

Vodní režim rostlin

- **Stomatální vodivost a transpirace**
 - Vliv faktorů prostředí - obecně
 - Změny během dne
 - Interakce různých faktorů
 - Aklimace
 - Adaxiální a abaxiální epidermis
 - Ontogeneze
 - Matematické modelování
 - Rychlost otevírání a zavírání
 - Průduchy - důležité charakteristiky svěracích buněk

Průduchy a podmínky prostředí

- Průduchy tvoří svěrací buňky + 1-3 páry podpůrných buněk
- Otevřenost průduchů závisí na tlakovém potenciálu svěracích buněk a elasticitě jejich buněčné stěny a na tlakovém potenciálu podpůrných buněk a ostatních epidermálních buněk
- Primární úloha průduchů je optimalizovat příjem CO₂ a výdej H₂O při měnících se podmínkách prostředí
- Podmínky prostředí:
 - bezprostřední vliv
 - aklimace
 - adaptace
 - Působení faktorů přímé nebo zprostředkované
 - Zpětné vazby
- Reakce průduchů závisí na druhu rostlin, stáří, postavení listu na rostlině, liší se u adaxiální a abaxiální epidermis, v rámci listové čepele
- Isohydrické a anisohydrické rostliny

Otevření průduchů závisí nejen na tlakovém potenciálu svěřacích buněk, ale též na tlakovém potenciálu okolních epidermálních buněk (Franks 2003)

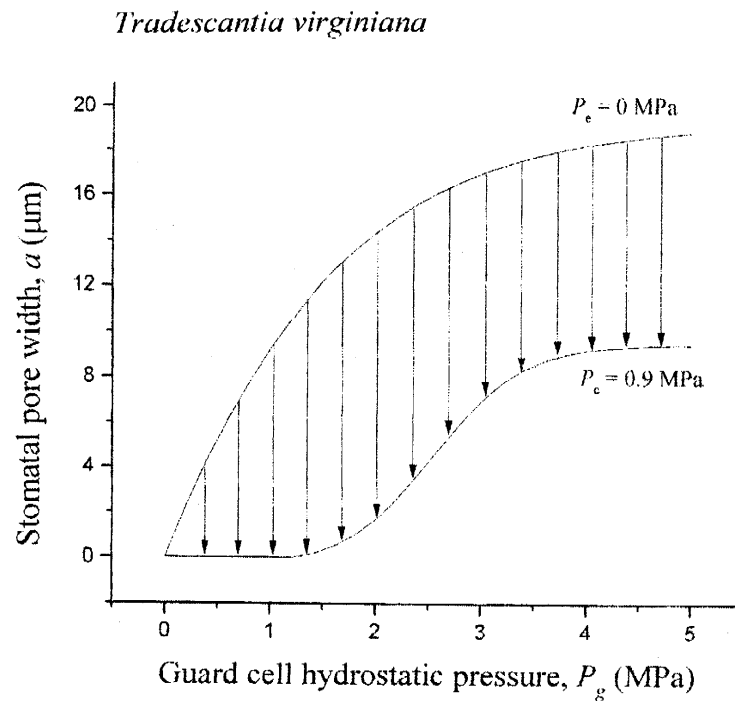
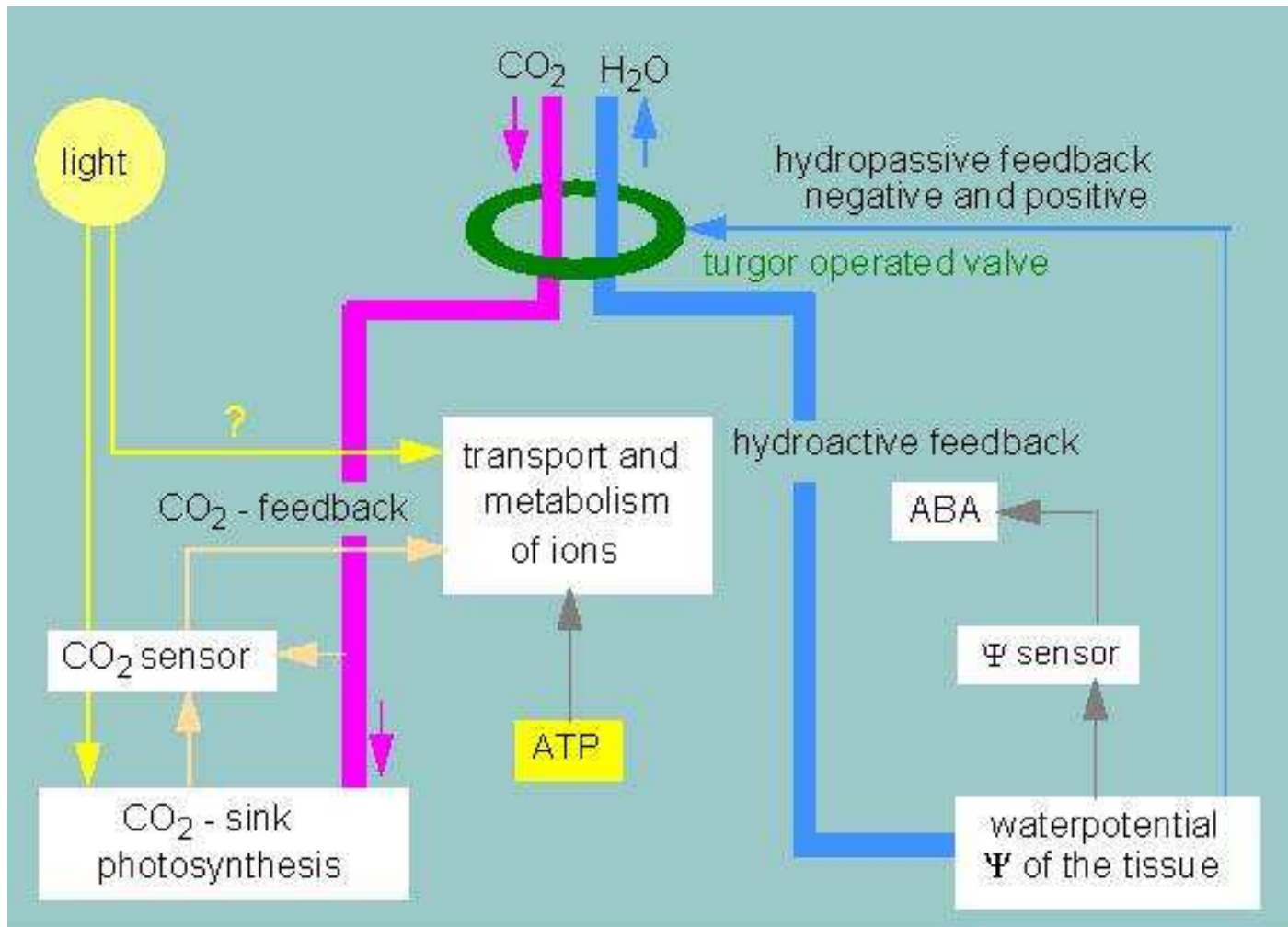
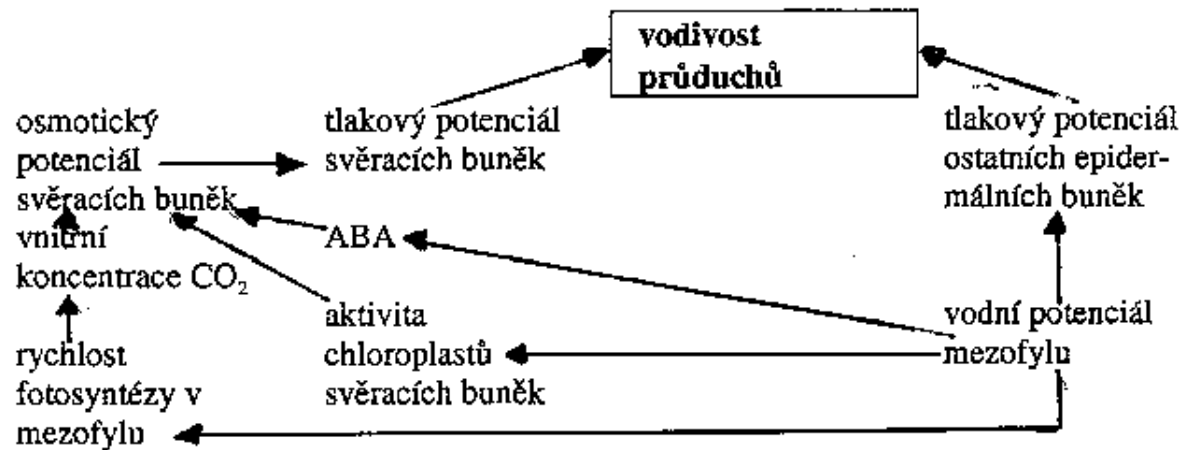
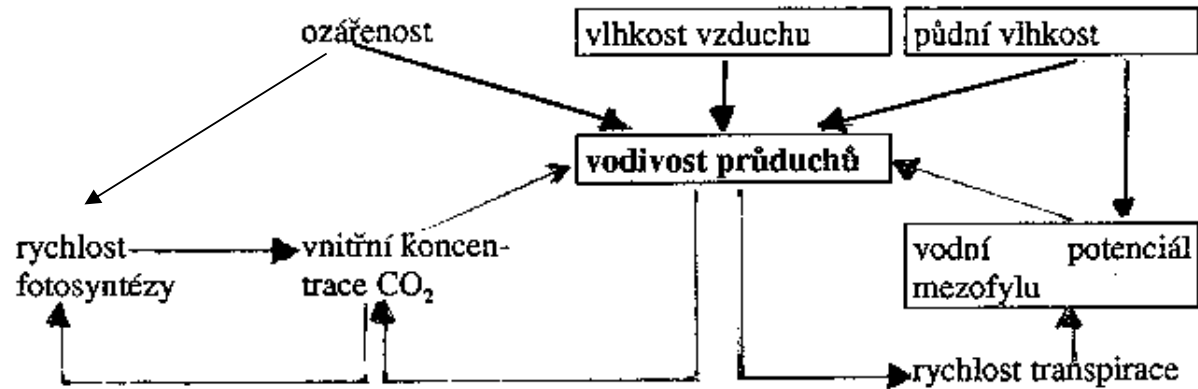


Fig. 3. Relationship between stomatal aperture and guard cell hydrostatic pressure for *Tradescantia virginiana*, adapted from Franks *et al.* (1998). Arrows indicate the reduction in aperture with increasing epidermal pressure and constant guard cell pressure.



Současné působení více faktorů, zpětné vazby



Současné působení více faktorů

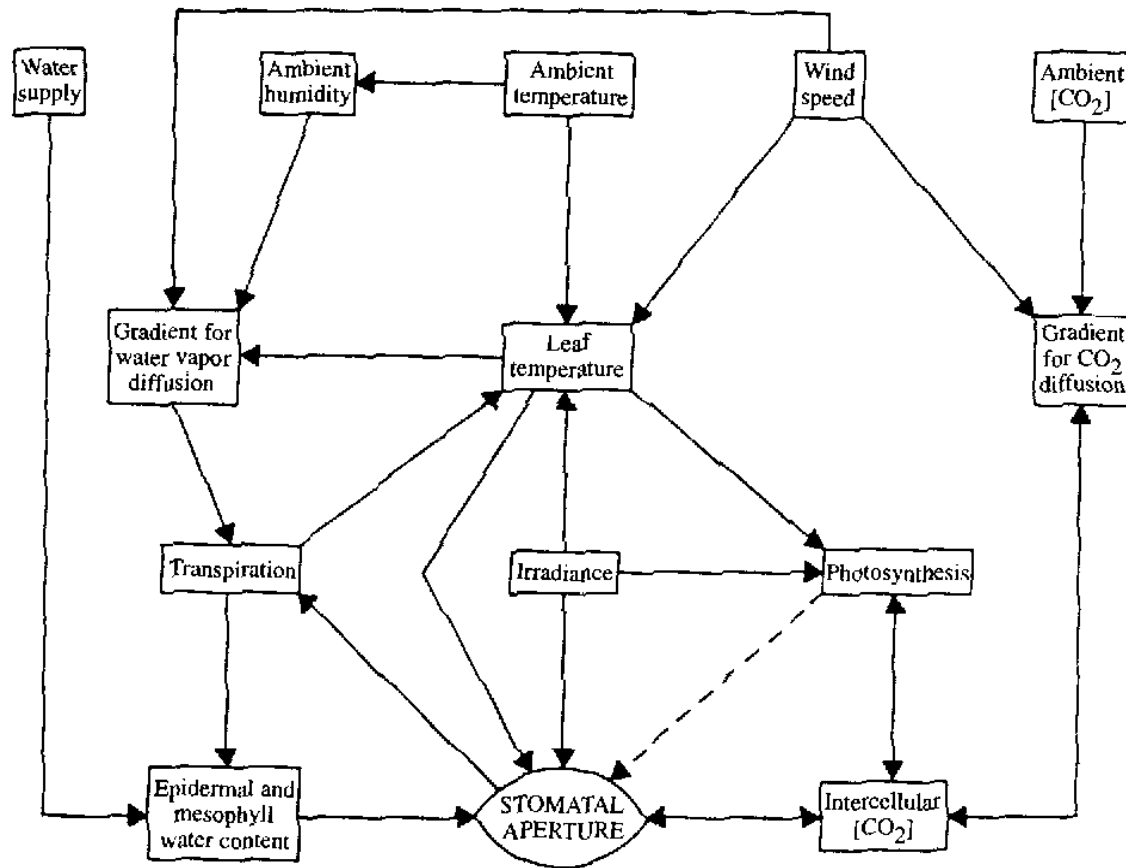
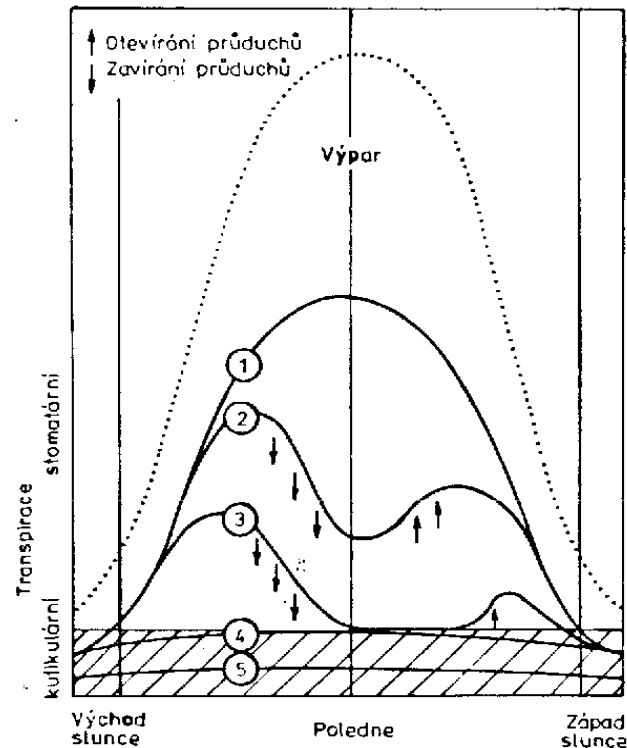


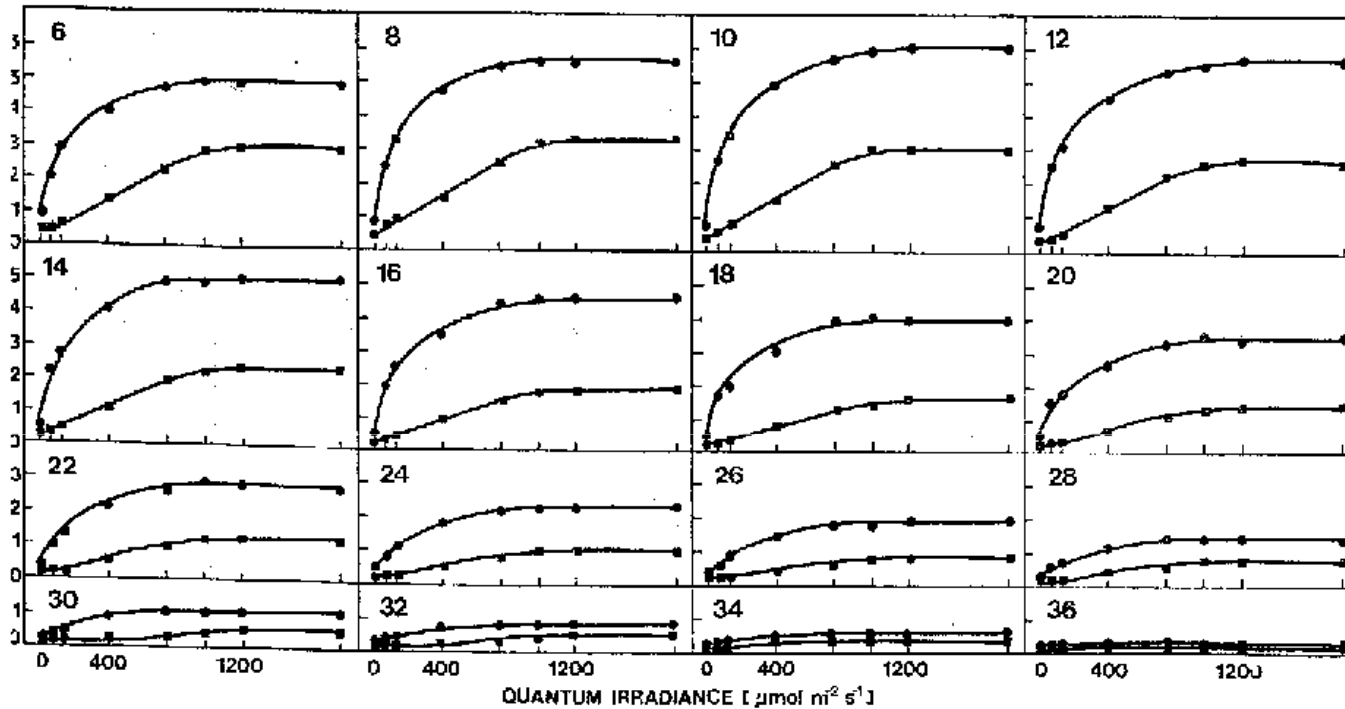
FIGURE 12.5. Important interrelationships among major environmental variables and physiological processes influencing stomatal aperture. Arrows indicate influences between factors; dashed line indicates a relationship based on weak evidence. From Weyers and Meidner (1990). "Methods in Stomatal Research." Longman Group.

Denní chod otevřenosti průduchů a stomatální a kutikulární transpirace



Obr. 5.27. Změny denního průběhu transpirace při postupně se zhoršujícím zásobování rostlin vodou (křivky 1 až 5). Šipky označují pohyby průduchů (zavírání nebo otevírání) vyvolané změnami vodní bilance rostlin. V dolní části obrázku je vyznačen rozsah, v němž probíhá pouze kutikulární transpirace. Jednotlivé křivky znázorňují: 1 – nízkou neomezenou transpiraci, 2 – polední snížení transpirace způsobené částečným uzavřením průduchů, 3 – transpiraci při úplném uzavření průduchů v poledních hodinách, 4 – úplné přerušení stomatální transpirace způsobené trvalým uzavřením průduchů (probíhá jen kutikulární transpirace), 5 – snížení kutikulární transpirace způsobené smršťováním membrán při vysychání. Podle Stockera (1956). Podrobný přehled reakcí a adaptací rostlin k nedostatku vody uvádějí Turner a Begg (1981).

Závislost g_s na ozáření u různě starých listů



6. Diffusive conductance of adaxial (■) and abaxial (●) epidermes of 6 to 36 d old primary leaves of *Phaseolus vulgaris* L. in response to irradiance. (Adapted from Solárová 1980.)

Závislost adaxiální a abaxiální g_s na ozáření

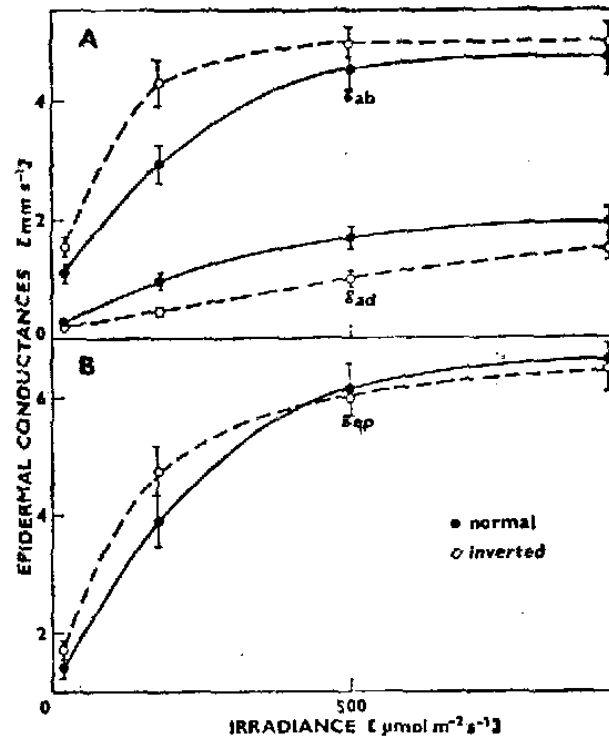


Fig. 2. Effect of irradiance of the leaf on the diffusive conductances of adaxial (g_{ad}) and abaxial epidermes (*above*) and on the total epidermal conductance (g_{ep} — *below*) of primary bean leaves grown and measured in the normal or the inverted position. Air temperature 25 °C, relative humidity 70 %.

Závislost g_s na vodním potenciálu a ozáření

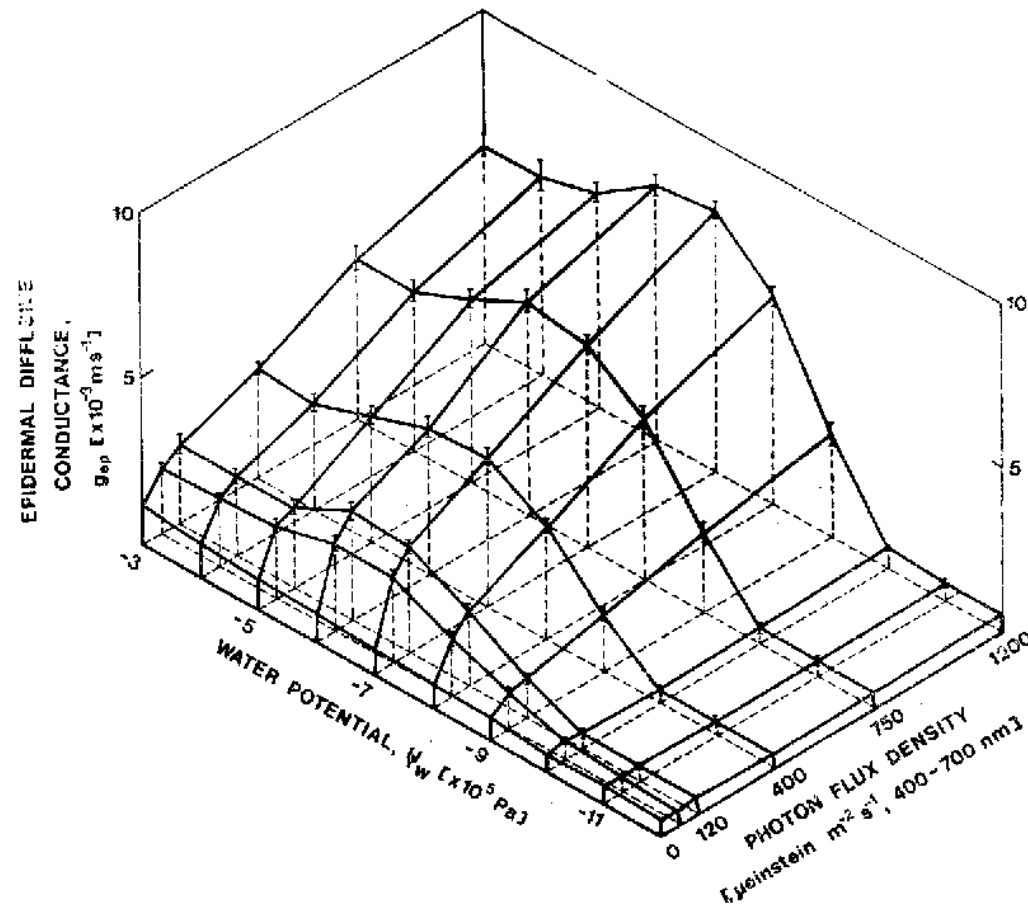
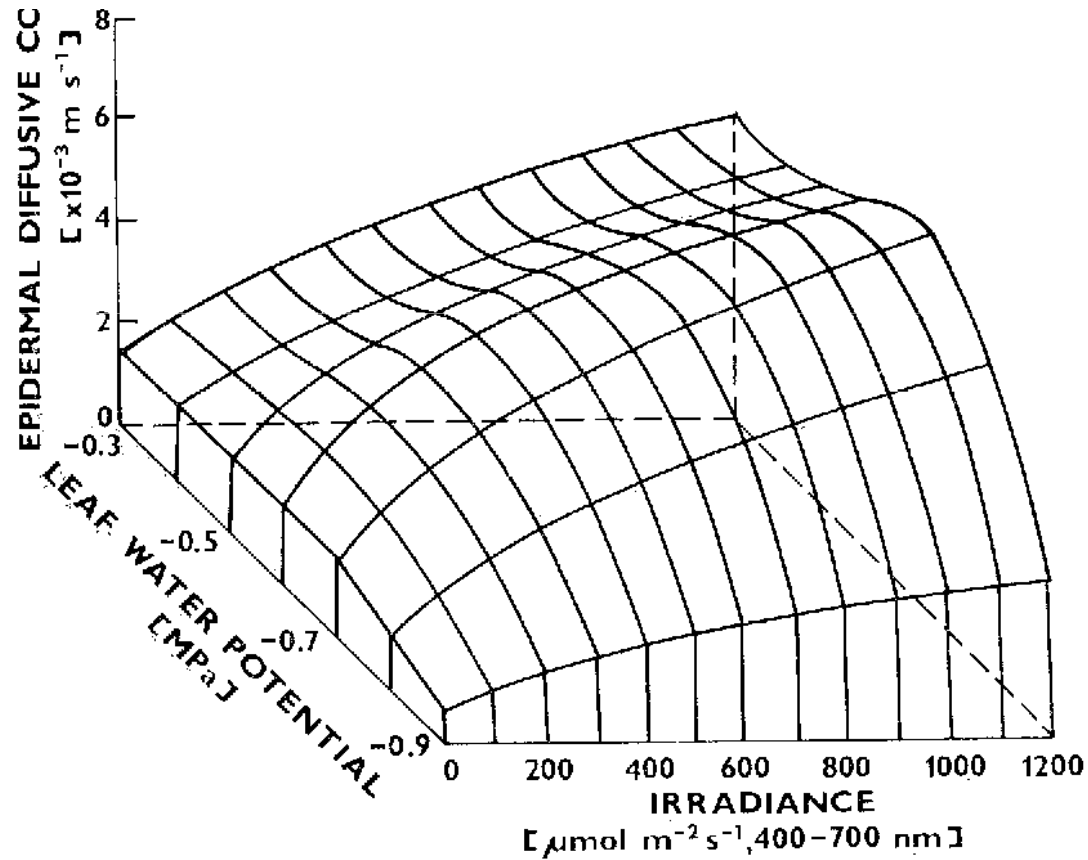


Fig. 1. Effect of photon flux density and water potential of primary bean leaves on diffusive conductance of their epidermes.

Závislost g_s na vodním potenciálu a ozáření

$$g_{ep}(I, X) = \sum_{i=0}^{(x)n_1} (x)a_i x^i + \sum_{j=0}^{(x)n_2} (x)b_j x^j \{1 - \exp[-\sum_{k=0}^{(x)n_3} (x)\alpha_k x^k I]\} \quad (4)$$

where $(x)a_i$, $(x)b_j$, $(x)\alpha_k$ are the $(x)y_i$ coefficients from Eq. (3) for $A(X)$, $B(X)$, $a(X)$; $(x)n_1$, $(x)n_2$, $(x)n_3$ are the degrees of single polynomials.



Závislost adaxiální a abaxiální g_s na vodním potenciálu listů u různě starých rostlin pěstovaných při různé ozáření

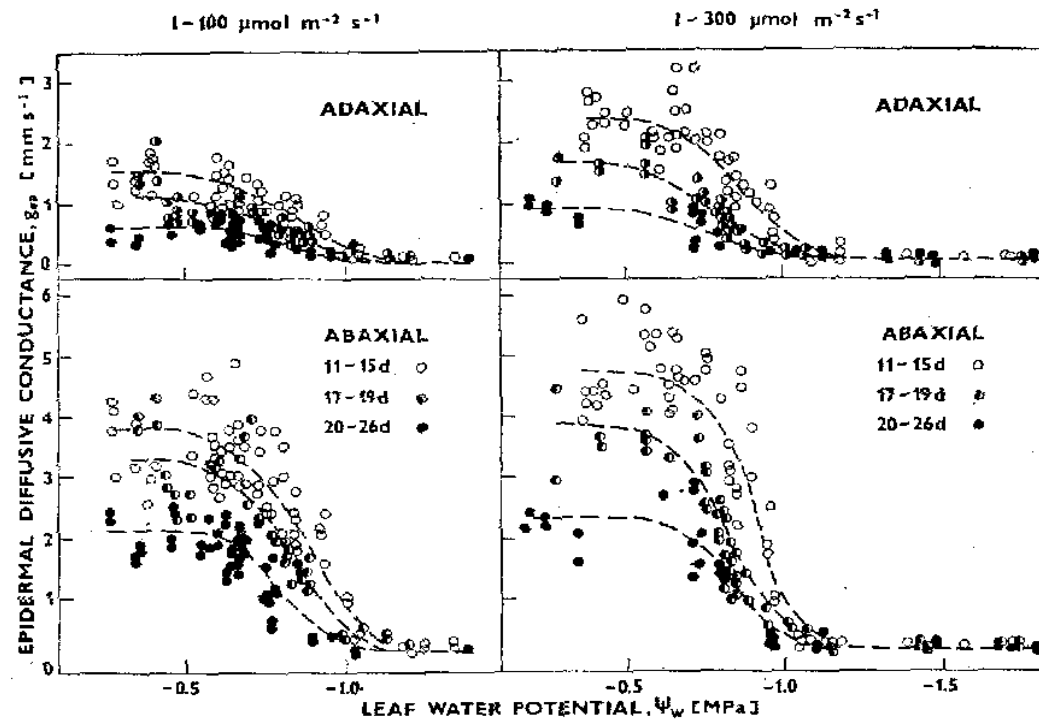


Fig. 3. Changes in the response of adaxial and abaxial epidermal conductances to decreasing leaf water potential during ontogeny of primary bean leaves [11 to 15 (○), 17 to 19 (◐), 20 to 26 (●) d old]. Comparison of seedlings grown under irradiance 300 and 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Závislost g_s na vodním potenciálu

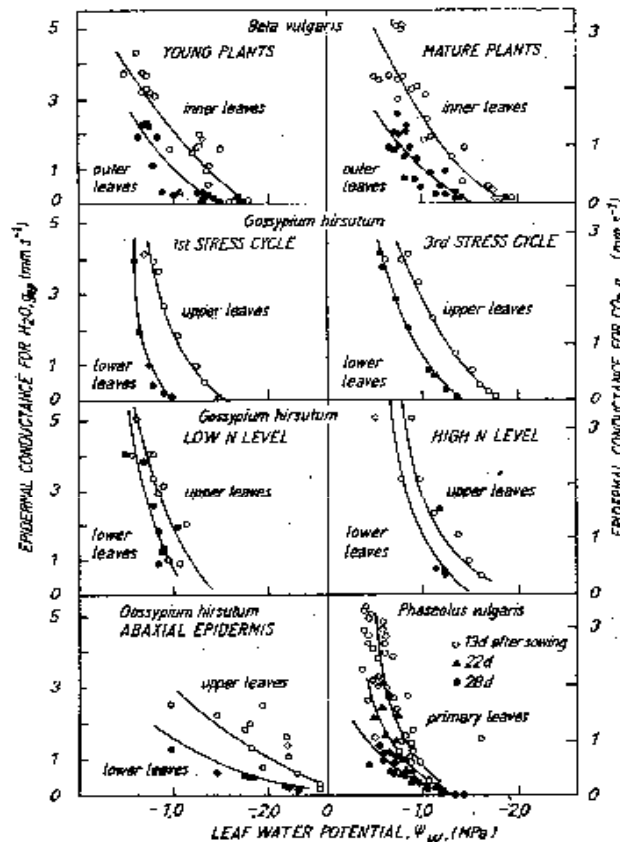


Fig. 2: Response of epidermal conductance to decrease in leaf water potential. Comparison of inner and outer leaves of young and mature plants of *Beta vulgaris* (after LAWLOR and MILFORD, 1975), upper and lower leaves of *Gossypium hirsutum* during the first and the third stress cycles (after AOKERSON, 1980), upper and lower leaves of *Gossypium hirsutum* under different nitrogen nutrition (after RADIN, 1981), abaxial epidermis of upper and lower leaves of *Gossypium hirsutum* grown under equalized level of irradiance (after JORDAN et al., 1973) and primary leaves of *Phaseolus vulgaris* during their ontogeny.

Cukrovka-vnější a vnitřní listy,
mladé a staré rostliny
Bavlník - horní a dolní listy,
1. a 3. cyklus vadnutí
Bavlník - různé zásobení dusíkem
Fazol - různé stáří rostlin

Změny g_s při různé vnitřní koncentraci CO_2 a ozáření

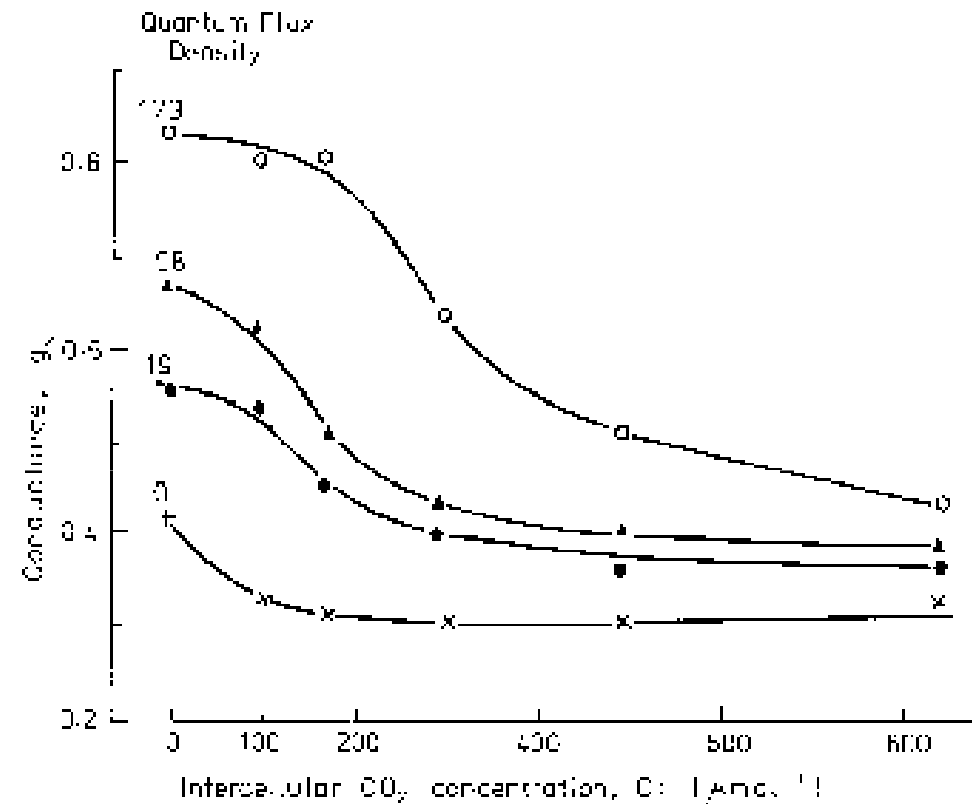
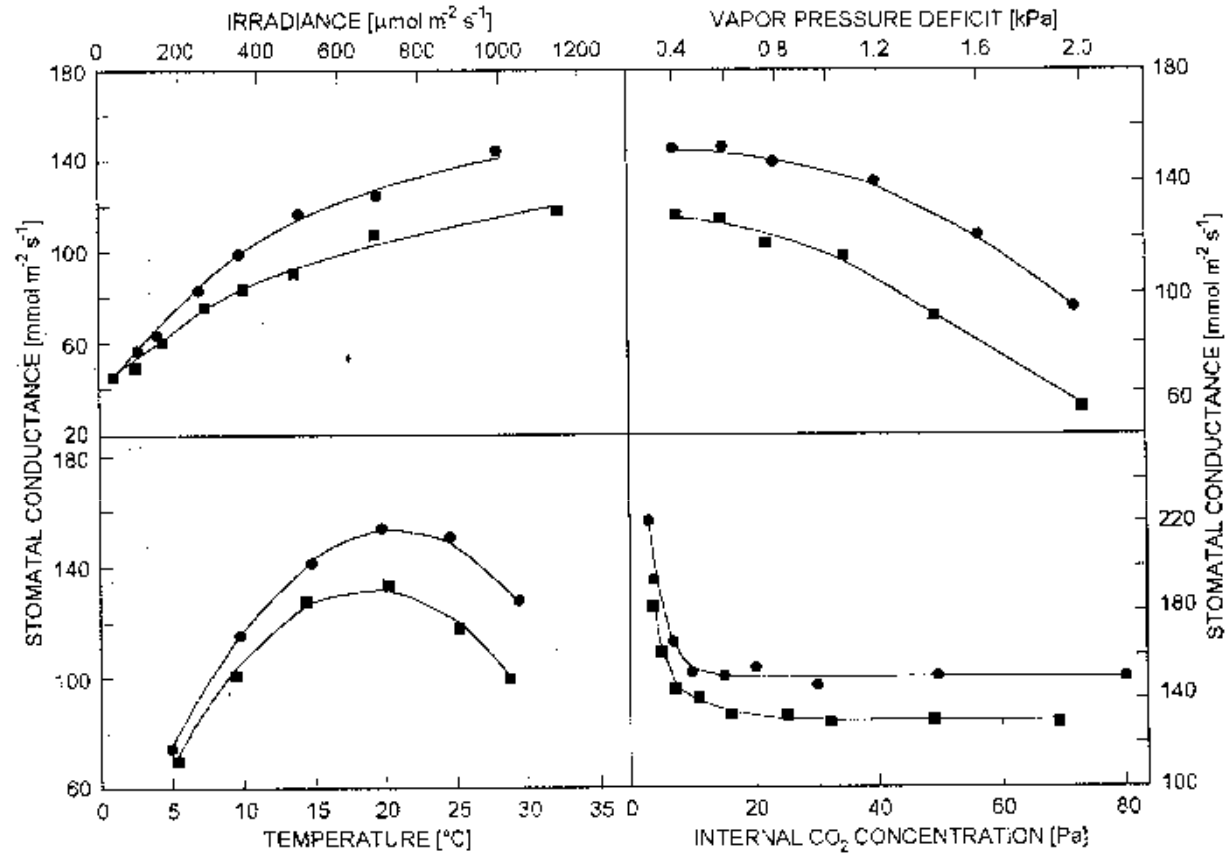


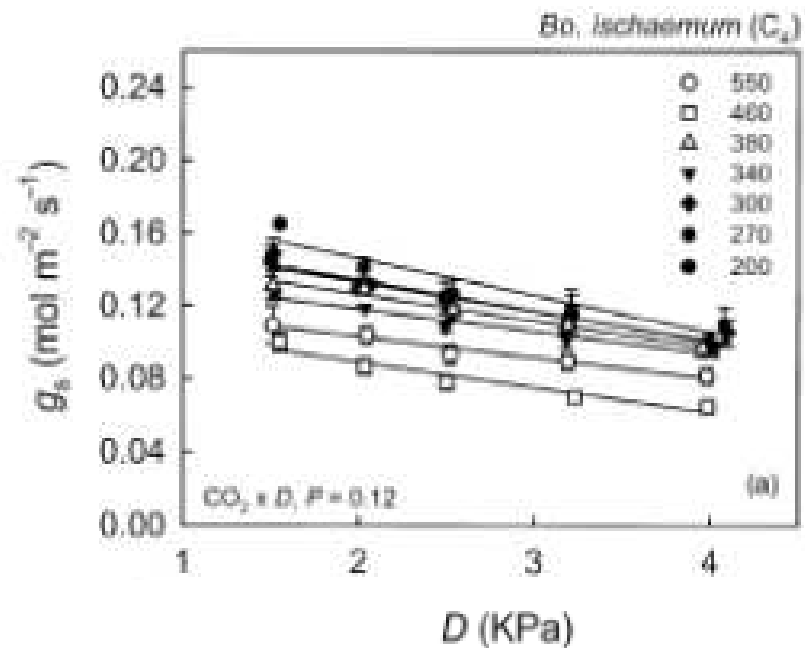
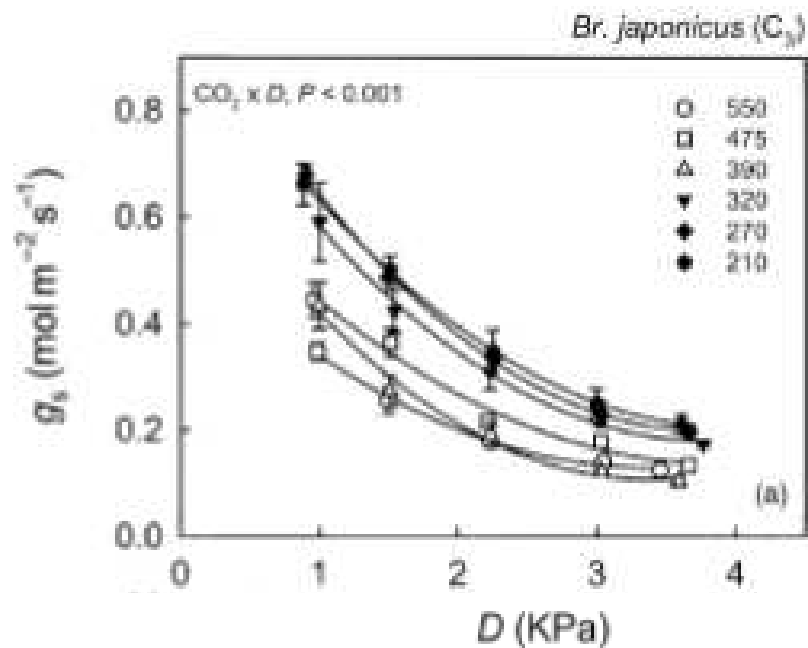
Fig. 10.1. Response of conductance, g_s , calculated as the reciprocal of viscous flow resistance in Gregory Pease units to CO_2 concentration in wheat leaves at four light intensities. (Adapted from Morison and Jarvis, 1983b, 107; original data from Heath and Russell, 1954.)

Vliv základních faktorů vnějšího prostředí na rostliny pěstované při různé koncentraci CO₂



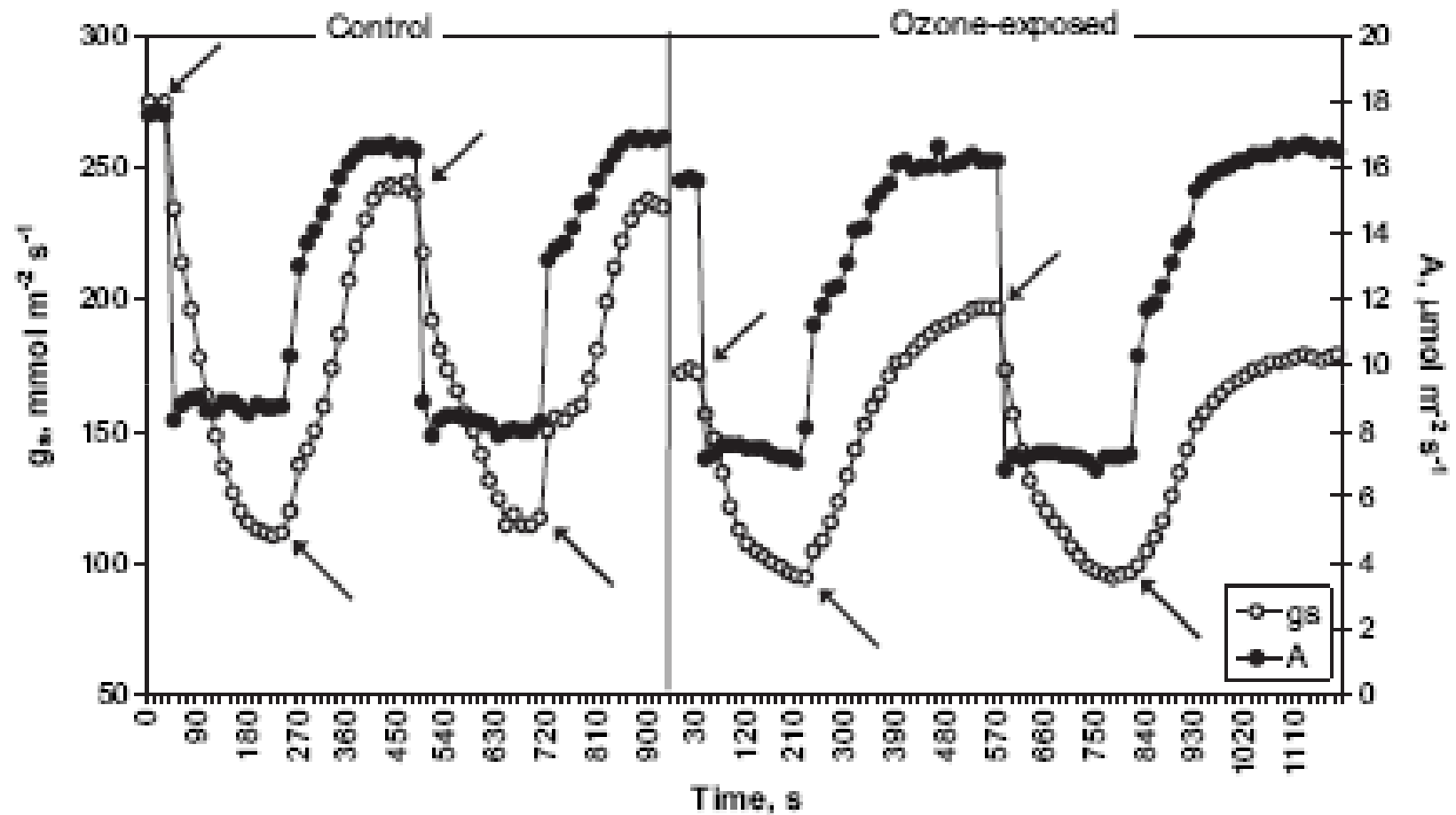
Stomatal conductance of *Pinus sylvestris* needles as a function of irradiance, temperature, vapor pressure deficit, and internal CO₂ concentration. Comparison of trees grown under ambient (circles) and elevated (squares) CO₂ concentration for 5 month. (Adapted from Wang and Kellomaki 1997).

Vliv pěstování při různé koncentraci CO₂ na reakci průduchů na vlhkost vzduchu u *Bromus japonicus* a *Botriochloa ischaemum* (Maheswari et al. 2003)

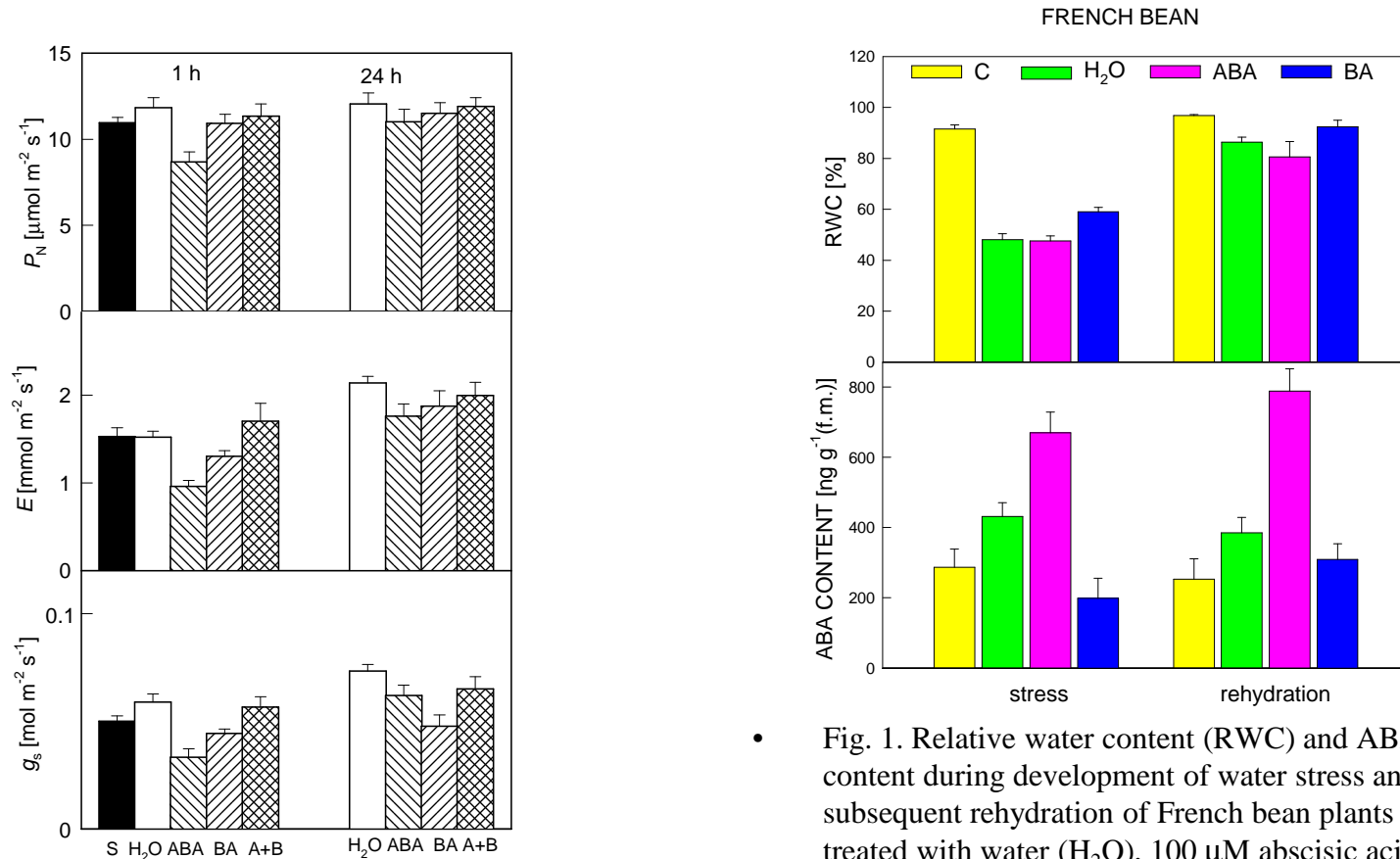


Vliv ozonu na reakci vodivosti průduchů na změny ozáření u fazolu.

(Paoletti and Grulke 2010)



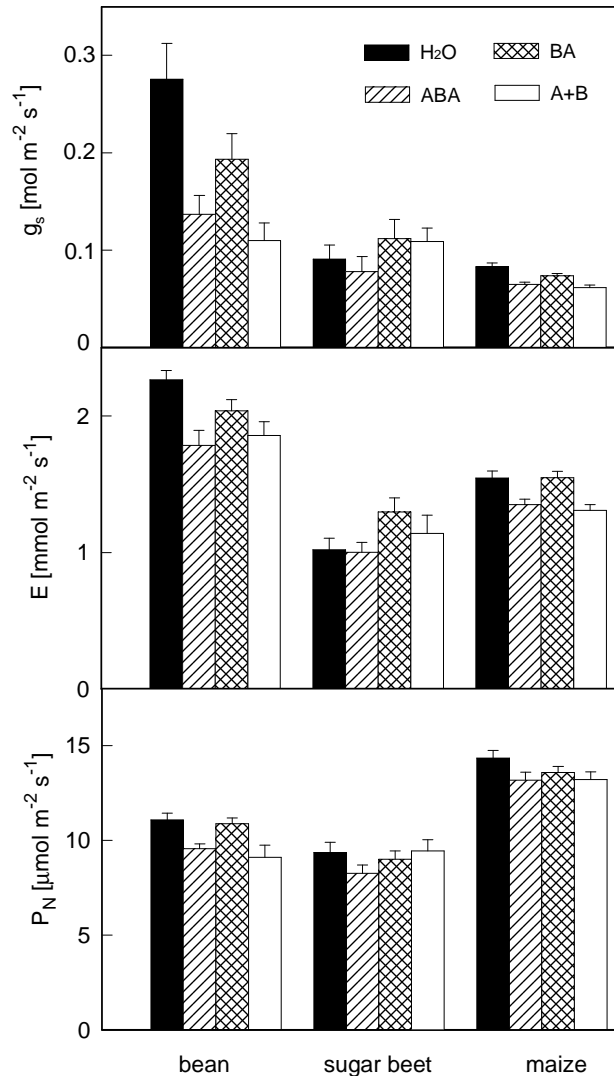
Interakce ABA a cytokininu benzyladeninu



• Fig. 1. Net photosynthetic rate (P_N), transpiration rate (E), and stomatal conductance (g_s) in primary bean leaves 1 and 24 h after spraying with H₂O (control), 100 μM ABA, 10 μM BA, or combination of 100 μM ABA + 10 μM BA (A+B). Means \pm SE, $n = 18$ (S – initial values before treatments).

- Fig. 1. Relative water content (RWC) and ABA content during development of water stress and subsequent rehydration of French bean plants pre-treated with water (H₂O), 100 μM abscisic acid (ABA) or 10 μM benzyladenine (BA). Control plants (C) were sufficiently supplied with water.

Vliv exogenní kyseliny abscisové a cytokininů na stomatální vodivost, rychlost transpirace a rychlost fotosyntézy.



Stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), and net photosynthetic rate (P_N) of attached French bean, sugar beet and maize leaves measured 1 h after application of H₂O (control), 100 μM ABA, 10 μM BA, or combination of 100 μM ABA + 10 μM BA (A+B) into the substrate. Means \pm SE, $n = 19$ (bean), 18 (sugar beet), and 35 (maize).

Vliv cytokininů a auxinů na otevřenost průduchů bobu (She and Gui 2006)

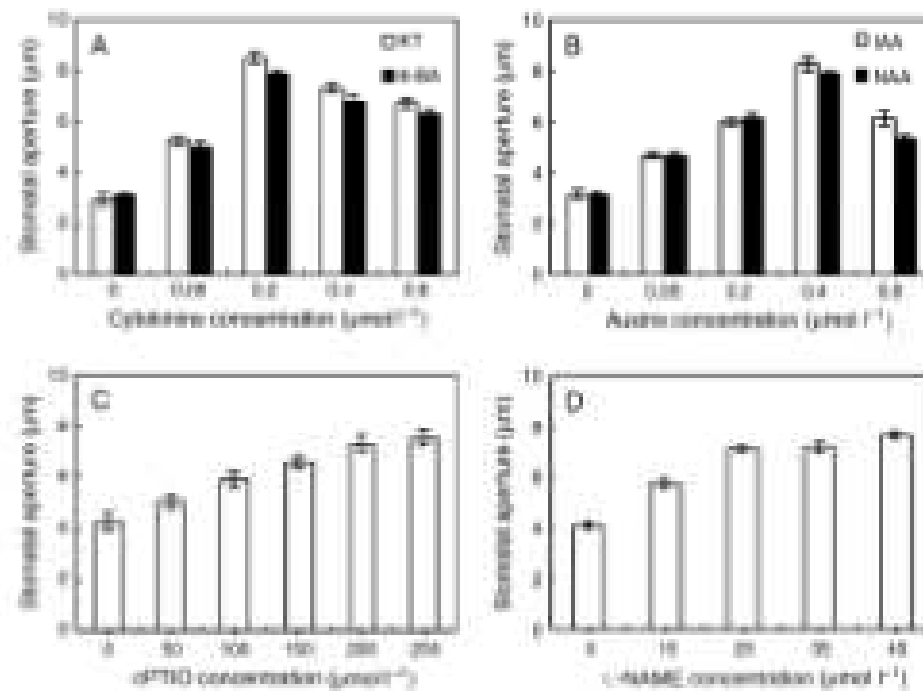


Fig. 1. Both cytokinins and auxins induce stomatal opening in *Medicago sativa*. After the peak values of stomatal aperture were measured, isolated epidermal strips of *Medicago sativa* were incubated in CO₂-free 2-(N-morpholino)ethanesulfonic acid (MES) containing different concentrations of 6-benzylaminocoumarilic acid (0, 0.08, 0.2, 0.4, 0.8 µM) (A), indole-3-acetic acid (0, 0.08, 0.2, 0.4, 0.8 µM) (B), 2-(2-oxo-3-phenyl-4,5-dihydro-1H-imidazo[5,1-b]pyridin-1-yl)propane (0, 50, 100, 150, 200, 250 µM) (C) and N¹-nitro-N²-isopropylmethanamine (0, 10, 20, 30, 40 µM) (D) for 2 h in darkness with the same temperature of 25°C. Stomatal apertures were determined. Values are the means of three measurements in three different independent experiments. Error bars are indicated. The significance of A, B, C and D with 0.05 is 0.025, 0.000, 0.000 and 0.025 and 0.000, 0.000, 0.000, respectively.

Ovlivnění g_s biotickým stresem

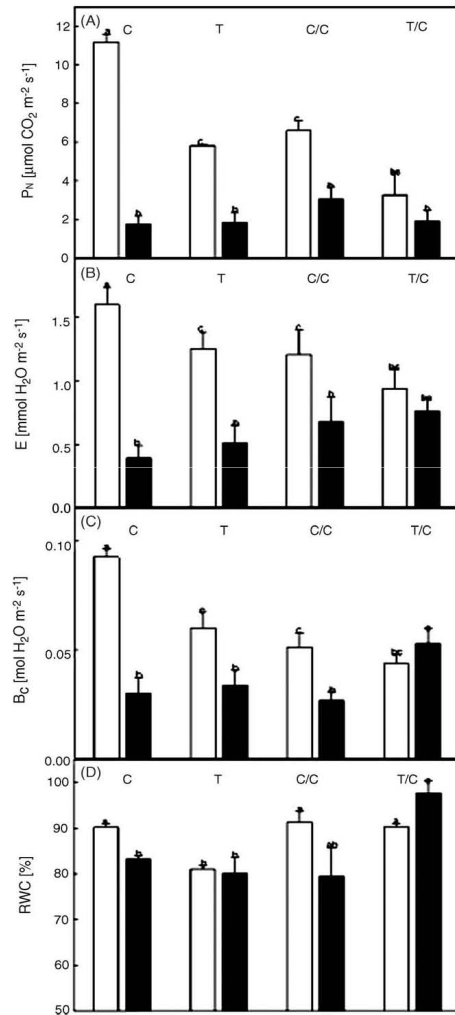


Fig. 2. Photosynthetic parameters of healthy (open columns) and PVY infected (closed columns) control, rooted tobacco (C), transgenic rooted plants (T), control grafts (C/C), and transgenic grafts (T/C). (A) Net photosynthetic rate (P_N); (B) transpiration rate (E); (C) stomatal conductances (g_s); (D) relative water content (RWC). The values are means \pm S.E. Statistically significant differences at $p = 0.05$ are marked by different letters.

Závislost vodivosti průduchů a hydraulické vodivosti v listu *Ceratonia siliqua* na jeho vodním potenciálu (Lo Gullo *et al.* 2003)

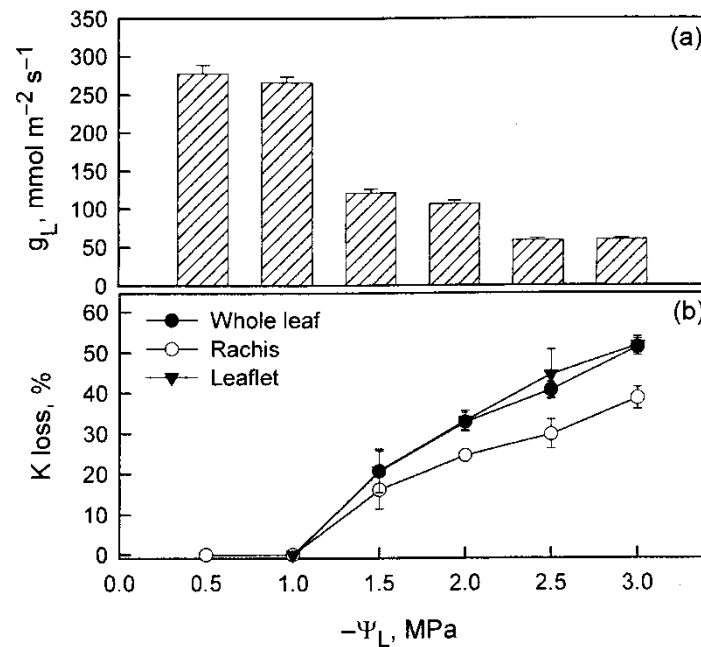


Fig. 3. (A) Leaflet conductance to water vapour (g_L) measured on transpiring plants stressed to different leaf water potentials (Ψ_L). Vertical bars are SD ($n=6$). (B) Percentage loss of hydraulic conductance (K) of whole leaves, rachides and leaflets from plants pre-stressed to decreasing leaf water potentials (Ψ_L). Vertical bars are SD ($n=6$).

Rychlost pohybu průduchů

- význam pro regulaci výměny plynů během dne a při změně faktorů prostředí
- obvykle vyšší při zavírání než při otevírání
- rozdílná u různých druhů rostlin, různě starých listů a mění se vlivem faktorů prostředí
- vysoká - výhoda zamezení vzniku vodního deficitu
- nízká - nedochází ke snížení příjmu CO_2 při kolísavé ozáření - mraky, světelné skvrny v porostu

Otevírání průduchů na světle u různě starých listů fazolu a při různém vodním stresu

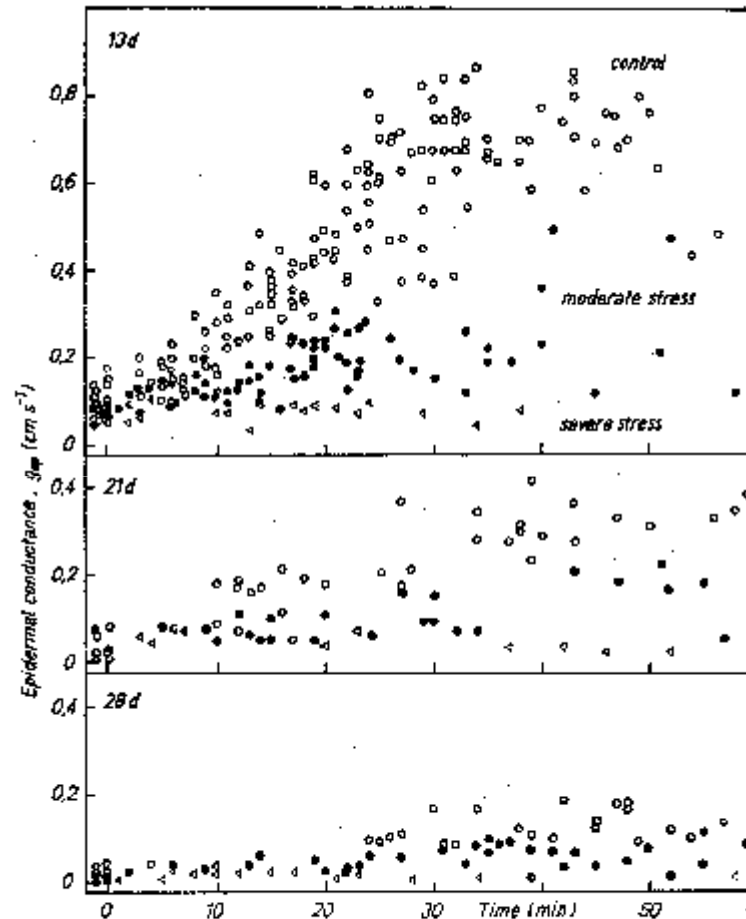
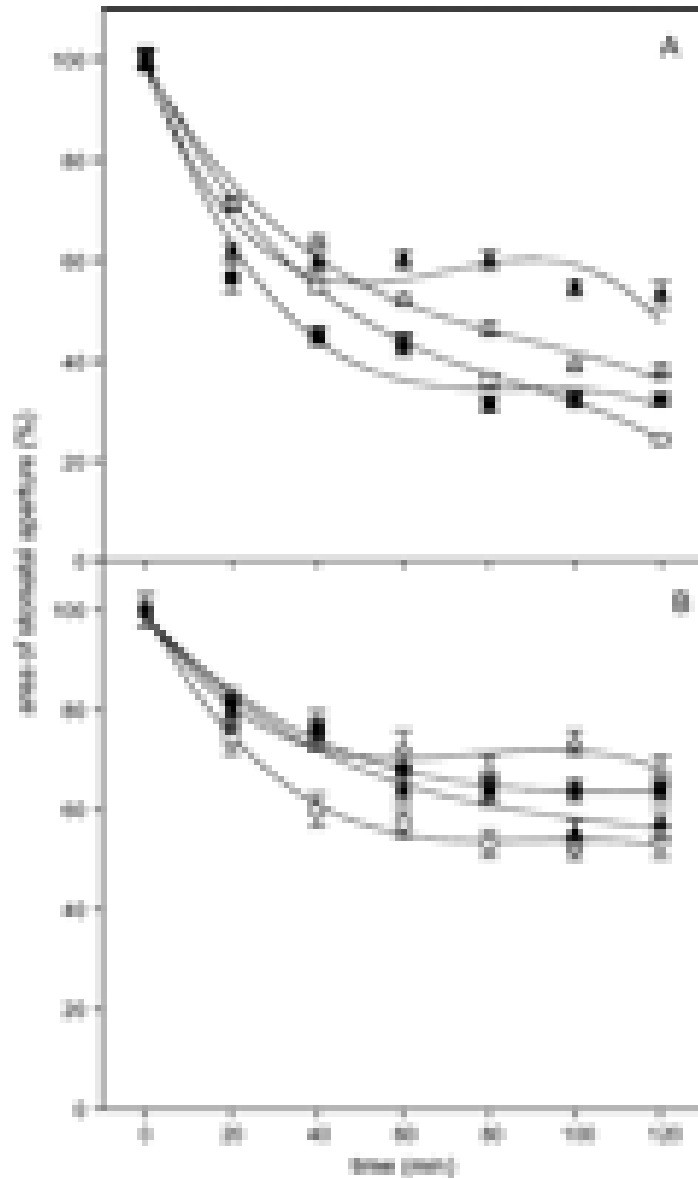


Fig. 3. The course of changes in epidermal conductance in primary leaves of *Phaseolus vulgaris* after switching on the light ($1\ 200\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$). Effect of water stress (ψ_w -0.5 to -0.7 , -0.7 to -1.0 and -1.0 to -1.3 MPa in control, moderately and severely water-stressed leaves, respectively) on seedlings 13, 21 and 28 d old.

Průběh zavírání průduchů indukované ABA



- Vliv pH na rychlost zavírání průduchů indukované ABA na izolované epidermis z *Commelina communis* (A) nebo *Arabidopsis thaliana* (B). Proužky epidermis byly inkubovány při pH 7 (prázdné body) nebo při pH 5 (plné body) na světle a při nízké koncentraci CO₂ aby dosáhly plného otevření. Potom byly přeneseny do roztoku obsahujícího buď 10 μ M (čtverce) nebo 10nM (trojúhelníky) ABA na další 2 h.
- Prokic *et al.* 2006

Důležité charakteristiky svěracích buněk

- *Svěrací buňky*
- na rozdíl od ostatních epidermálních buněk
 - nemají plasmodezmy,
 - mají chloroplasty (výjimkou je např. orchidea *Paphiopedilum*)
- na rozdíl od buněk mezofylu
 - mají nižší obsah chlorofylu
 - obvykle nižší aktivitu Rubisco
 - mají vyšší aktivitu PEPC a ATPázy
 - více mitochondrií
 - photosyntetická účinnost PS 2 70 - 80 %

Různý počet a umístění chloroplastů ve svěracích buňkách různých druhů rostlin (Lawson *et al.* 2003)

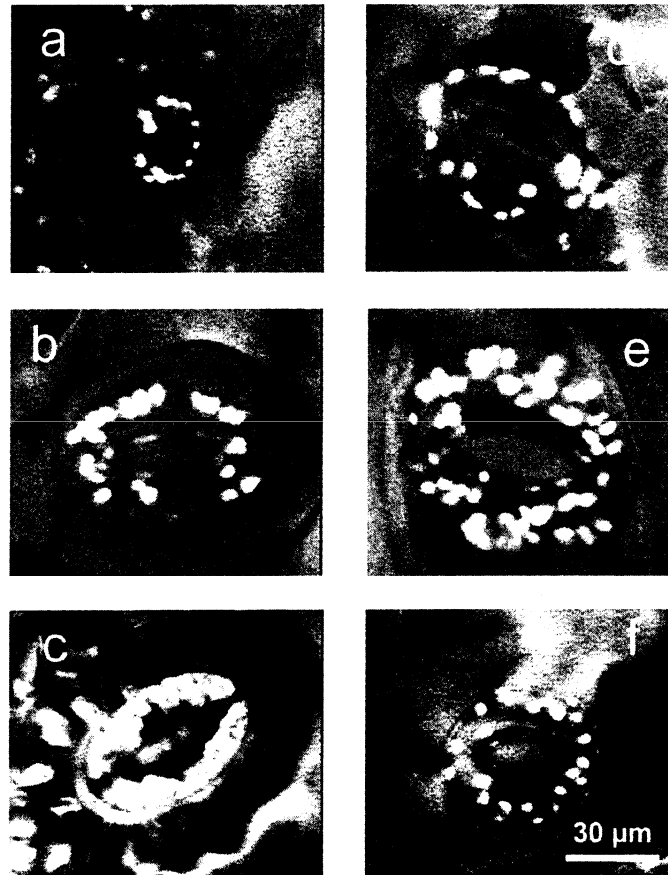
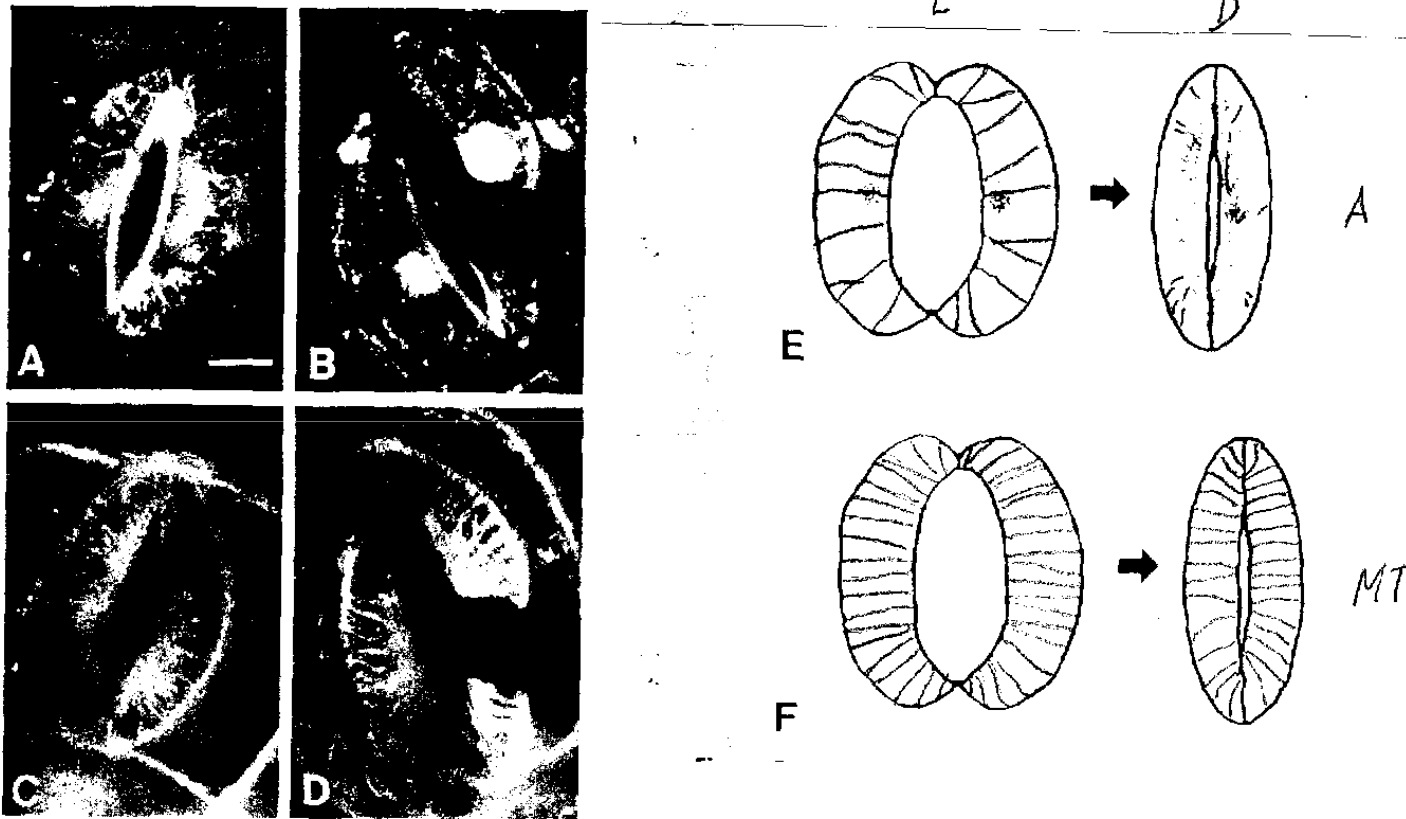


Fig. 1. Steady-state chlorophyll fluorescence images (F') obtained under the microscope from intact leaves showing abaxial stomatal-guard cells with chloroplasts of (a) *Amaranthus caudatus*; (b) *Commelina communis*; (c) *Polypodium vulgare*; (d) *Nicotiana tabacum*; (e) *Tradescantia albiflora*, and (f) *Vicia faba*.

Další vlastnosti svěracích buněk

- *Mechanické vlastnosti buněčné stěny:*
- nízký modulus elasticity umožňující relativně velké změny objemu při relativně malé změně tlakového potenciálu
- radiální uspořádání celulózních mikrofibril v matrix buněčných stěn, nerovnoměrné ztlustění buněčné stěny
- *Struktura cytoplasmy:*
- mikrotubuly - mimo jiné mohou kontrolovat orientaci nově syntetizovaných celulozních mikrofibril, možné změny v uspořádání mikrotubulů během dne nebo vlivem ABA
- aktinová vlákna - při otevření průduchů indukovaném světlem nebo vysokou vlhkostí vzduchu aktinová vlákna radiálně uspořádaná, ale ve tmě nebo vlivem ABA neuspořádané krátké fragmenty
- změny ve vakuolárním systému

Uspořádání aktinových vláken a mikrotubulů na světle a ve tmě



Organization of actin and microtubules in open and closed *Commelina communis* guard cells. (Eun and Lee 1997)

Uspořádání aktinových vláken při pohybech průduchů (Gao *et al.* 2009)

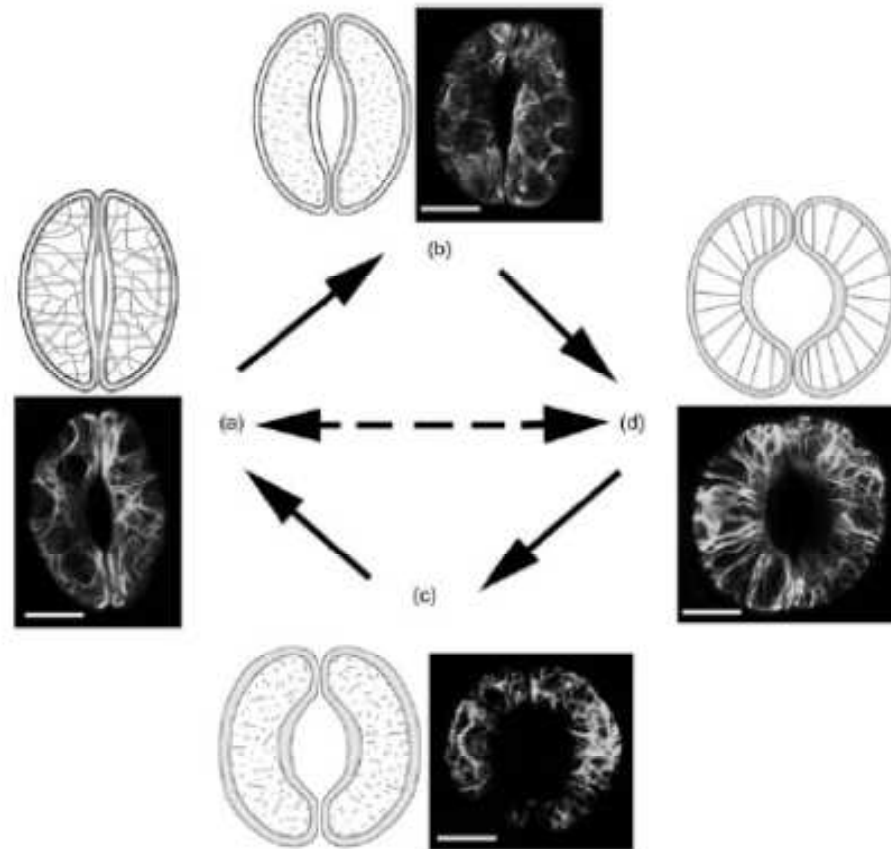
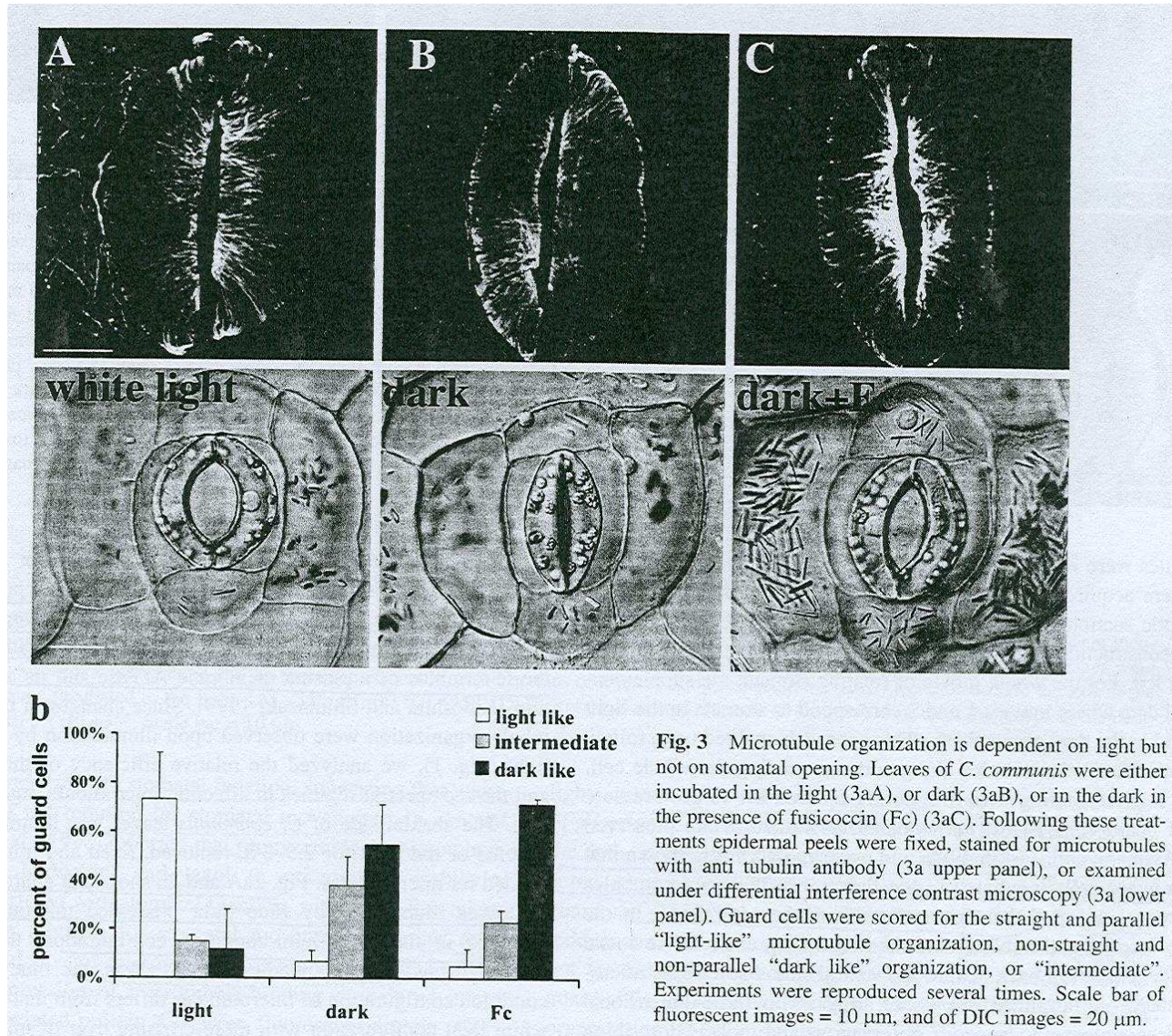


Figure 4. Dynamics of actin filaments in guard cells during stomatal movement. The actin filaments of (a) closed stomata; (b) opening stomata; (c) closing stomata; and (d) open stomata are labelled by the overexpression of *GFP-mTn* in tobacco. Bars = 10 μ m.

Uspořádání mikrotubulů na světle a ve tmě (Lahav *et al.* 2004)



Dynamika vakuolárního systému během pohybu průduchů (Gao *et al.* 2009)

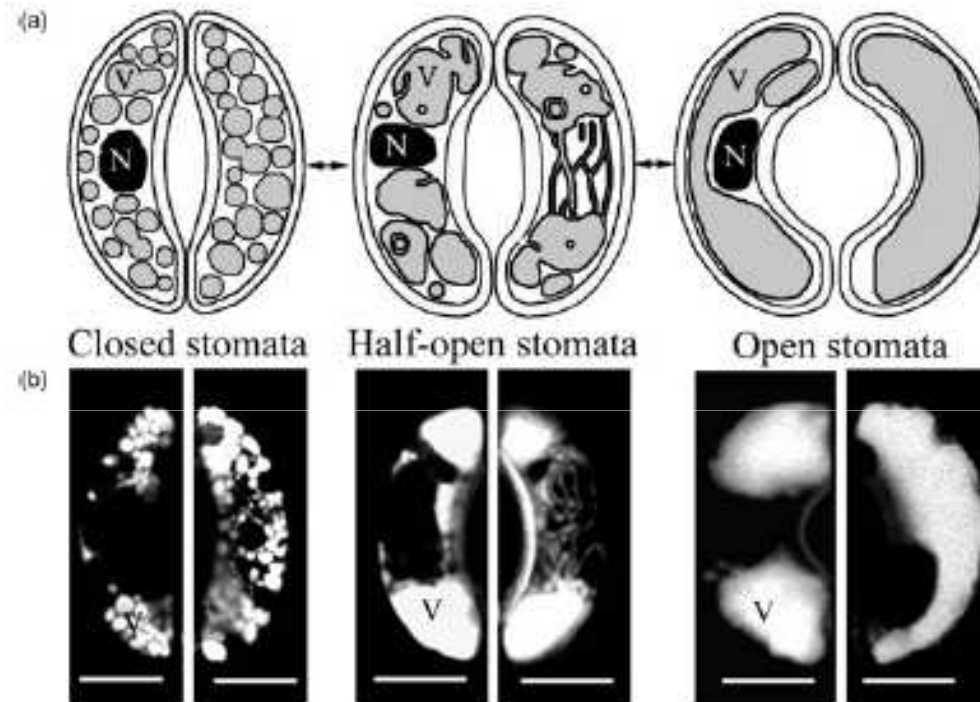


Figure 1. Vacuolar dynamics of guard cells during stomatal movement. (a) Different models of vacuolar organization at different stomatal apertures. (b) CLSM images of *Vicia faba* stomata; the vacuoles of guard cells are labelled using acridine orange. Small vacuoles in the guard cells of closed stomata become few big vacuoles of open stomata. The guard cells of half-open stomata have complicated intravacuolar structures, such as vesicle-like structures, tubular invaginations of the tonoplast and a wavy vacuolar surface. The left guard cells of each stoma show the vacuoles in a section through the centre, and the right guard cells show the vacuoles in a section near the cell walls of guard cells. N, nucleus; V, vacuole. Bars = 10 μm .