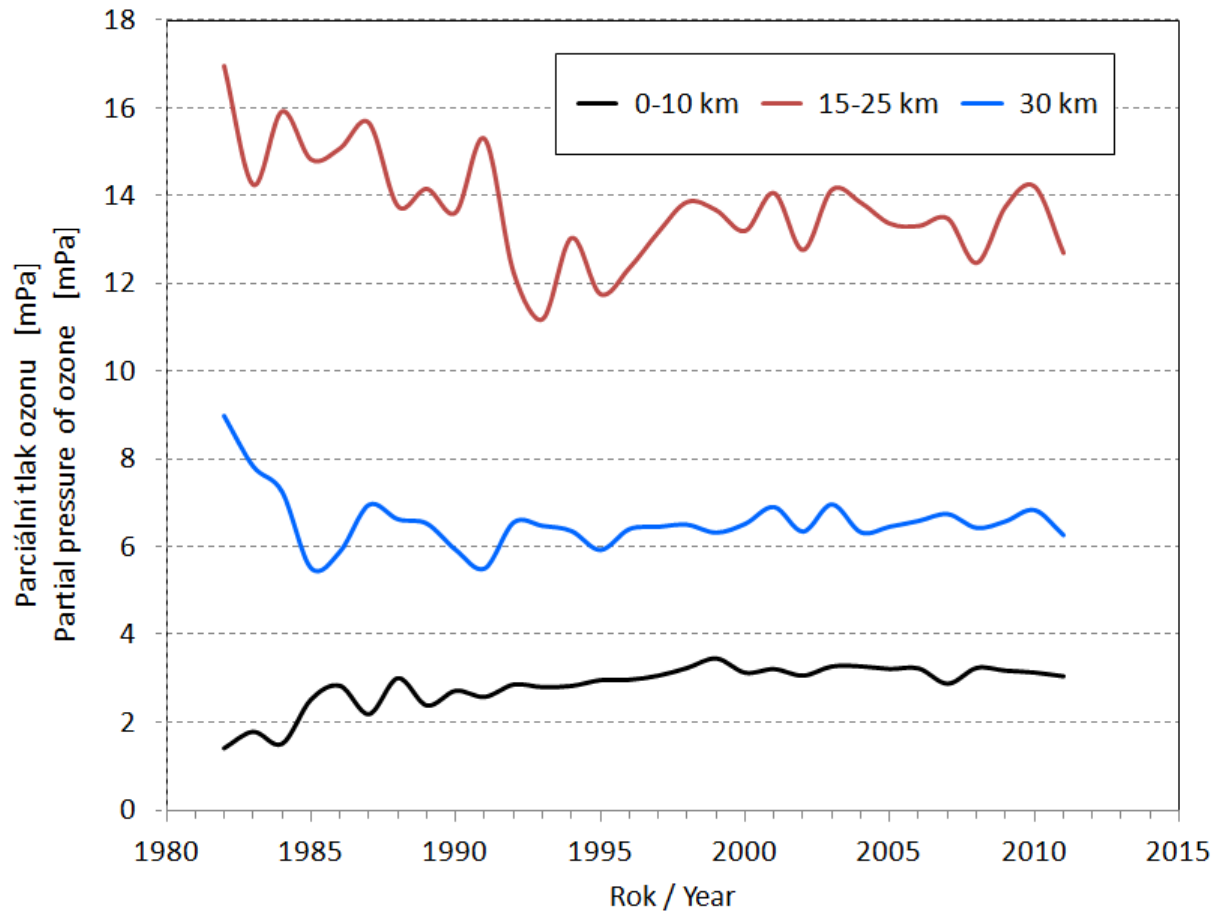
Cca po 2020: Vliv EESC bude menší než vliv UT/LS

**Další růst vlivu UT/LS – stabilizace ozonu na nižší úrovni, než „předfreonová“ nebo i nové mírné poklesy ozonu**

Jsou ale i další teorie – „superrecovery“ v mírných šířkách (zesílení Brewer-Dobsonovy cirkulace – dynamicko-chemické modely)

**NEJASNÉ, nutné další analýzy s použitím scénářových UT/LS parametrů z klimatických modelů (CMIP3, CMIP5, vlastní integrace,...)**

## Sondáže Libuš, 1983-2011, leden - duben



## Shrnutí

- Regenerace ozonové vrstvy zjevně způsobena poklesem EESC (Montrealský protokol a jeho dodatky)
- Nejvýraznější úbytek ozonu ve vrstvě 15-25 km s podstatnou obnovou v 2. polovině 90. let
- Výrazný nárůst obsahu ozonu v troposféře 1980-2000, nyní stabilní
- Nečekané zeslabení ozonové vrstvy v letních měsících (2011,2012) - důsledek změny cirkulace v UT/LS v oblasti Evropy. Vazba na změnu klimatu?
- Prognóza obnovení ozonové vrstvy na úroveň 1985 ~ v zimě cca 2020, v létě cca 2050
- Souvislost se změnami klimatu není dostatečně jasná, závěry někdy protichůdné
- Obnova O<sub>3</sub> závislá i na „skleníkového efektu“, tj. na změnách klimatu

Více podrobností v Závěrečné zprávě projektu GA ČR č. P209/10/0058, 2012



