

**PŘÍRODNÍ  
VÝBĚR  
(SELEKCE)**

Darwin (1859):

nadprodukce potomstva

jedinci se liší ve schopnosti přežít/reprodukovat se

v každé generaci jedinci s vyšší schopností přežití/reprodukce zanechají více potomstva

Herbert Spencer: „*survival of fittest*“

→ tento termín není příliš šťastný

Organismy se můžou lišit v mnoha fenotypových znacích

klíčové fenotypy =

životaschopnost (viabilita)

reprodukční úspěšnost

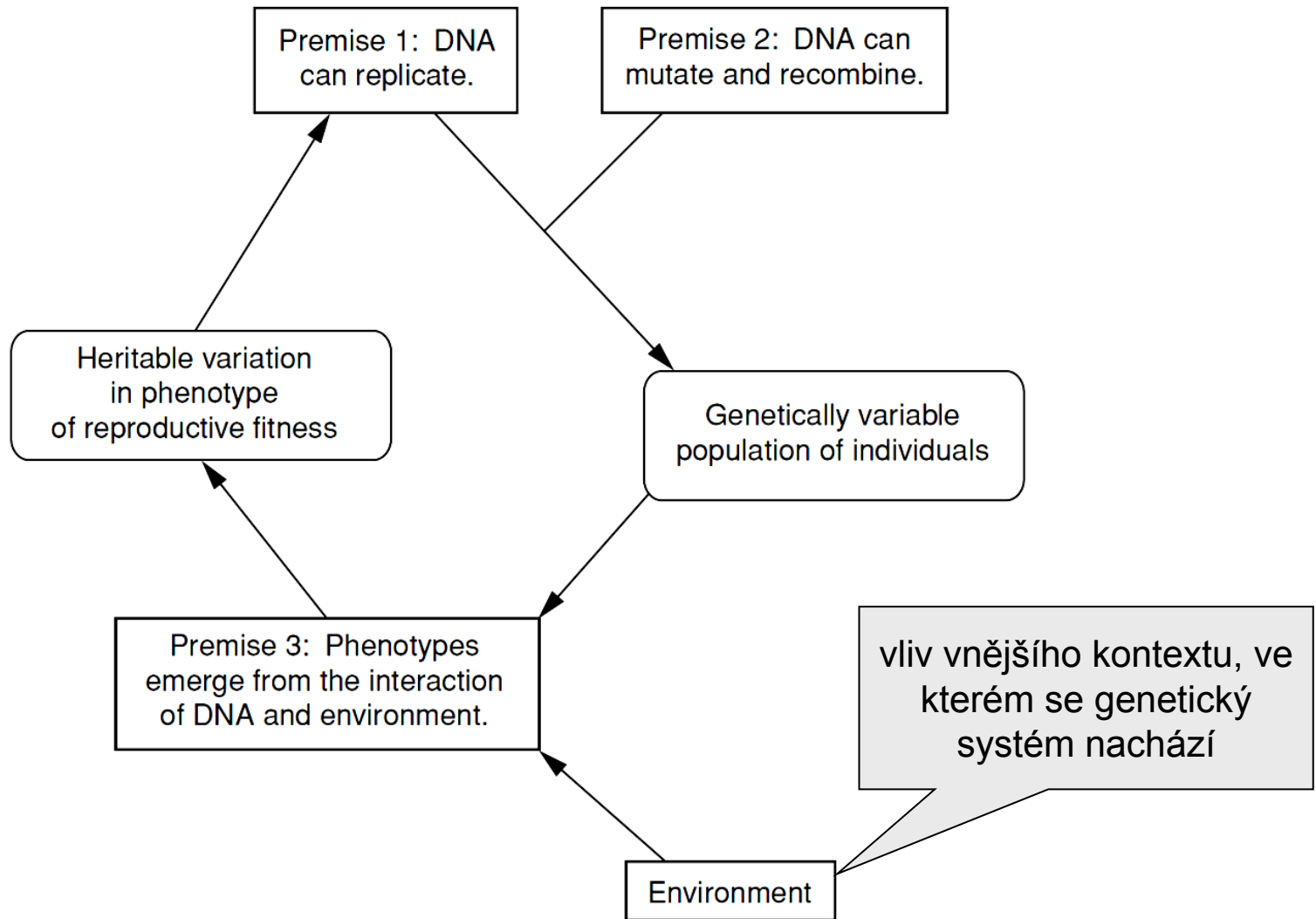
fekundita (plodivost)<sup>\*)</sup> a fertilita (plodnost)<sup>\*\*)</sup>

Tyto fenotypy tvoří komponenty **reprodukční zdatnosti** neboli **fitness**

Zvýšení fitness selekcí = **adaptace**

<sup>\*)</sup> opakem sterilita

<sup>\*\*)</sup> opakem infertilita



Přenos DNA do další generace je přímo ovlivněn interakcí s vnějším prostředím ⇒ nejde o tautologii

Absolutní fitness:

např. celkový počet potomků vyprodukovaný samicí během jejího života

nebo podíl potomků přeživších do dospělosti:

Př.: z 2000 narozených jedinců 1575 v reprodukčním věku

	<i>AA</i>	<i>Aa</i>	<i>aa</i>
při narození	500	1000	500
v dospělosti	450	900	225
absolutní fitness	$450/500$ $= 0,9$	$900/1000$ $= 0,9$	$225/500$ $= 0,45$

Relativní fitness,  $w_{ij}$ :

	<i>AA</i>	<i>Aa</i>	<i>aa</i>
relativní fitness	$w_{AA} = 0,9/0,9$ $= 1,0$	$w_{Aa} = 0,9/0,9$ $= 1,0$	$w_{aa} =$ $0,45/0,9 = 0,5$

## Model:

Diploidní organismy

Jeden lokus, dvě alely

Obligátní pohlavní rozmnožování

Diskrétní generace

Náhodné oplození

Nekonečně velká populace (žádný drift)

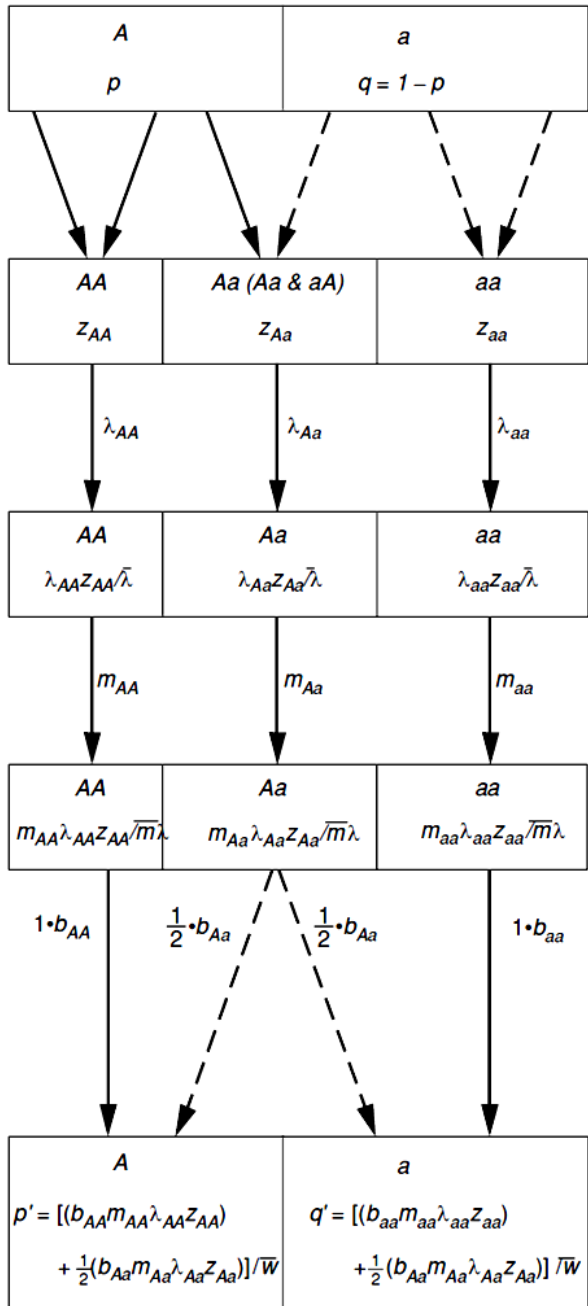
Absence populační struktury

Absence toku genů

Absence mutace

Selekce na základě odlišné viability (*viability selection*)

Hodnoty fitness konstantní v čase, prostoru a stejné mezi pohlavími



genofond (populace gamet)

system spojení gamet

populace zygot

interakce s prostředím (viabilita)

adultní populace příští generace

interakce s prostředím (reprodukční úspěšnost)

rozmnožená adultní populace příští generace

mechanismus produkce gamet

genofond příští generace

Z uvedeného schématu plyne, že fitness genotypu  $w_{ij}$  je

$$w_{ij} = b_{ij} + m_{ij} + l_{ij}$$

Diagram showing the components of fitness  $w_{ij}$  with callouts:

- $b_{ij}$  is labeled "plodnost" (fertility).
- $m_{ij}$  is labeled "reprodukční úspěšnost" (reproductive success).
- $l_{ij}$  is labeled "viabilita" (viability).

Frekvence genotypů před a po selekci:

genotypové frekvence v zygotách  $f_{AA}$ ,  $f_{Aa}$ ,  $f_{aa}$   
 $p = q = 0,5$

	AA	Aa	aa
před selekcí	$f_{AA} = p^2 = 0,25$	$f_{Aa} = 2pq = 0,50$	$f_{aa} = q^2 = 0,25$
fitness	$w_{AA} = 1,0$	$w_{Aa} = 1,0$	$w_{aa} = 0,5$

frekvence po působení selekce:  $f'_{ij} = f_{ij} \times w_{ij}$



Z uvedeného schématu plyne, že fitness genotypu  $w_{ij}$  je

$$w_{ij} = b_{ij} + m_{ij} + l_{ij}$$

plodnost (pointing to  $b_{ij}$ )
 reprodukční úspěšnost (pointing to  $m_{ij}$ )
 viabilita (pointing to  $l_{ij}$ )

Frekvence genotypů před a po selekci:

genotypové frekvence v zygotách  $f_{AA}$ ,  $f_{Aa}$ ,  $f_{aa}$

$$p = q = 0,5$$

	AA	Aa	aa
před selekcí	$f_{AA} = 0,25$	$f_{Aa} = 0,50$	$f_{aa} = 0,25$
fitness	$w_{AA} = 1,0$	$w_{Aa} = 1,0$	$w_{aa} = 0,5$
po selekci	$w_{AA}f_{AA} = 0,25 \times 1,0 = 0,250$	$w_{Aa}f_{Aa} = 0,50 \times 1,0 = 0,500$	$w_{aa}f_{aa} = 0,25 \times 0,5 = 0,125$
průměrná fitness	$0,250 + 0,500 + 0,125 = 0,875$		

## Průměrná fitness:

$$\bar{w} = \sum w_{ij}f_{ij} = w_{AA}f_{AA} + w_{Aa}f_{Aa} + w_{aa}f_{aa}$$

tj. průměrná fitness není aritmetickým průměrem fitness jednotlivých genotypů  $[(1+1+0,5)/3 = 0,833]$ , ale průměrem, kde každá relativní fitness je vážena frekvencí příslušného genotypu po selekci

protože suma frekvencí po selekci nedává 1 ( $0,250 + 0,500 + 0,125 = 0,875$ ), je nutno je normalizovat vydělením průměrnou fitness:

	AA	Aa	aa
před selekcí	$f_{AA} = 0,25$	$f_{Aa} = 0,50$	$f_{aa} = 0,25$
fitness	$w_{AA} = 1,0$	$w_{Aa} = 1,0$	$w_{aa} = 0,5$
po selekci	$w_{AA}f_{AA} =$ $0,25 \times 1,0 = 0,250$	$w_{Aa}f_{Aa} =$ $0,50 \times 1,0 = 0,500$	$w_{aa}f_{aa} =$ $0,25 \times 0,5 = 0,125$
	$f_{AA}' = w_{AA}f_{AA}/\bar{w} =$ $0,250/0,875 = 0,2857$	$f_{Aa}' = w_{Aa}f_{Aa}/\bar{w} =$ $0,500/0,875 = 0,5714$	$f_{aa}' = w_{aa}f_{aa}/\bar{w} =$ $0,125/0,875 = 0,1429$

## Obecný model přírodního výběru

před selekcí:  $p = f_{AA} + \frac{1}{2}f_{Aa}$   $\bar{w} = \sum w_{ij}f_{ij} = w_{AA}f_{AA} + w_{Aa}f_{Aa} + w_{aa}f_{aa}$

$$\bar{w} = p^2w_{AA} + 2pqw_{Aa} + q^2w_{aa}$$

po selekci:  $p' = f_{AA}' + \frac{f_{Aa}'}{2} = \frac{p^2w_{AA}}{\bar{w}} + \frac{2pqw_{Aa}}{2\bar{w}} = \frac{p^2w_{AA} + pqw_{Aa}}{\bar{w}}$

$$= \frac{p(pw_{AA} + qw_{Aa})}{\bar{w}}$$

$$q' = \frac{q(pw_{Aa} + qw_{aa})}{\bar{w}}$$

viz předchozí obr.

Změna frekvencí alel  $A$ ,  $a$ :

$$\Delta p = p' - p$$

$$\Delta p = \frac{pq[p(w_{AA} - w_{Aa}) + q(w_{Aa} - w_{aa})]}{\bar{w}}$$

$$\Delta q = \frac{pq[p(w_{Aa} - w_{AA}) + q(w_{aa} - w_{Aa})]}{\bar{w}}$$

# Selekční koeficient

$$s = 1 - w_{ij}$$

	Fitness genotypu		
	$w_{AA}$	$w_{Aa}$	$w_{aa}$
Selekce proti recesivním homozygotům	1	1	$1 - s$
Selekce proti dominantním alelám	$1 - s$	$1 - s$	1
Obecná dominance ( $0 \leq h \leq 1$ )	1	$1 - hs$	$1 - s$
Nevýhoda heterozygotů ( <i>underdominance</i> )	1	$1 - s$	1
Výhoda heterozygotů ( <i>overdominance</i> )	$1 - s$	1	$1 - t$

## Selekce proti recesivním homozygotům

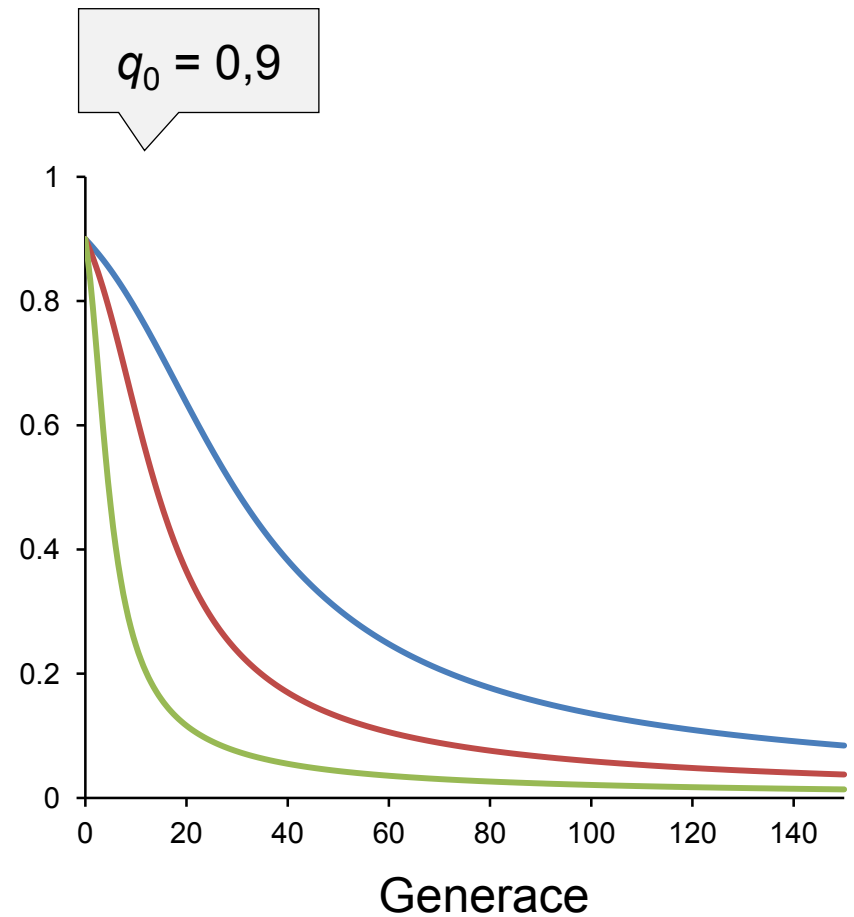
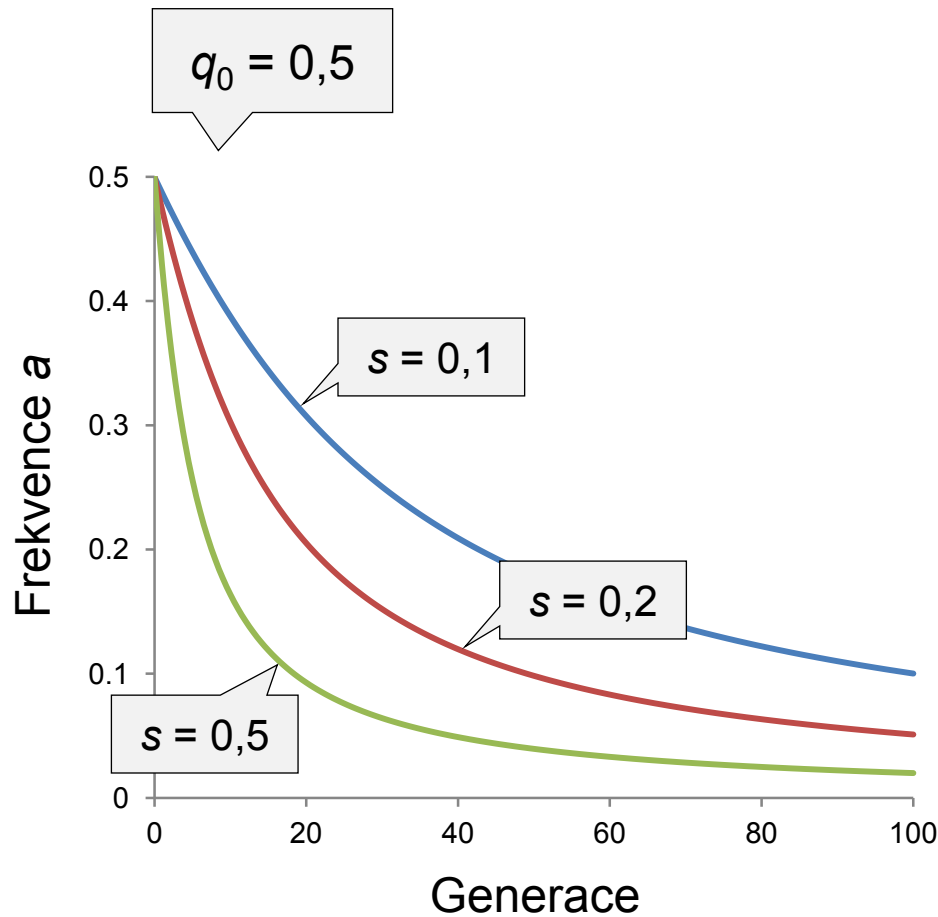
$$w_{AA} = 1 \quad w_{Aa} = 1 \quad w_{aa} = 1 - s$$

$$\bar{w} = p^2 w_{AA} + 2pq w_{Aa} + q^2 w_{aa} = p^2 \times 1 + 2pq \times 1 + q^2(1 - s) \quad \bar{w} = 1 - sq^2$$

$$q' = \frac{q(pw_{Aa} + qw_{aa})}{\bar{w}} = \frac{q[p + q(1 - s)]}{\bar{w}} = \frac{q - sq^2}{1 - sq^2}$$

$$\Delta q = \frac{pq[p(w_{Aa} - w_{AA}) + q(w_{aa} - w_{Aa})]}{\bar{w}} \quad \longrightarrow \quad \Delta q = \frac{-spq^2}{1 - sq^2}$$

rovnováha ( $\Delta q = 0$ )  
při  $q = 0$



Vlivem selekce  $q \rightarrow 0$ , ale bez jiných vlivů nuly nedosáhne.

Proč? → Pokud alela  $a$  vzácná, vyskytuje se v heterozygotním stavu!

## Selekce proti dominantním alelám

$$W_{AA} = 1 - s \quad W_{Aa} = 1 - s \quad W_{aa} = 1$$

$$\bar{w} = p^2(1 - s) + 2pq(1 - s) + q^2$$

$$\bar{w} = 1 - s + sq^2$$

$$p' = \frac{p(1 - s)}{1 - s + sq^2}$$

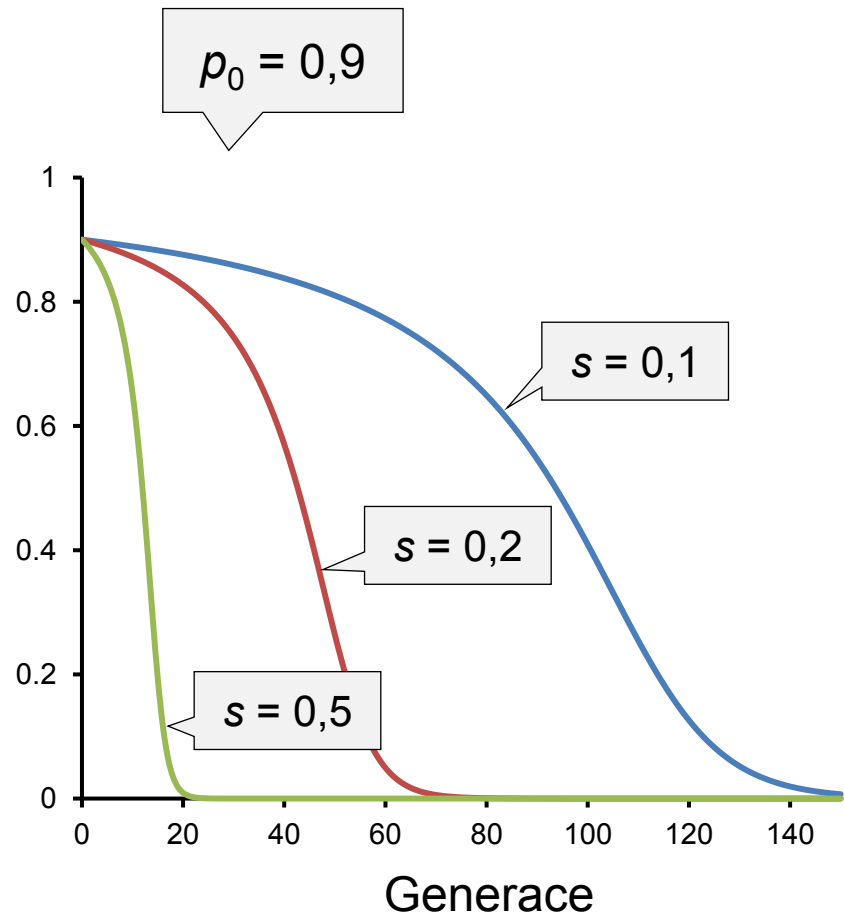
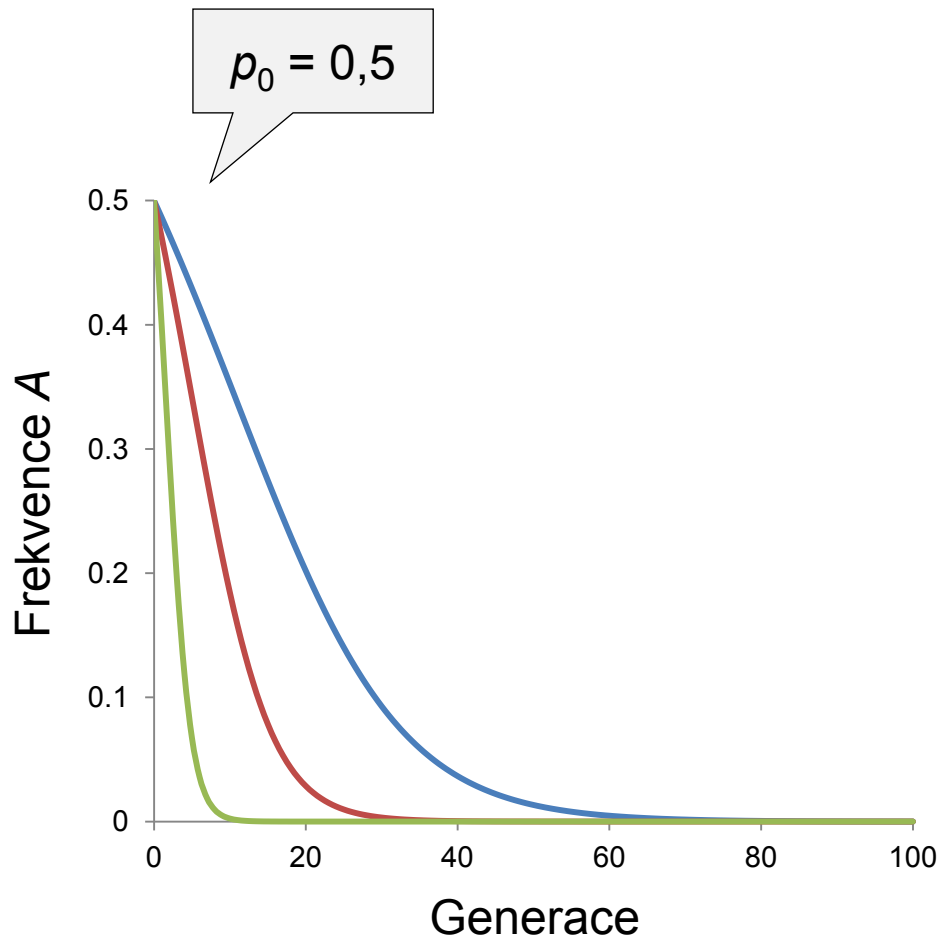
$$\Delta p = \frac{-sp^2q}{1 - s + sq^2}$$

$\Delta p$  bude vždy negativní, tj.  $p$  bude vždy klesat

Rovnováha ( $\Delta p = 0$ ) při  $p = 0$ , na rozdíl od recesivních homozygotů frekvence nulové hodnoty dosáhne

Jestliže je dominantní alela letální, bude rovnováhy dosaženo během jedné generace





## Selekce proti kodominantním alelám

$$w_{AA} = 1$$

$$w_{Aa} = 1 - s/2$$

$$w_{aa} = 1 - s$$

$$\bar{w} = 1 - sq$$

$$q' = \frac{q - sq(1 + q)/2}{1 - sq}$$

$$\Delta q = \frac{-spq/2}{1 - sq}$$

Obecný stupeň dominance:

$$\Delta q = \frac{spq[h - q(2h - 1)]}{1 - 2hspq - sq^2}$$

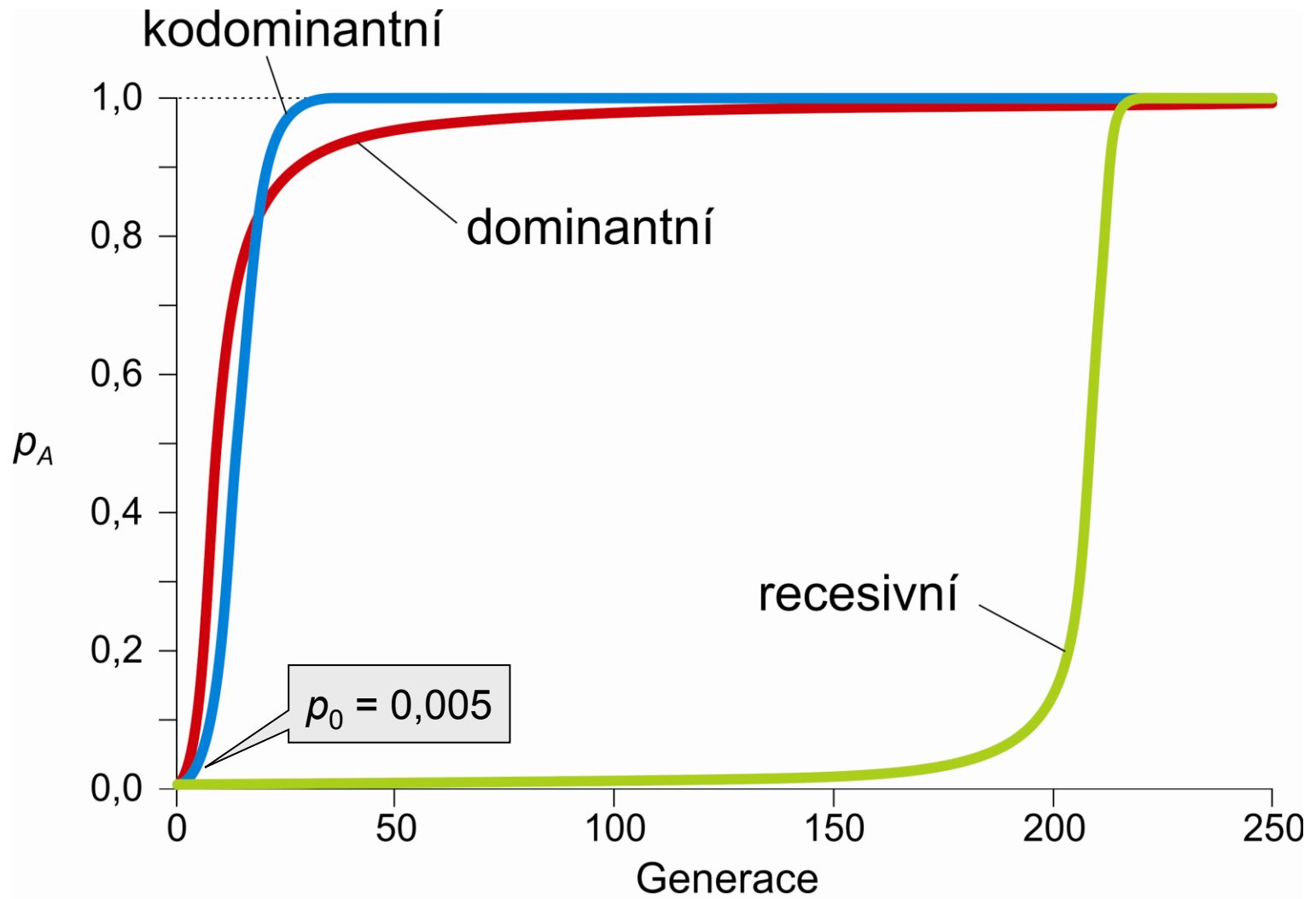
$h = 0 \rightarrow A$  dominantní

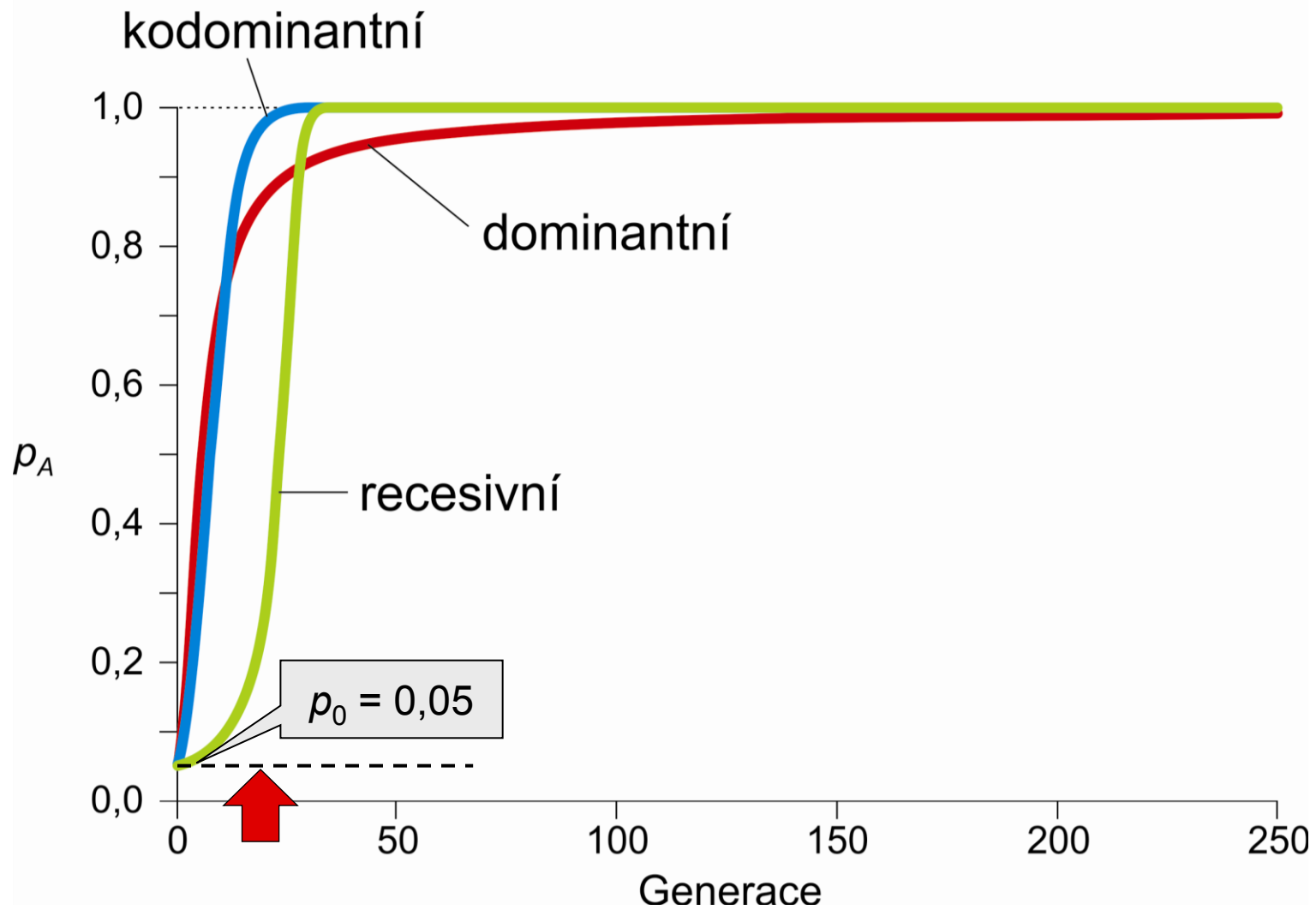
$h = 1 \rightarrow A$  recesivní

## Pozitivní selekce

$$\Delta q = - \frac{spq[h + p(1 - 2h)]}{1 + 2hspq + sq^2}$$

na rozdíl od negativní selekce počáteční frekvence většinou velmi nízké





## Selekce proti heterozygotům (*underdominance*)

$$W_{AA} = 1 \quad W_{Aa} = 1 - s \quad W_{aa} = 1$$

$$\bar{w} = 1 - 2spq = 1 - 2sq + 2sq^2$$

$$q' = \frac{q - spq}{1 - 2spq}$$

$$\Delta q = \frac{spq(q - p)}{1 - 2spq}$$

Jestliže  $q > p$ , bude frekvence alely  $a$  růst

jestliže  $q < p$ , bude klesat

## Selekce proti heterozygotům (*underdominance*)

Fitness obou homozygotů nemusí být stejná ( $w_{AA} \neq w_{aa}$ ) – v tom případě

$$w_{AA} = 1 + s \quad w_{Aa} = 1 \quad w_{aa} = 1 + t$$

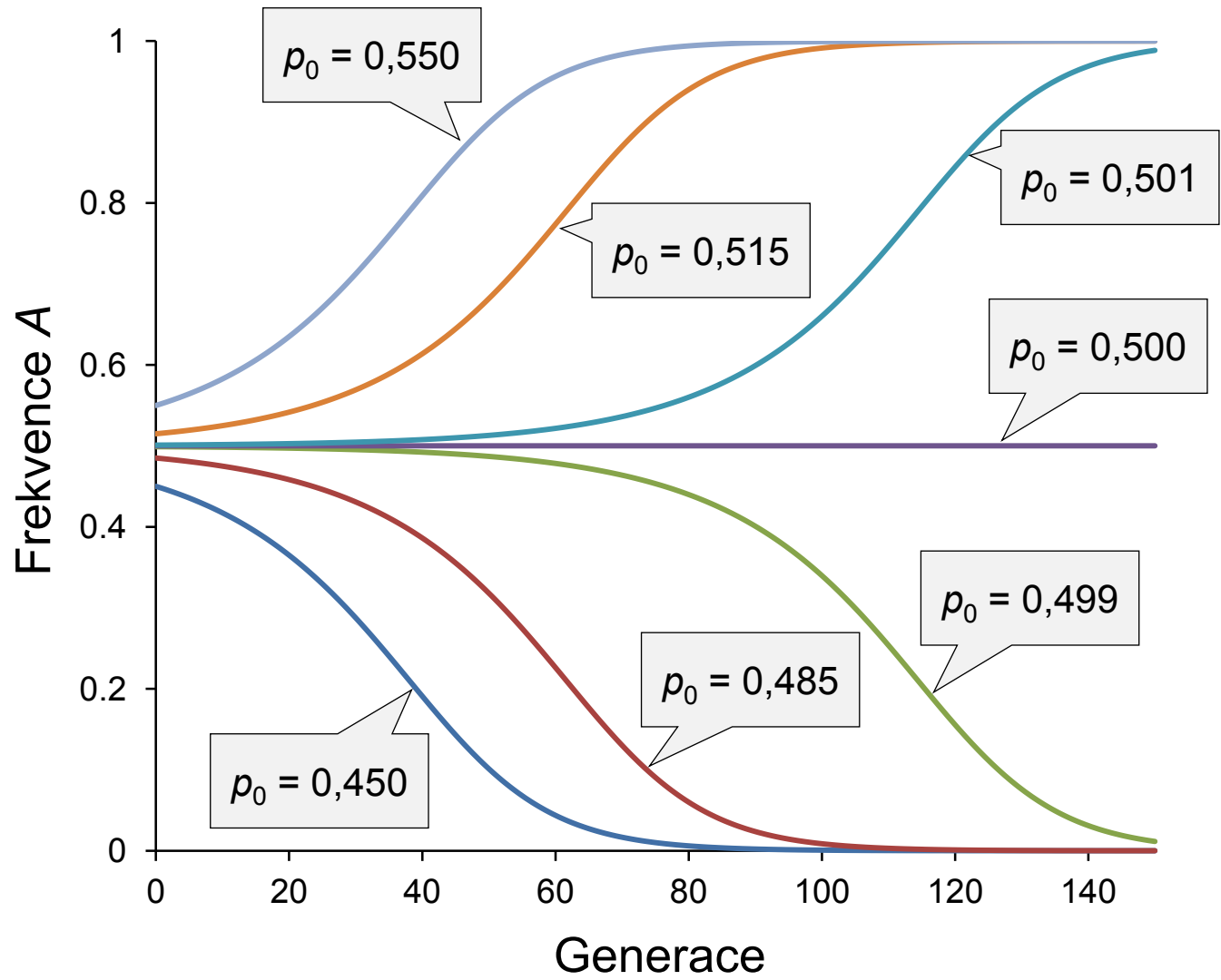
$$\bar{w} = 1 + sp^2 + tq^2$$

$$\Delta q = \frac{pq(sp - tq)}{1 + sp^2 + tq^2}$$

Jestliže  $tq > sp$ , bude frekvence alely  $a$  růst

jestliže  $tq < sp$ , bude klesat





## Selekce ve prospěch heterozygotů (overdominance)

$$w_{AA} = 1 - s \quad w_{Aa} = 1 \quad w_{aa} = 1 - t$$

$$\bar{w} = 1 - sp^2 - tq^2$$

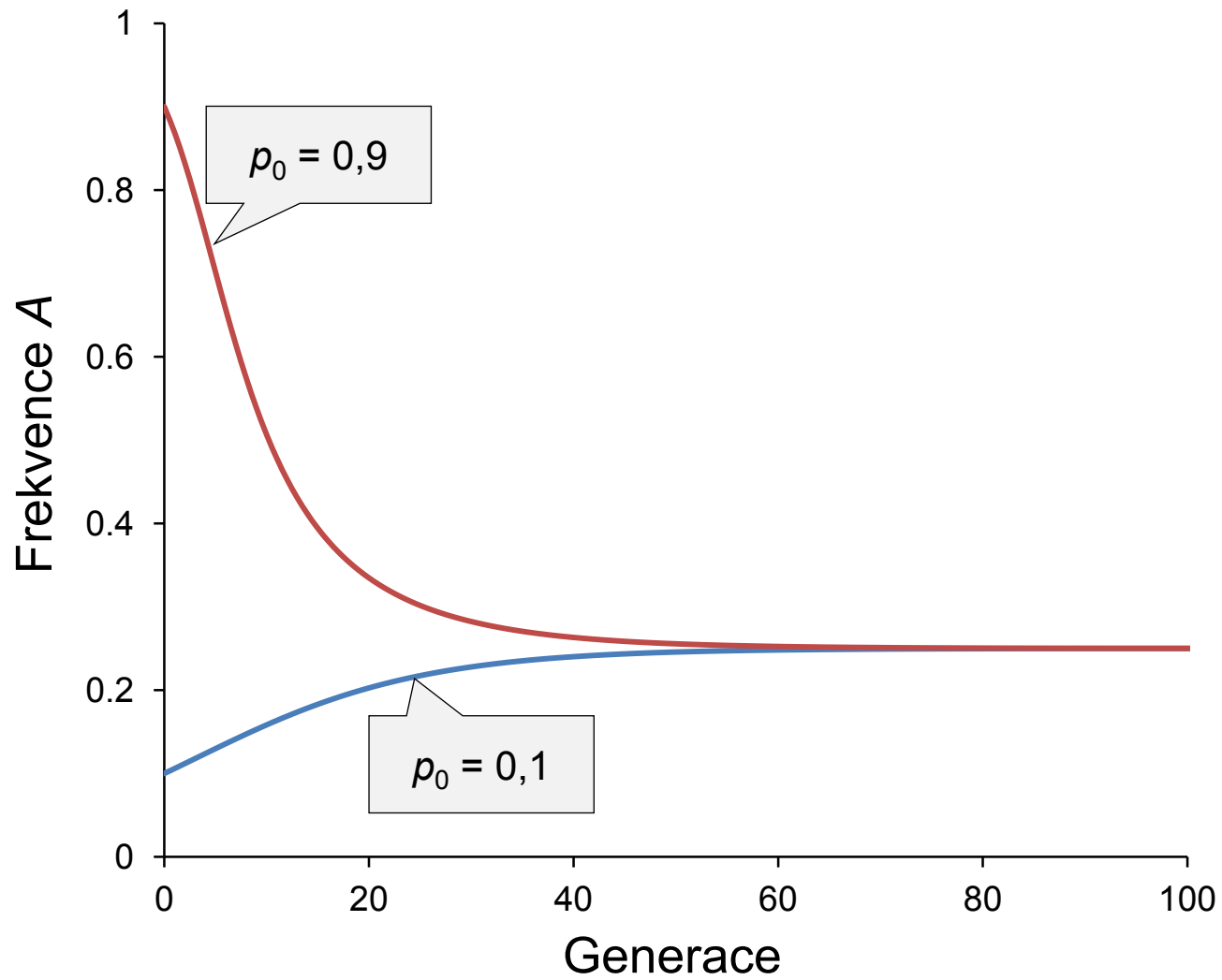
$$q' = \frac{q - tq}{1 - sp^2 - tq^2}$$

$$\Delta q = \frac{pq(sp - tq)}{1 - sp^2 - tq^2}$$

Rovnovážná frekvence:

$$\hat{p} = \frac{t}{s + t}$$

$$\hat{q} = \frac{s}{s + t}$$



# Základní rovnice a základní teorém přírodního výběru

bez selekce:  $p' = p = f_{AA} + \frac{1}{2}f_{Aa}$

se selekcí:  $p' = \frac{w_{AA}f_{AA} + \frac{1}{2}w_{Aa}f_{Aa}}{w_{AA}f_{AA} + w_{Aa}f_{Aa} + w_{aa}f_{aa}}$



kde  $w_{AA}f_{AA} + w_{Aa}f_{Aa} + w_{aa}f_{aa} = \bar{w}$

$$p' = \frac{w_{AA}f_{AA} + \frac{1}{2}w_{Aa}f_{Aa}}{\bar{w}}$$

Změna frekvence alely A:

$$\Delta p = p' - p = \frac{w_{AA}f_{AA} + \frac{1}{2}w_{Aa}f_{Aa}}{\bar{w}} - \left( f_{AA} + \frac{1}{2}f_{Aa} \right) =$$

$$= \frac{w_{AA}f_{AA} + \frac{1}{2}w_{Aa}f_{Aa} - \bar{w}f_{AA} - \frac{1}{2}\bar{w}f_{Aa}}{\bar{w}} = \frac{f_{AA}(w_{AA} - \bar{w}) + \frac{1}{2}f_{Aa}(w_{Aa} - \bar{w})}{\bar{w}}$$

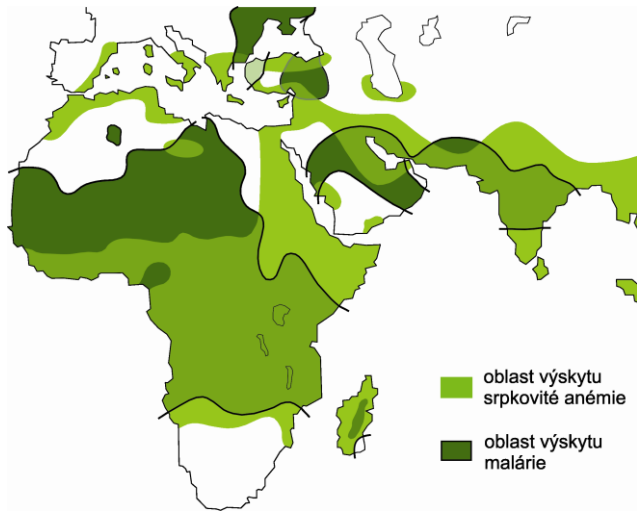
$$\Delta p = \frac{p}{\bar{w}} \left[ \frac{f_{AA}(w_{AA} - \bar{w}) + \frac{1}{2}f_{Aa}(w_{Aa} - \bar{w})}{p} \right]$$

= průměrný nadbytek fenotypu fitness pro gamety nesoucí alelu A

$$\Delta p = \frac{p}{\bar{w}} a_A$$

= Základní rovnice přírodního výběru při známém genotypu

# Srpkovitá anémie jako příklad superdominance



**Table 11.1. Phenotypic Attributes and Relative Fitnesses (Viabilities) of Six Genotypes Formed by A, S, and C Alleles at  $\beta$ -Hb Locus in Humans in Wet, Tropical Africa**

Genotype	Phenotypic Attributes	Fitness in Nonmalarial Environment	Fitness in Malarial Environment
AA	Malarial susceptibility	1.00	0.89
SS	Hemolytic anemia	0.20	0.20
CC	Malarial resistance	1.00	1.31

*Note:* The fitness of the AS heterozygote is set to 1. The malarial fitnesses are estimated from data given in Cavalli-Sforza and Bodmer (1971).

$$\Delta p = \frac{p}{\bar{w}} a_A$$

rozhodující je průměrný nadbytek fitness gamet nesoucí alelu A, ne přežití nejzdatnějšího jedince

dominance:

$S \rightarrow A$  kodominantní, z hlediska anémie recesivní, z hlediska rezistence dominantní

$S \rightarrow C$  dominantní

Z pohledu gamety je důležité, v jakém genotypu se pravděpodobně objeví.

Průměrný nadbytek lze vyjádřit jako

$$a_i = \sum_j p_j (w_{ij} - \bar{w})$$

Protože alela C se vyskytuje ve 3 genotypech – AC, SC a CC, bude nadbytek pro alelu C roven součtu

$$a_C = p_A (w_{AC} - \bar{w}) + p_S (w_{SC} - \bar{w}) + p_C (w_{CC} - \bar{w})$$

Počáteční podmínky:  $p_A \approx 1$ ;  $p_S \approx 0$ ;  $p_C \approx 0$

$$a_C = p_A(0,89 - \bar{w}) + p_S(0,70 - \bar{w}) + p_C(1,31 - \bar{w})$$

protože zpočátku takřka výhradně genotypy AA, je průměrná fitness  $\approx 0,89$

**Table 11.1. Phenotypic Attributes and Relative Fitnesses (Viabilities) of Six Genotypes Formed by A, S, and C Alleles at  $\beta$ -Hb Locus in Humans in Wet, Tropical Africa**

Genotype	Phenotypic Attributes	Fitness in Nonmalarial Environment	Fitness in Malarial Environment
AA	Malarial susceptibility	1.00	0.89
AS	Malarial resistance	1.00	1.00
SS	Hemolytic anemia	0.20	0.20
AC	Malarial susceptibility	1.00	0.89
SC	Hemolytic anemia	0.71	0.70
CC	Malarial resistance	1.00	1.31

*Note:* The fitness of the AS heterozygote is set to 1. The malarial fitnesses are estimated from data given in Cavalli-Sforza and Bodmer (1971).



$$a_C \approx 1(0,89 - 0,89) + 0(0,70 - 0,89) + 0(1,31 - 0,89) = 0$$

tj. přestože genotyp CC má nejpozitivnější důsledky, z pohledu gamety je dopad nulový

důvodem je to, že při nízké frekvenci se bude alela C vyskytovat prakticky jen jako heterozygot AC se stejnou fitness jako homozygot AA

$$\begin{aligned} \text{Gameta S: } a_S &= p_A(1 - \bar{w}) + p_C(0,70 - \bar{w}) + p_S(0,20 - \bar{w}) \\ &\approx 1(1,00 - 0,89) + 0(0,70 - 0,89) + 0(0,20 - 0,89) = 0,11 \end{aligned}$$

Jak jde čas, z hlediska alely C stále častěji výskyt škodlivých genotypů SC

např.  $p_A = 0,95$ ;  $p_S = 0,05$ ;  $p_C \approx 0$ , prům. fitness = 0,90

$$\rightarrow a_C \approx -0,02; a_S \approx 0,06$$

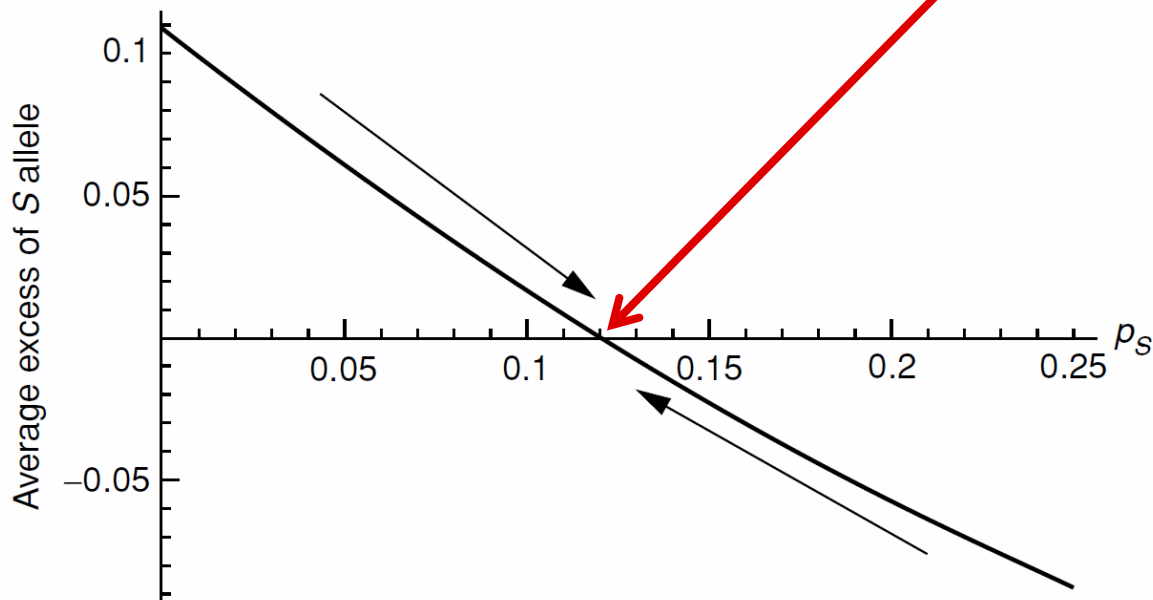
⇒ **frekvence alely S stále roste a selekce eliminuje alelu C, přestože je nejvýhodnější**

Po eliminaci alely C → „modelová“ situace se 2 alelami A a S:

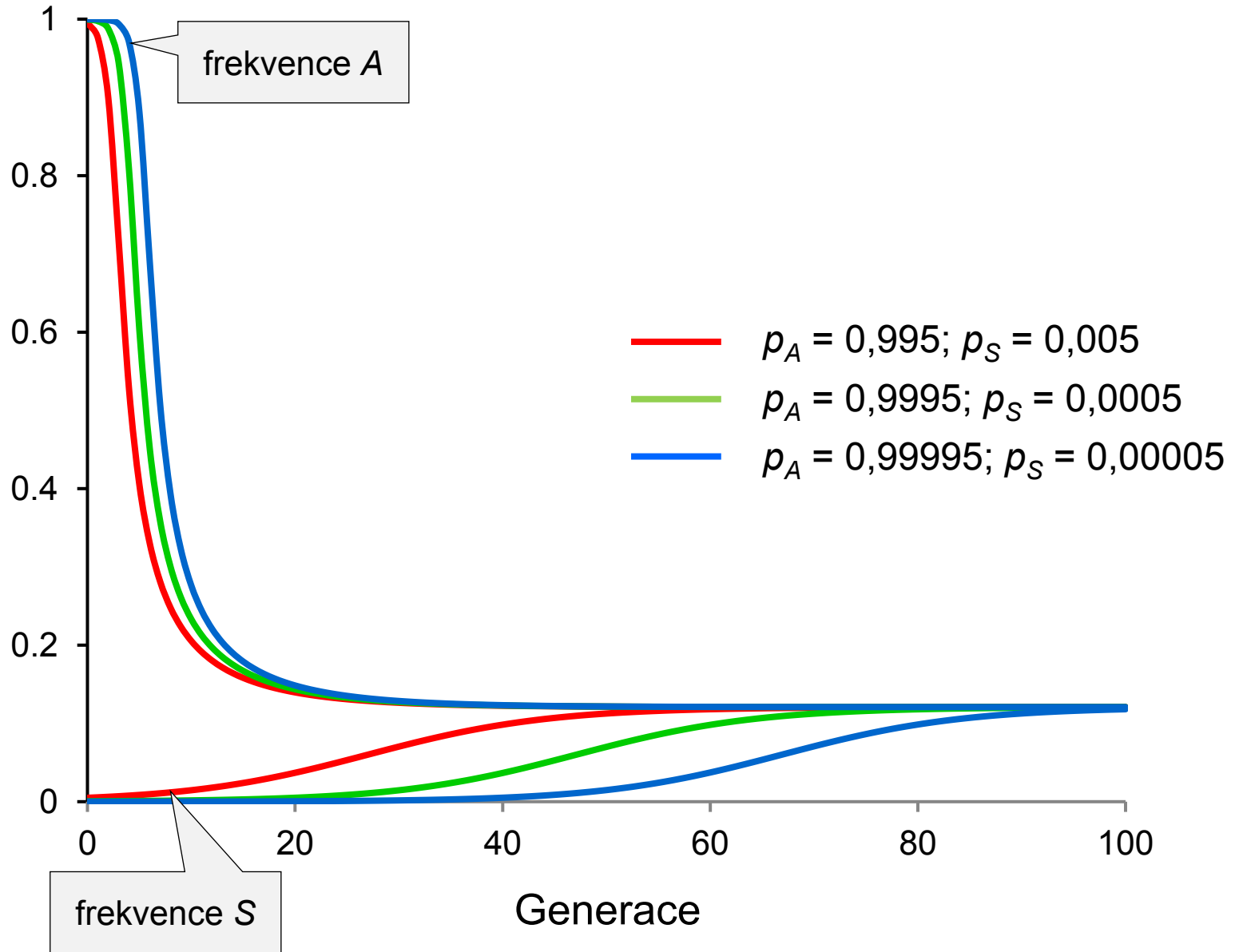
$$a_S = p_A(1 - \bar{w}) + (0,2 - \bar{w})$$

výhodné při  
nízkých  
frekvencích S

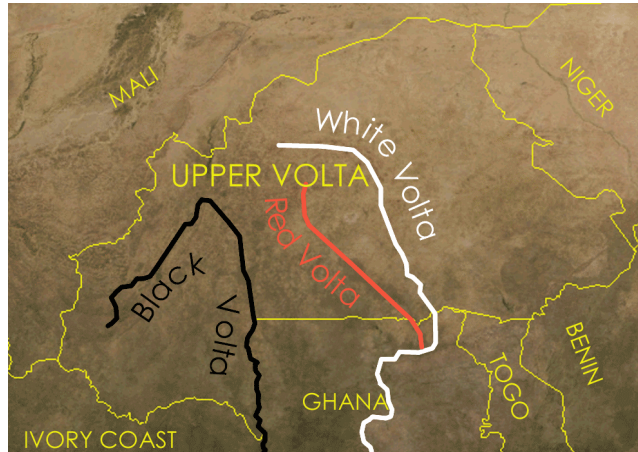
⇒ selekce bude zvyšovat frekvenci S do  $p_S = 0,12$ , potom naopak:



**Výsledkem je rovnovážný polymorfismus alel A a S**



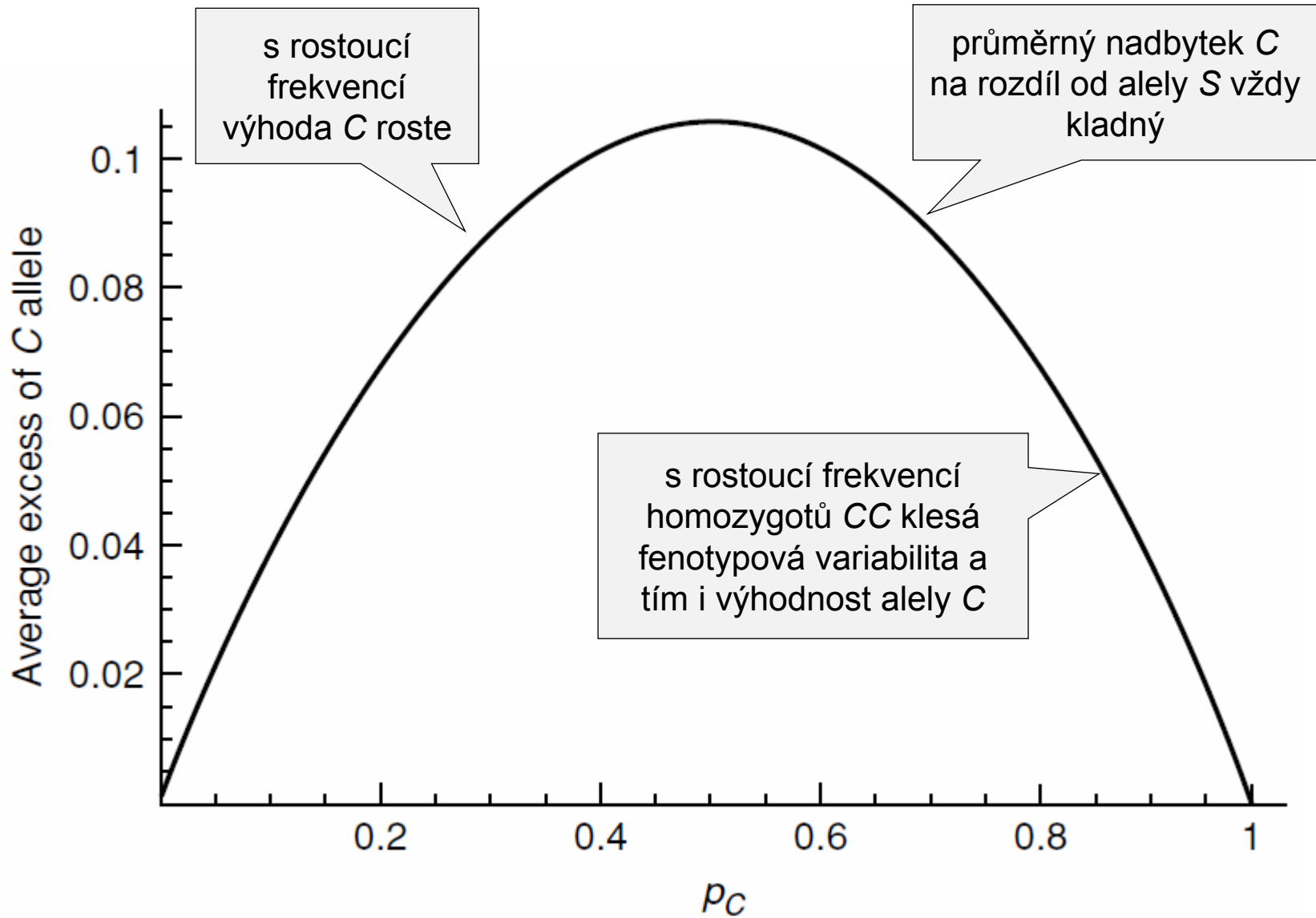
## Burkina Faso (Horní Volta): absence alely S

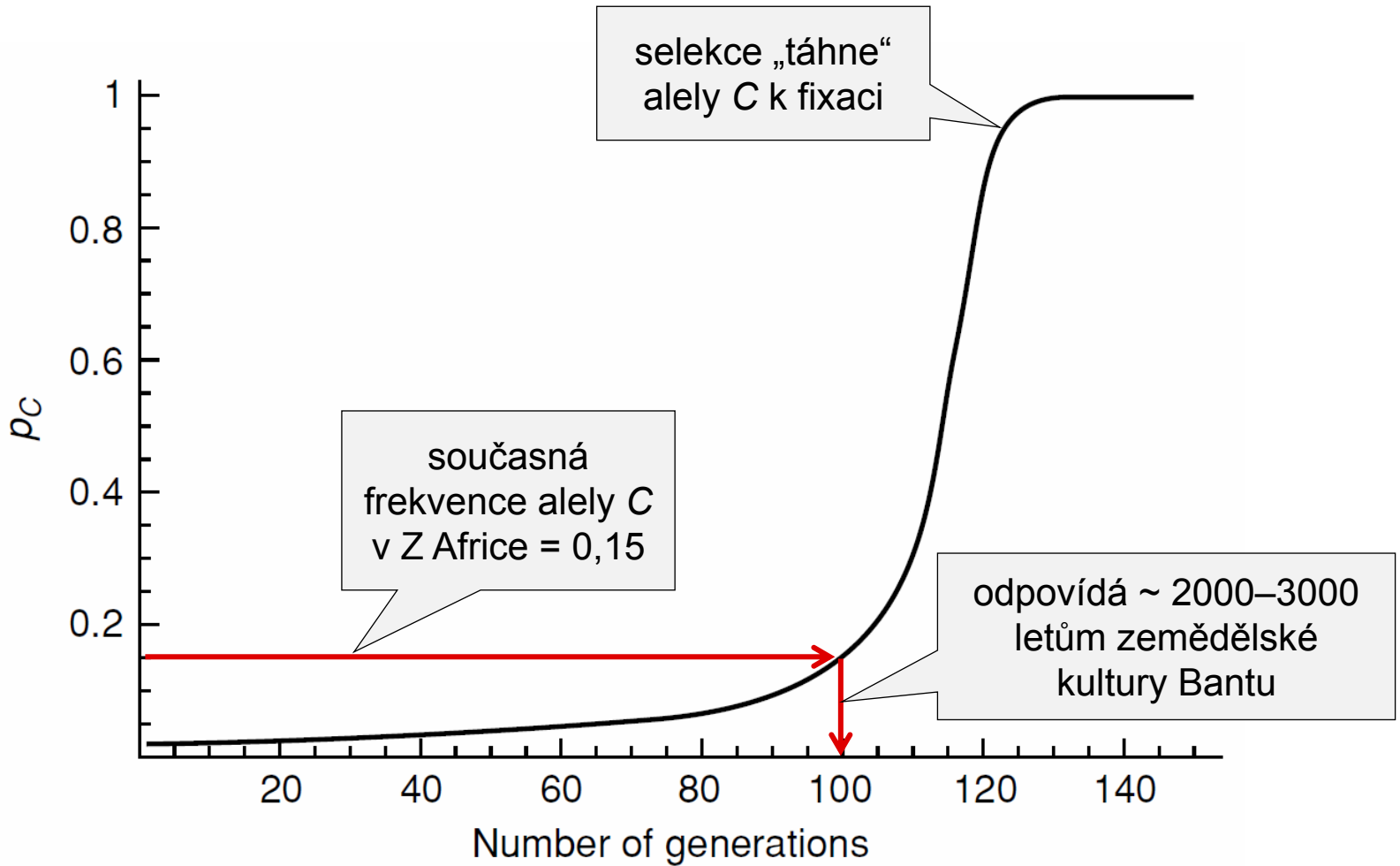


alela C zpočátku především jako heterozygot AC

např.  $p_A = 0,999$  a  $p_C = 0,001 \Rightarrow a_A = -0,0000004$ ,  $a_C = 0,00042$

jak frekvence alely C roste, častější výskyt jako CC ( $w_{CC} = 1,31$ )





V Africe min. 2 systémy rezistence vůči malárii: polymorfismus  $A/S$  a alela  $C$

1. systém  $A/S$ :  $p_S = 0,12$ ;  $p_A = 0,88$

průměrná fitness populace zvýšena z poč.  $0,89$  ( $w_{AA}$ ) na  $0,90$

v každé generaci  $p_A^2 = 0,88^2 = 77$  % populace trpí malárií a

$p_S^2 = 0,12^2 = 2$  % populace trpí srpkovitou anémií

pouze  $21$  % populace je rezistentní vůči malárii a netrpí anémií

2. systém alely  $C$ :

po fixaci  $C$  fitness zvýšena z  $0,89$  na  $1,31$

rezistence vůči malárii, přičemž nikdo netrpí anémií

selekce našla dvě odlišná řešení téhož problému

selekce podporuje nejzdatnější gamety, ne nejzdatnější jedince nebo nejzdatnější populace

# Migrace ze Z Afriky na východ?

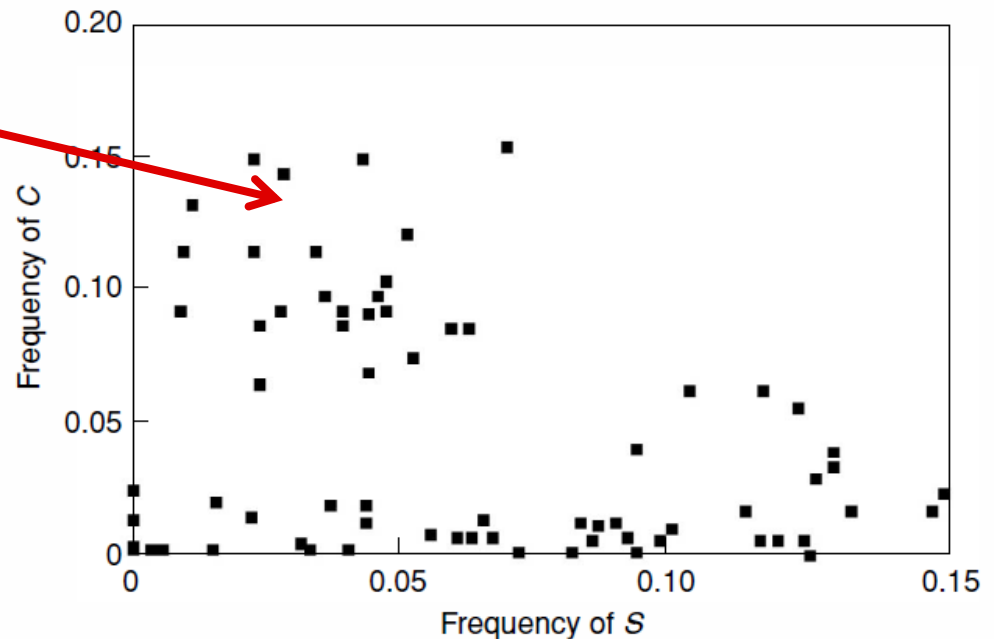
na východě  $p_A = 0,88$  s  $w_{AC} = 0,89$ ;  $p_S = 0,12$ ,  $w_{SC} = 0,70$

tzn.  $a_C \approx 0,88(0,89 - 0,90) + 0,12(0,70 - 0,90) = -0,03$

naopak alela S v Z Africe:  $a_S \approx -0,61$

⇒ v obou případech eliminace migrantní alely

⇒ v Z Africe negativní korelace mezi S a C





# Rezistence vůči malárii: adaptace jako polygenní proces

mutace v  $\beta$ -řetězci hemoglobinu: S, C

glukózo-6-fosfát dehydrogenáza (G6PD):

chr. X, důležitá pro zvládnutí oxidativního stresu buňkou

> 300 mutací → deficiencie enzymu

postiženo ~ 400 mil. lidí, zejména v malarických oblastech

frekvence od 0,001 (Japonsko, S Evropa) po 0,61 (Kurdští Židé)

studie in vitro: zhoršený růst *P. falciparum* v G6PD deficientních erytrocytech

× hemolytická anémie, favismus

# Rezistence vůči malárii: adaptace jako polygenní proces

talasémie:

~ 80 mutací v  $\alpha$ -řetězci hemoglobinu →  $\alpha$ -talasémie

> 200 mutací v  $\beta$ -řetězci Hb →  $\beta$ -talasémie

důsledkem nevyvážená produkce obou řetězců, široké spektrum klinických dopadů od žádného po smrtelnou anémii

heterozygoti pro talasémii jsou rezistentní vůči *P. falciparum*

další lokusy: *ApoE*, kyselá fosfatáza 1, pyruvát kináza, MHC, *tumor-necrosis factor- $\alpha$* , *intercellular adhesion molecule 1*

alely  $\beta$ -Hb: *D* (Afghánistán, S Pákistán)  
*E* (JV Asie, Turecko, JZ Španělsko)

eliptocytóza, negativní receptor Duffyho antigenu (*P. vivax*), negativní receptor Gerbichova antigenu, mutace v genech glykoforinu A a B

atd.

## Závěr:

Adaptace je vždy omezena dostupnou variabilitou  
selekce může působit jen na existující varianty

I uniformní selekční tlaky vedou k odlišným adaptivním  
odpovědím

vliv mutace, toku genů, driftu

i když můžeme adaptaci vysvětlit působením selekce, je obtížné  
předpovídat, jak se bude populace adaptovat na změnu prostředí

Adaptace zpravidla zahrnuje mnoho lokusů s různými  
funkcemi

# Základní věta přírodního výběru při neznámém genotypu

Pokud neznáme genotypy pro lokusy ovlivňující selektovaný znak, musíme se zaměřit jen na fenotyp  $\Rightarrow$  fitness chápána jako průměrná reprodukční zdatnost dané fenotypové třídy jedinců

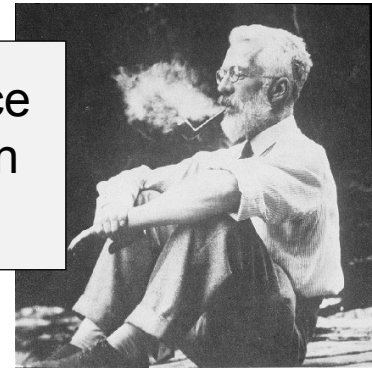
jestliže fenotypem je sama fitness, pak hodnota znaku  $x = w$   
a průměr této hodnoty  $\mu = \bar{w}$ ; selekční odpověď je pak  $R = \Delta\bar{w}$

intenzita selekce  $S = \sigma^2/\bar{w}$

$$R = h^2S \Rightarrow$$



$\Rightarrow$  vlivem selekce  
může být  $\Delta\bar{w}$  jen  
nezáporné



$\bar{w}$  stanoveno jako 1  $\Rightarrow$

**= Fisherův základní teorém přírodního výběru:**

změna průměrné fitness je rovna jejímu aditivnímu genetickému rozptylu

## Co nám obě věty o selekci říkají?

1. Selektce může působit jen pokud v populaci existuje genetická variabilita spojená s fitness.

2. Jediné odpovědi na selekci z hlediska fitness jsou ty, které jsou přenášeny gametami.

Obě základní selekční rovnice ukazují, že odpověď na selekci závisí na tom, jak je individuální variabilita fitness předávána gametou do další generace. Selektci můžeme porozumět pouze z perspektivy gamet.

3. Adaptivní výsledek představuje interakci variability fitness se strukturou populace.

Ani úplná znalost fitness každého jedince v populaci nestačí k tomu, abychom určili odpověď na selekční tlak; záleží na způsobu kombinování gamet (tj. na populační struktuře).

## Co nám oba teorémy o selekci říkají?

4. Seleční rovnováhy pouze pokud všechny gamety mají stejný dopad na fitness.

Např. genotypy  $AS$  v malarickém prostředí budou produkovat část potomstva s nižší než průměrnou fitness ( $AA$ ,  $SS$ ) a část s vyšší než průměrnou fitness ( $AS$ ), ale jednotlivé účinky se vyrovnávají.

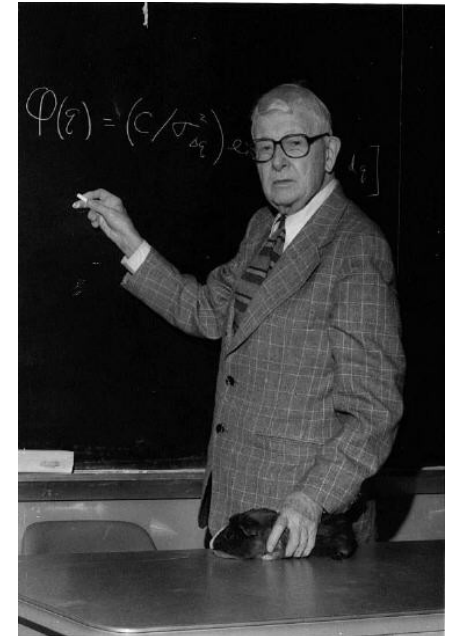
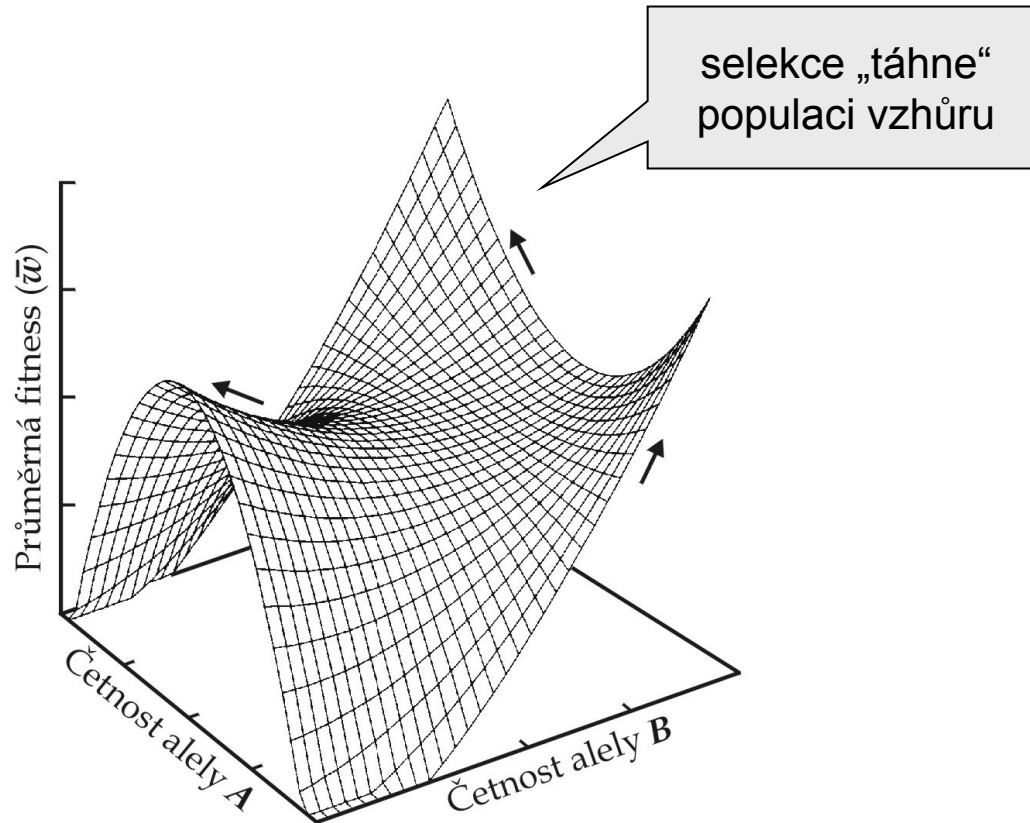
Nízká heritabilita  $\rightarrow$  málo genetické variability nebo znak je spojen s fitness v populaci, která je v rovnováze nebo blízko ní;

vysoká heritabilita  $\rightarrow$  znak není spojen s fitness nebo populace není v rovnováze. Evoluce se zastaví při nulové heritabilitě.

5. Selektce v každé generaci zvyšuje průměrnou fitness populace.

$\sigma_a^2 \geq 0 \Rightarrow \Delta \bar{w} \geq 0$  a proto i změny ve frekvencích alel vždy jen takové, které nesnižují průměrnou fitness

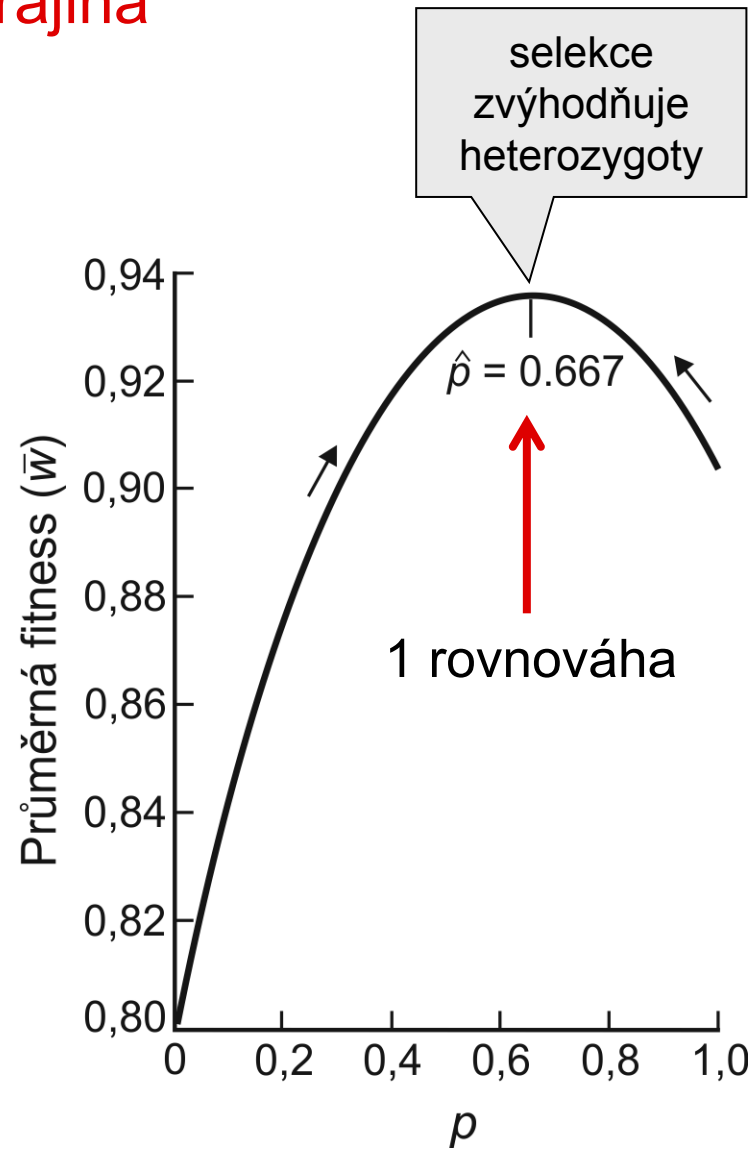
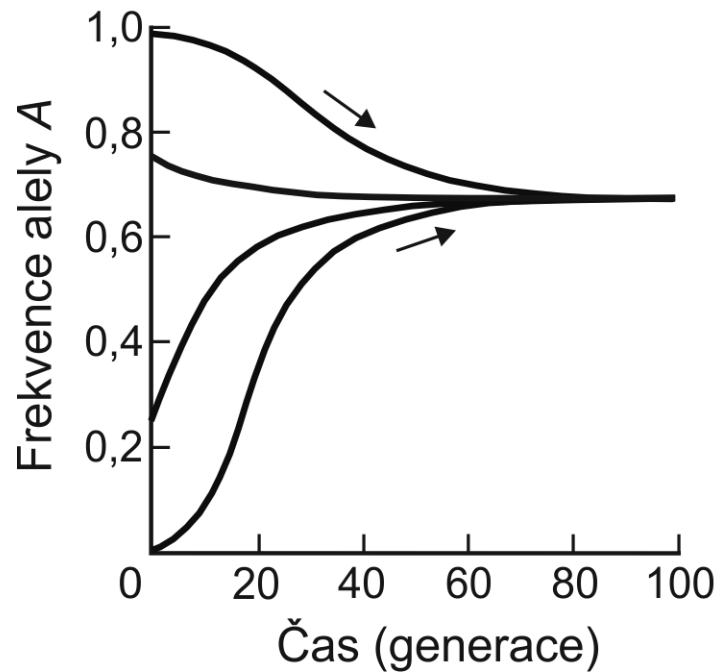
# Adaptivní krajina



S. Wright

# Adaptivní krajina

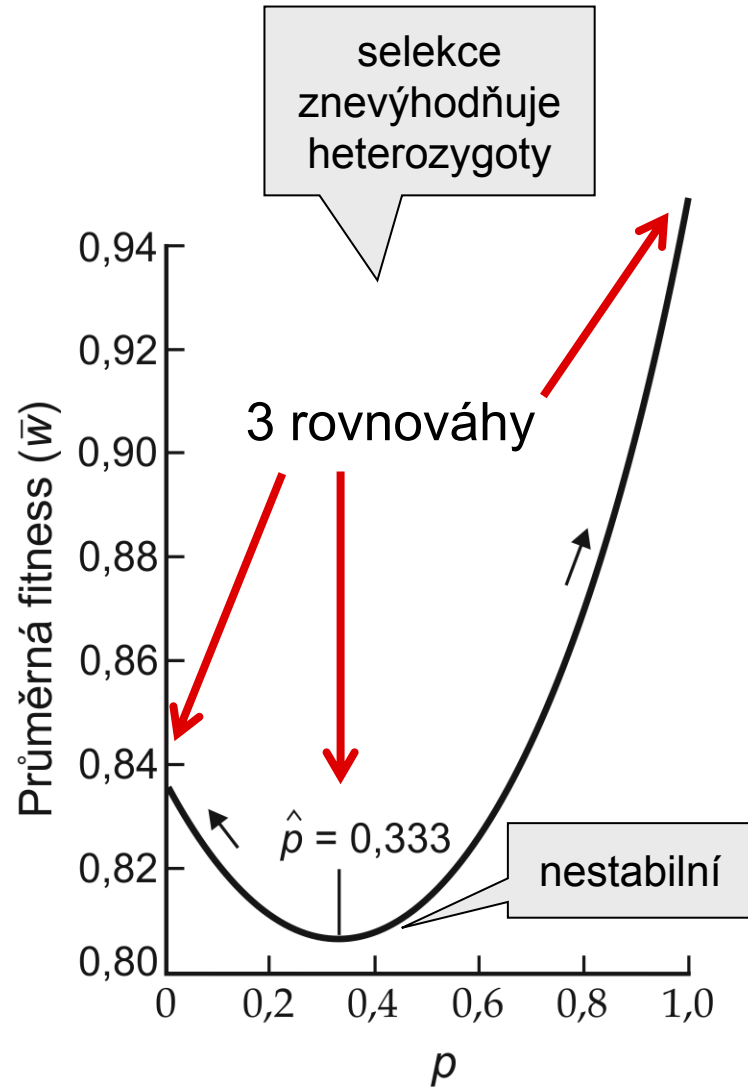
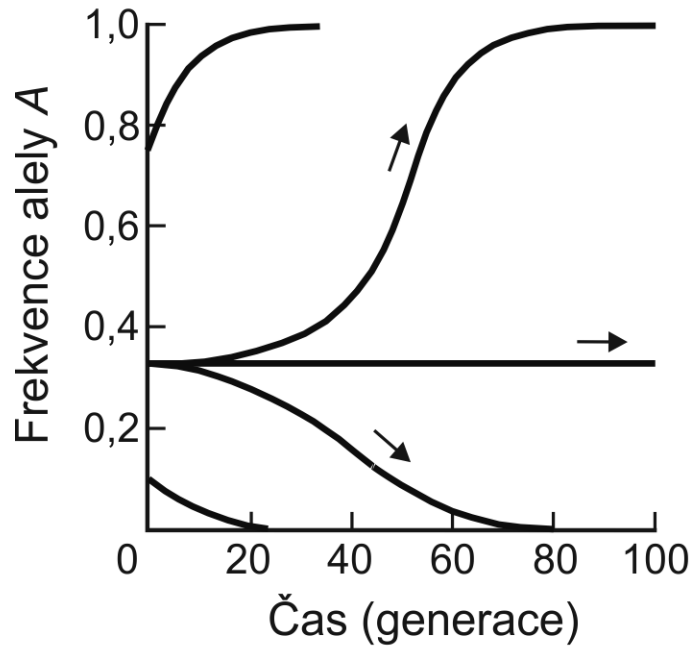
$$W_{AA} < W_{Aa} > W_{aa}$$





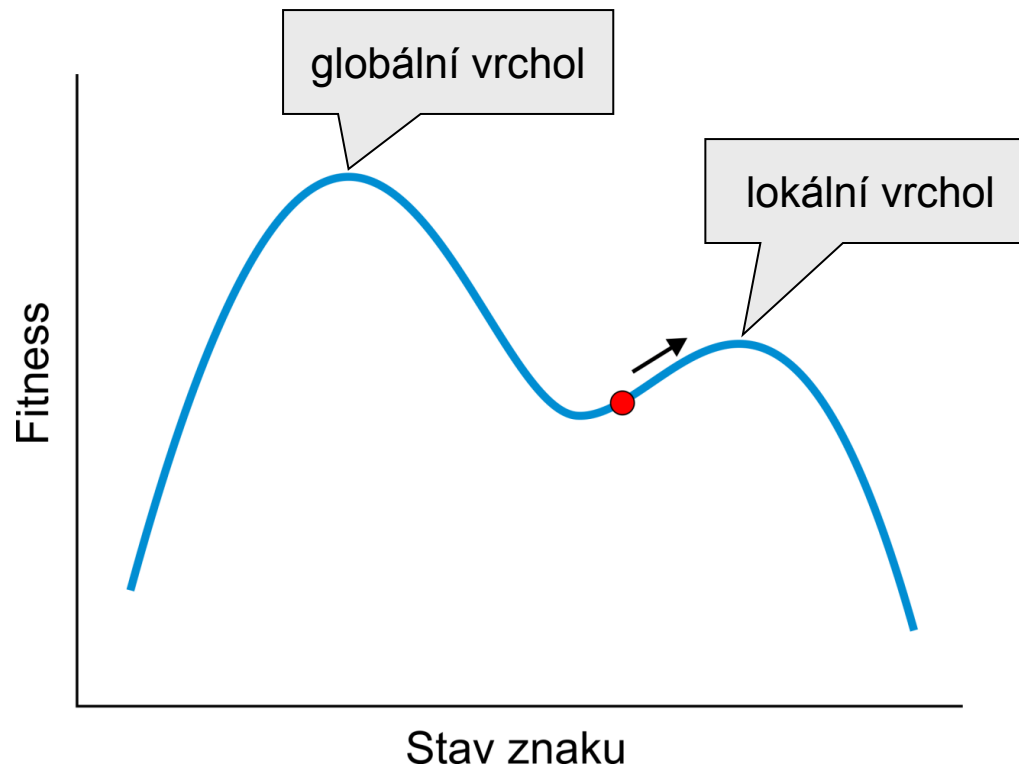
# Adaptivní krajina

$$W_{AA} > W_{Aa} < W_{aa}$$

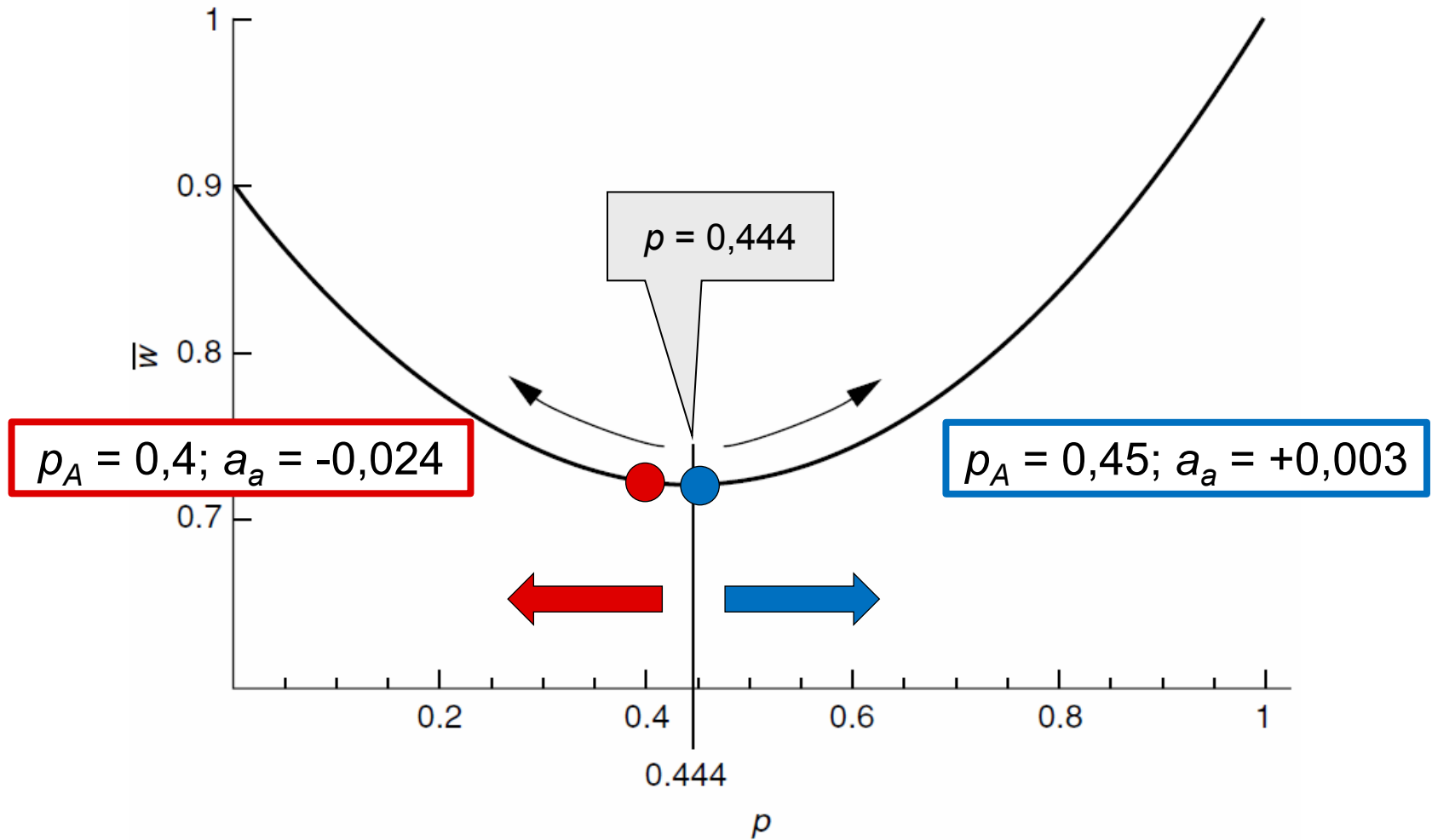


## Co nám oba teorémy o selekci říkají?

6. Selekcce „táhne“ populaci k *nejbližšímu lokálnímu* optimu, tj. ne nezbytně ke *globálně nejvyššímu* vrcholu. To znamená, že selekcce může bránit vývoji výhodnějšího adaptivního znaku.



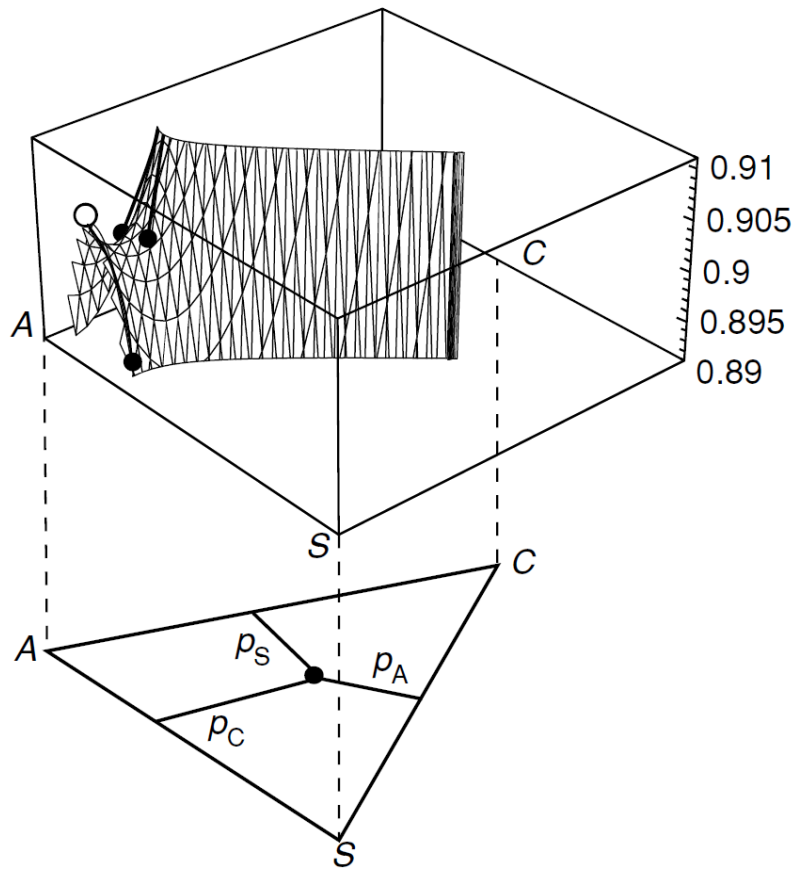
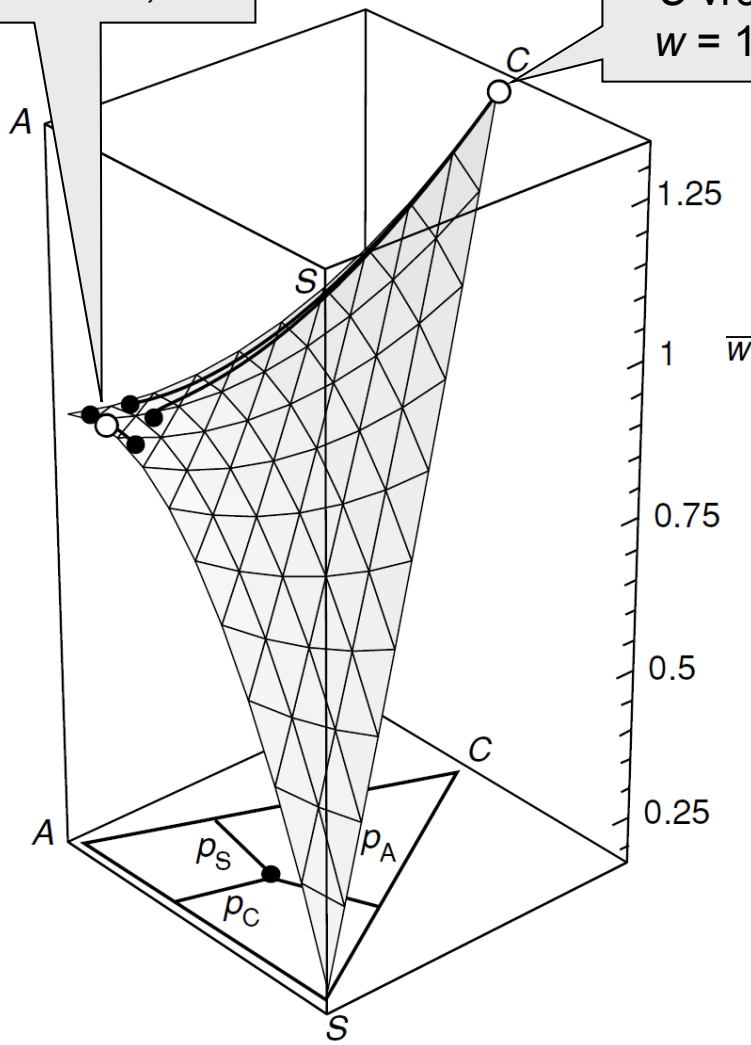
$$w_{AA} = 1, w_{Aa} = 0,5, w_{aa} = 0,9$$



záleží na počátečních podmínkách

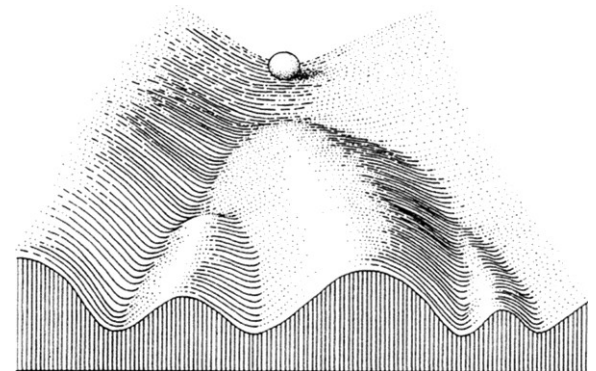
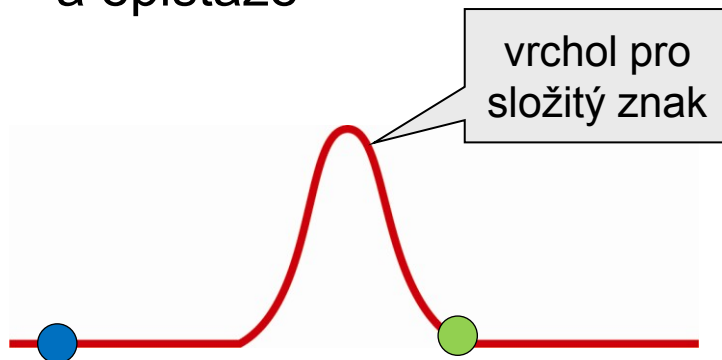
A/S vrchol  
 $w = 0,90$

C vrchol  
 $w = 1,31$



## Co nám oba teorémy o selekci říkají?

7. Selekcce neoptimalizuje samotný znak, pouze fitness s výjimkou velmi striktních podmínek (např. lineární vztah mezi znakem a fitness).
8. Adaptivní proces může vést ke vzniku zdánlivě neadaptivních znaků.
  - antagonistická pleiotropie: stejná alela spojena se znaky, které mají opačný vliv na fitness; např. v malarických oblastech se zvyšuje frekvence srpkovité anémie
  - vývojová omezení: pro vývoj složitých adaptací nutná pleiotropie a epistáze



## Co nám oba teorémy o selekci říkají?

9. Směr adaptivní evoluce je silně ovlivněn genetickou architekturou.

počet lokusů a jejich pozice, počet alel/lokus, mutační rychlost, pravidla dědičnosti; dominance/recesivita, pleiotropie a epistáze

Současné studie naznačují, že alela *C* nemusí být z hlediska viability vůči *A* zcela recesivní (z hlediska snížení rizika onemocnění malárií skutečně není)

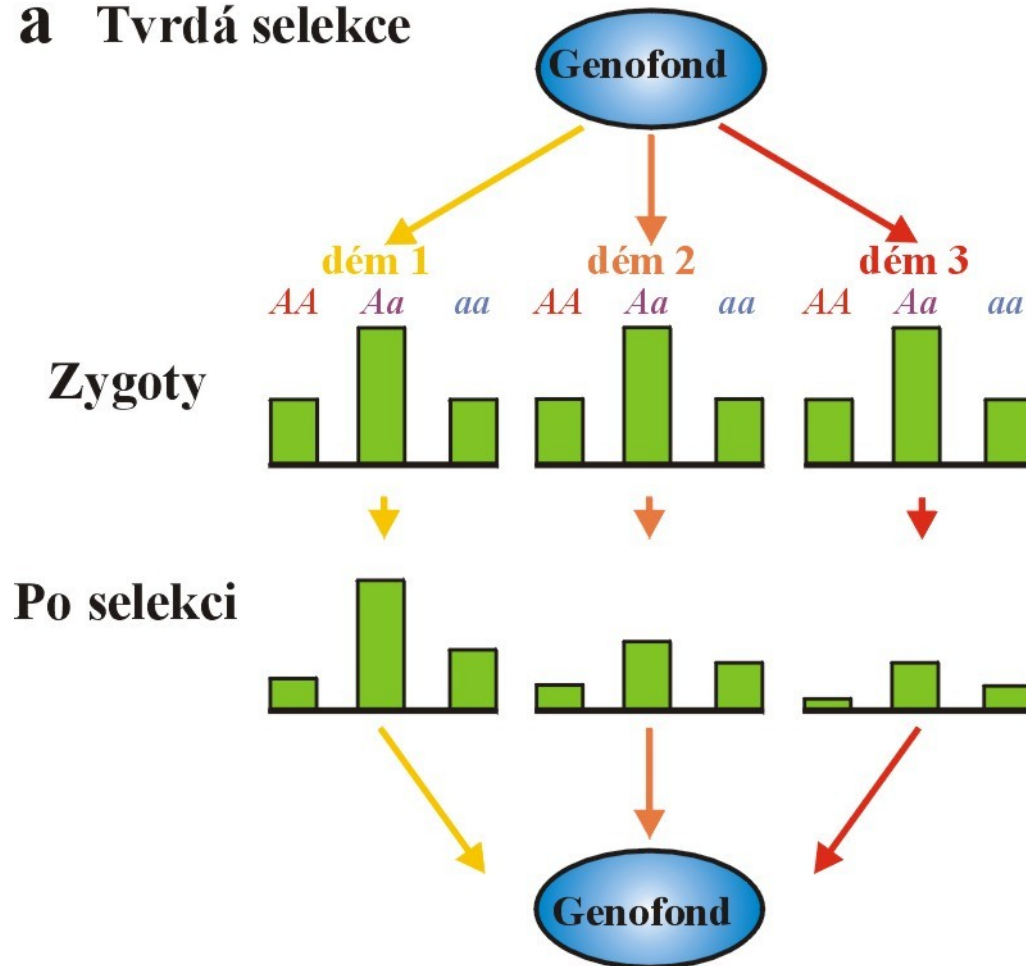
Např. pokud fitness  $AC = 0,93$  a fitness  $AA = 0,89 \rightarrow$

$$a_C \approx 1(0,93 - 0,89) + 0(0,70 - 0,89) + 0(1,31 - 0,89) = 0,04$$

$\Rightarrow$  frekvence *C* poroste, i když je její počáteční frekvence velice nízká

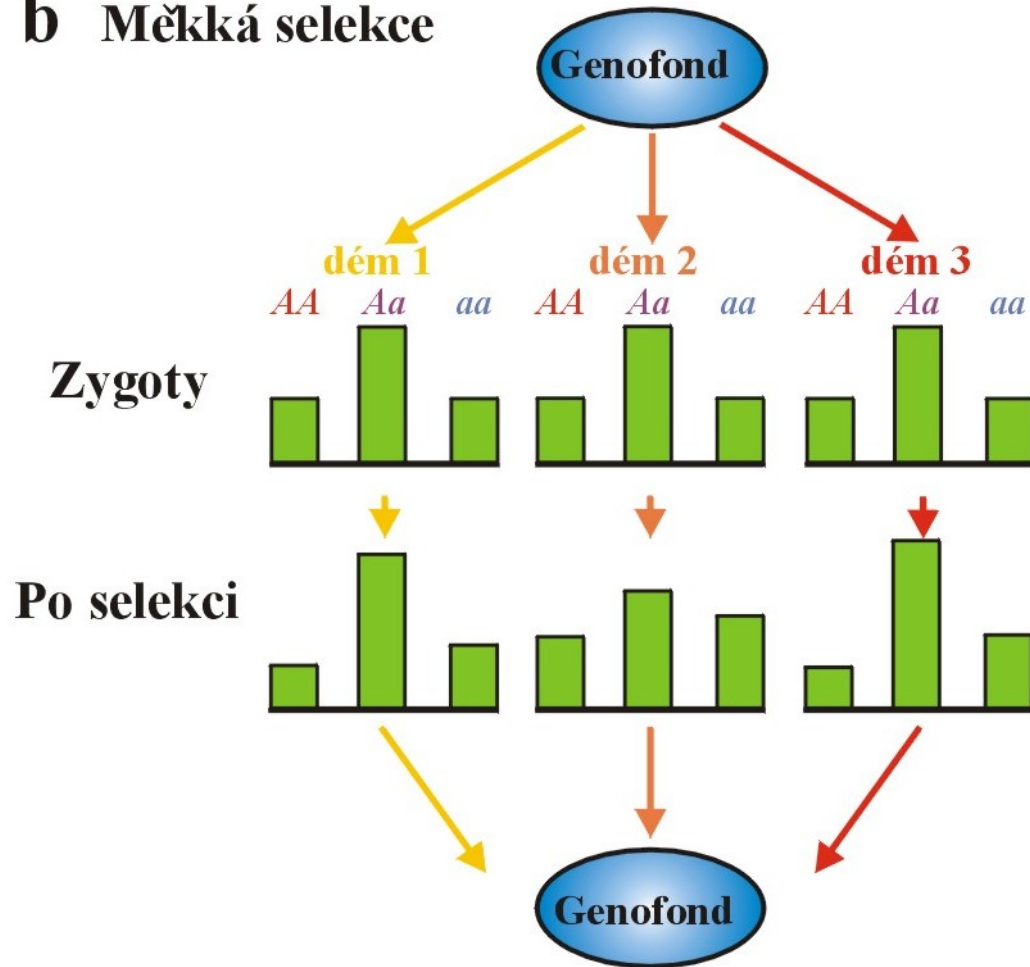
Dosud → *viability selection* ~ tvrdá selekce

**a** Tvrdá selekce



ale častěji *fecundity selection* ~ měkká selekce

**b** Měkká selekce





## Selekce podle plodnosti

na rozdíl od *viability selection* fitness závisí na páru genotypů, které se páří → 9 možných kombinací:

Table 7.4 Fitness values based on the fecundities of mating pairs of male and female genotypes for a diallelic locus along with the expected genotype frequencies in the progeny of each possible male and female mating pair weighted by the fecundity of each mating pair. The frequencies of the AA, Aa, and aa genotypes are represented by X, Y, and Z respectively.

Male genotype	Female genotype . . .	Fitness value		
		AA	Aa	aa
AA		$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$
Aa		$f_{21}$	$f_{23}$	$f_{23}$
aa		$f_{31}$	$f_{32}$	$f_{33}$

Parental mating	Fecundity	Total frequency	Expected progeny genotype frequency		
			AA	Aa	aa
AA × AA	$f_{11}$	$X^2$	$X^2$	0	0
AA × Aa	$f_{12}$	$XY$	$1/2XY$	$1/2XY$	0
AA × aa	$f_{13}$	$XZ$	0	$XZ$	0
Aa × AA	$f_{21}$	$YX$	$1/2YX$	$1/2YX$	0
Aa × Aa	$f_{22}$	$Y^2$	$Y^2/4$	$(2Y^2)/4$	$Y^2/4$
Aa × aa	$f_{23}$	$YZ$	0	$1/2YZ$	$1/2YZ$
aa × AA	$f_{31}$	$ZX$	0	$ZX$	0
aa × Aa	$f_{32}$	$ZY$	0	$1/2ZY$	$1/2ZY$
aa × aa	$f_{33}$	$Z^2$	0	0	$Z^2$

variabilita v plodnosti může měnit počet potomků každého páru oproti předpokladu náhodného oplození

⇒ očekávané genotypové frekvence potomků musí být váženy fekunditou příslušných párů rodičů

⇒ nelze najít všeobecný rovnovážný bod

Speciální případy *fecundity selection*:

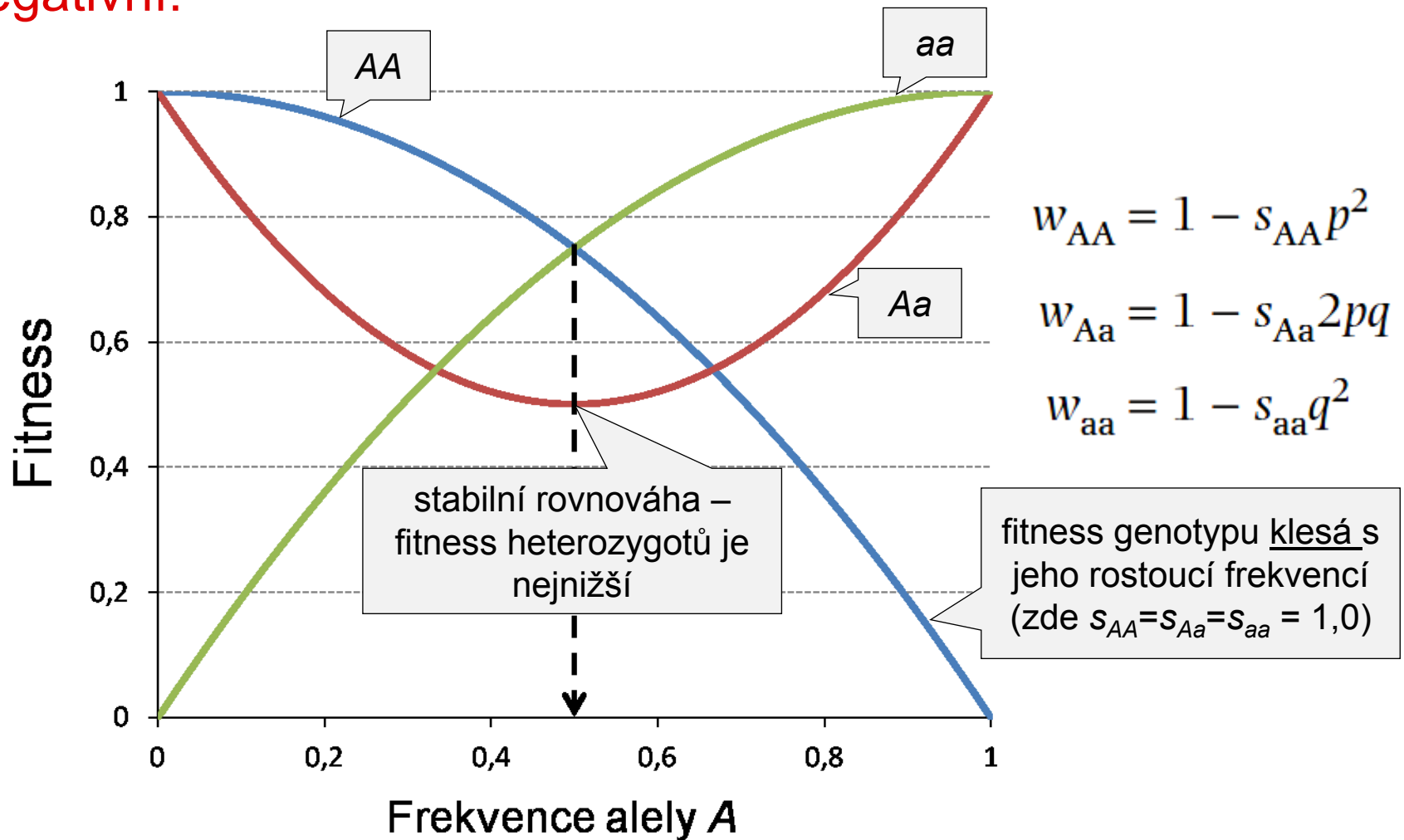
aditivní fekundita: např.  $f_{11} = f_{AA} + m_{AA}$

multiplikativní fekundita: např.  $f_{12} = f_{AA}m_{Aa}$

$f_{xx}$  = fekundita samice  
 $m_{xx}$  = fekundita samce

# Selekce závislá na frekvenci (frequency-dependent selection)

negativní:



Př.: cichlida *Perissodus microlepis* (Tanganika)



samec

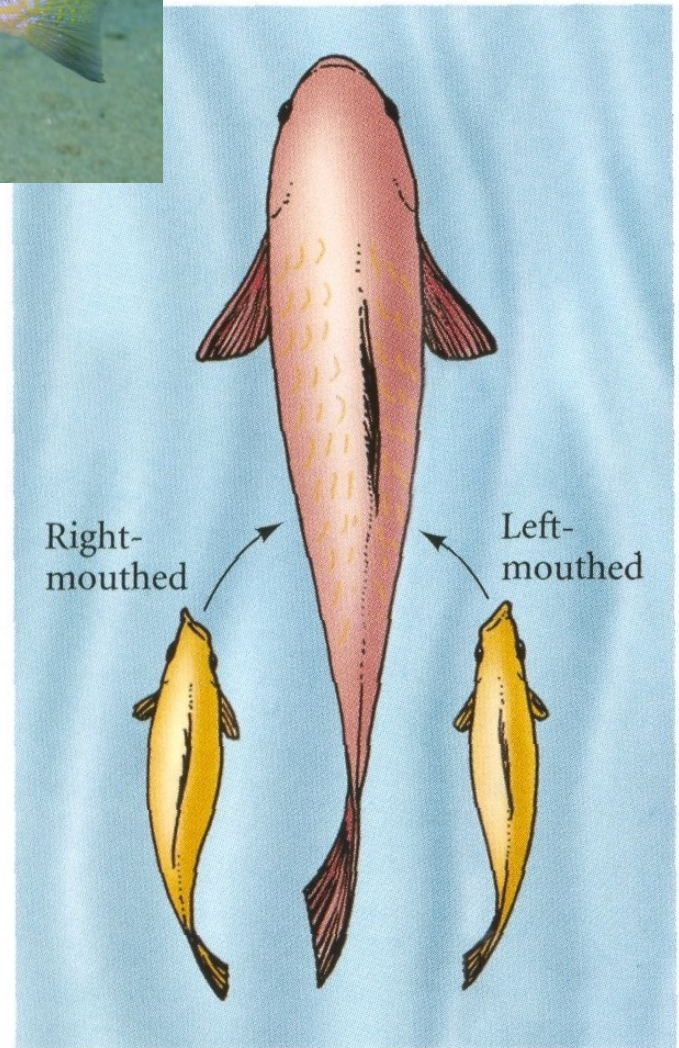


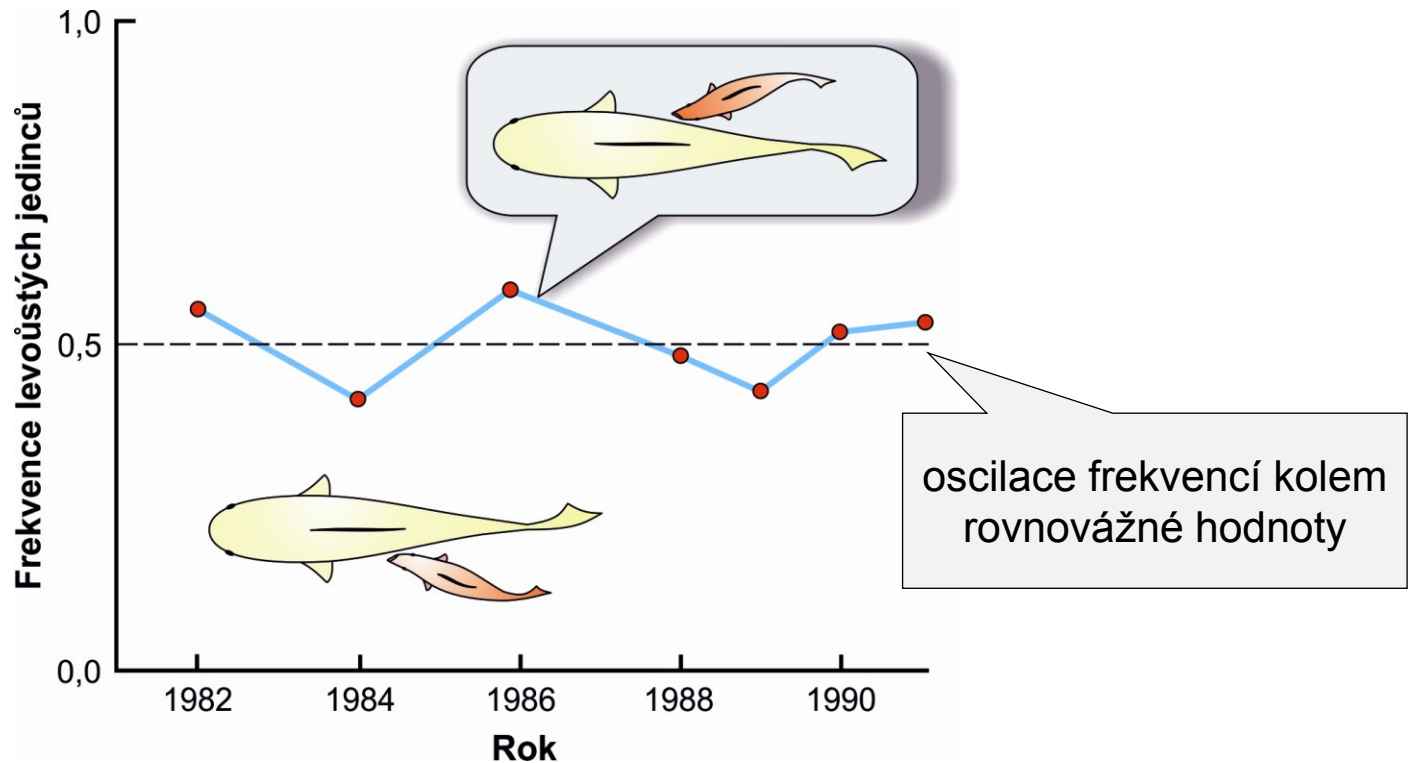
samice

„pravohubý“



„levohubý“

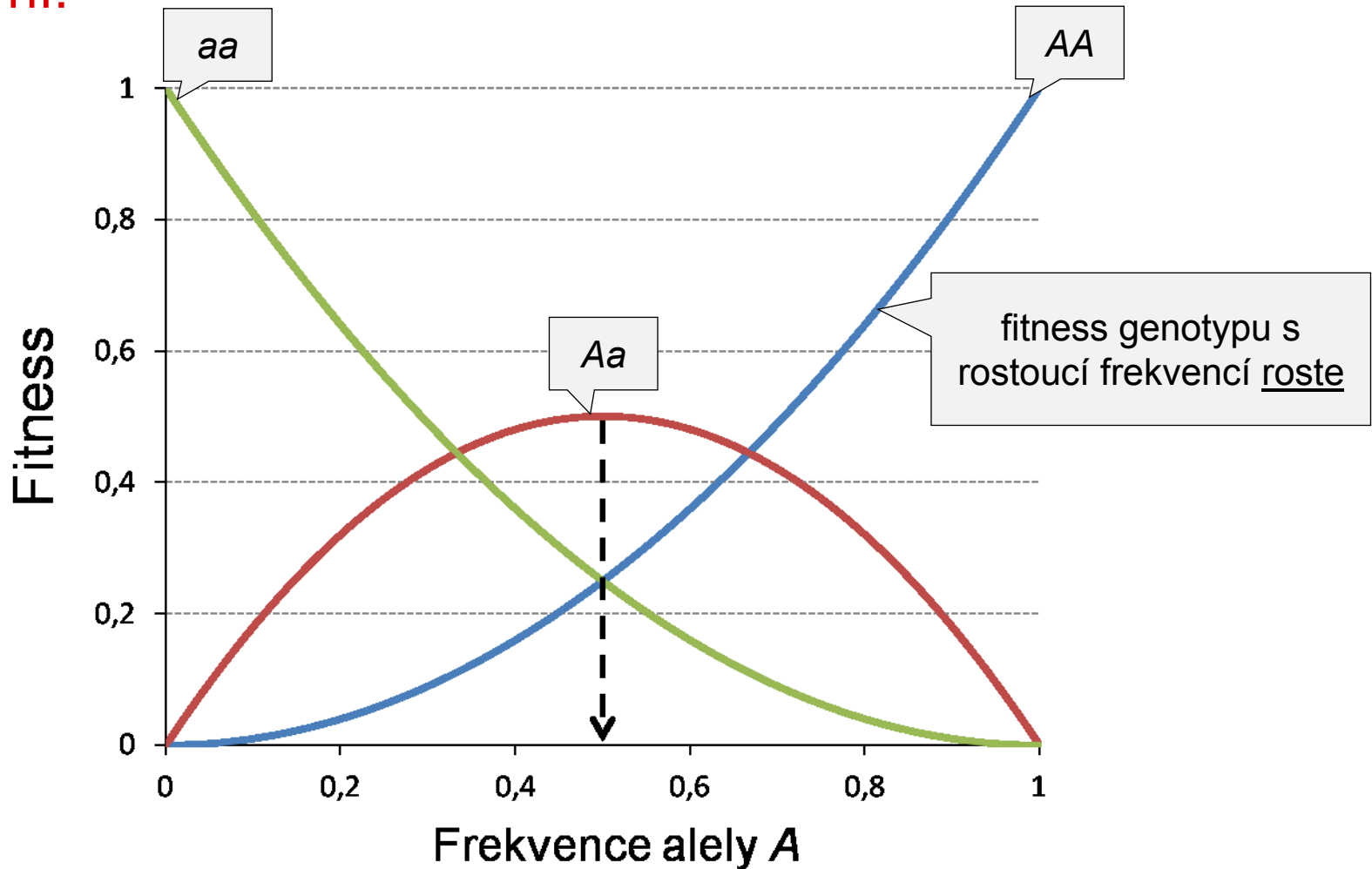




Superdominance a negativní frekvenčně-závislá selekce udržují stabilní (rovnovážný) polymorfismus  
 → typy **balancující selekce**

## Selekce závislá na frekvenci (*frequency-dependent selection*)

pozitivní:



## Selekce závislá na hustotě (*density-dependent selection*)

Absolutní fitness  $\lambda$

$$\lambda = 1 + r - \frac{r}{K}N = 1 + \frac{r(K - N)}{K}$$

$r$  = míra (rychlost) růstu populace;  $K$  = nosná kapacita prostředí  
největší přírůstek při  $N = 0$

při  $N = K$  je  $\lambda = 1$

$$\lambda = 1 + r_{AA} - \frac{r_{AA}}{K_{AA}}N$$

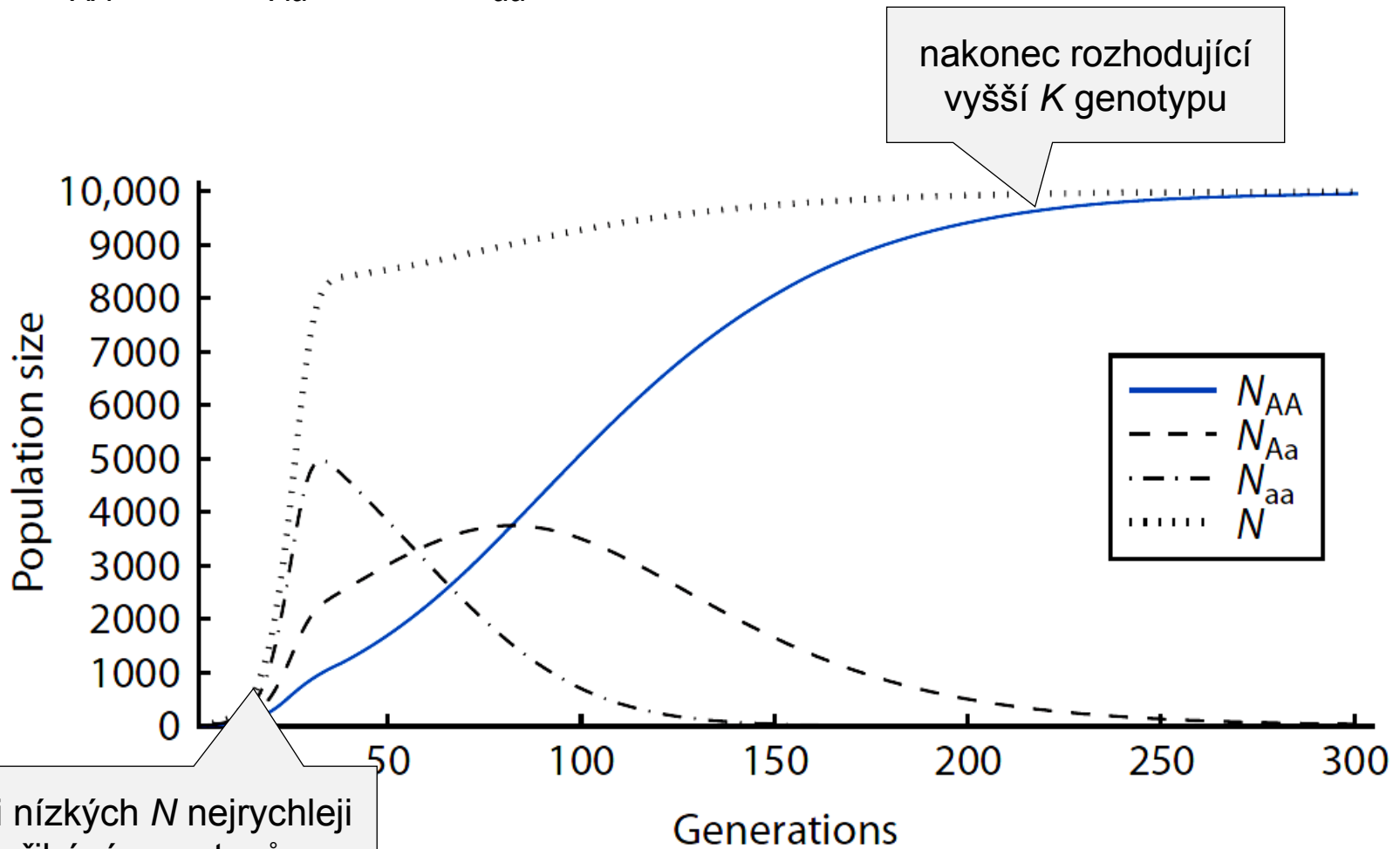
$$\lambda = 1 + r_{Aa} - \frac{r_{Aa}}{K_{Aa}}N$$

$$\lambda = 1 + r_{aa} - \frac{r_{aa}}{K_{aa}}N$$

Při vysokých  $N$  bude mít na rovnovážné frekvence genotypů a alel největší vliv genotyp s nejvyšší hodnotou nosné kapacity

naopak při nízkých  $N$  genotyp s nejvyšší rychlostí růstu populace

Př.:  $K_{AA} = 10\ 000$ ;  $K_{Aa} = 9000$ ;  $K_{aa} = 8000$   
 $r_{AA} = 0,2$ ;  $r_{Aa} = 0,25$ ;  $r_{aa} = 0,3$



při nízkých  $N$  nejrychleji  
přibývá genotypů s  
nejvyšší  $r$  ( $aa$ )

nakonec rozhodující  
vyšší  $K$  genotypu