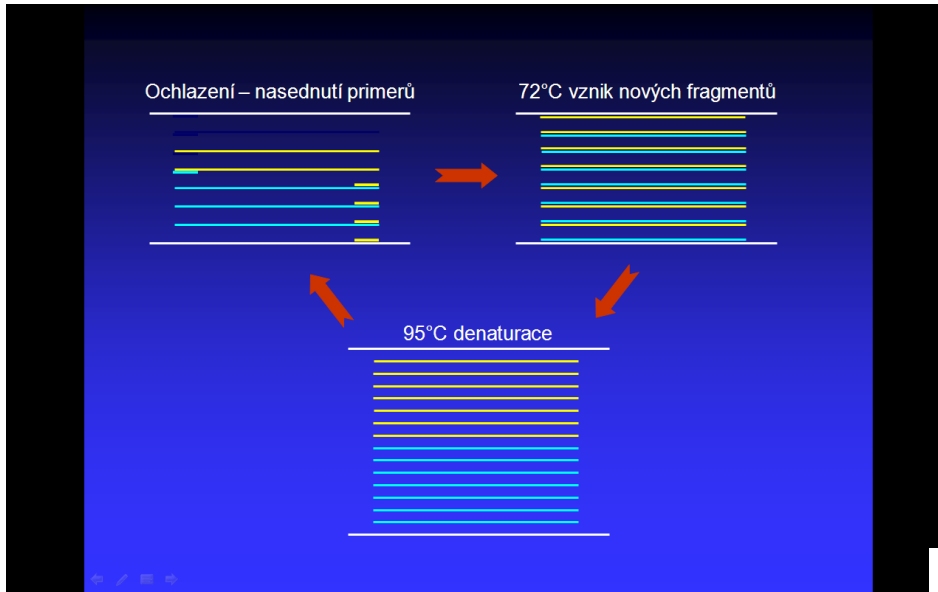
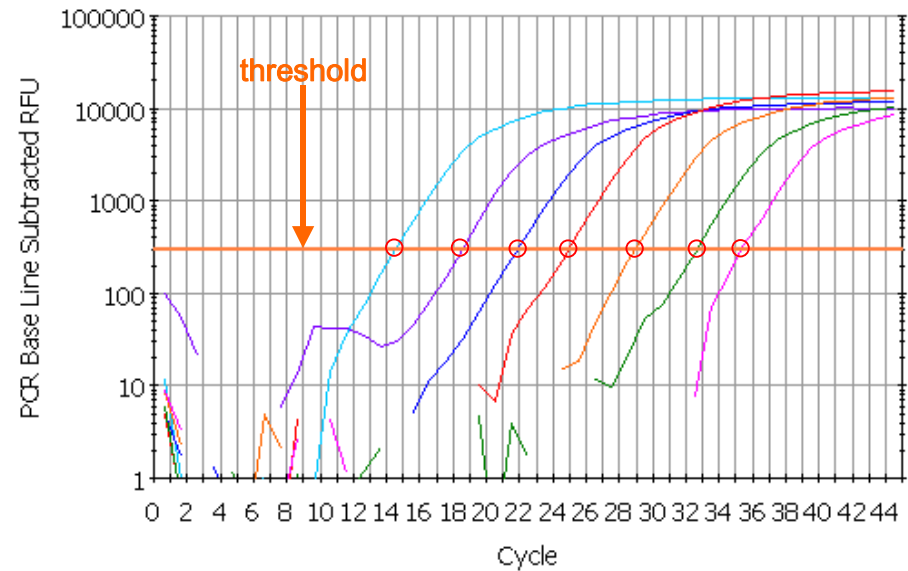


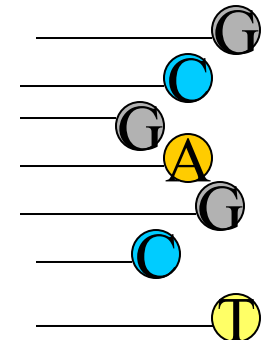
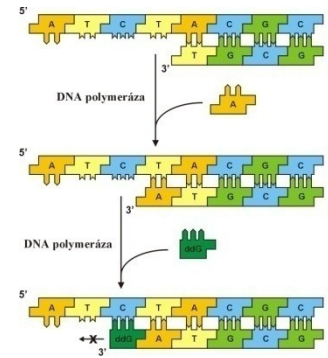
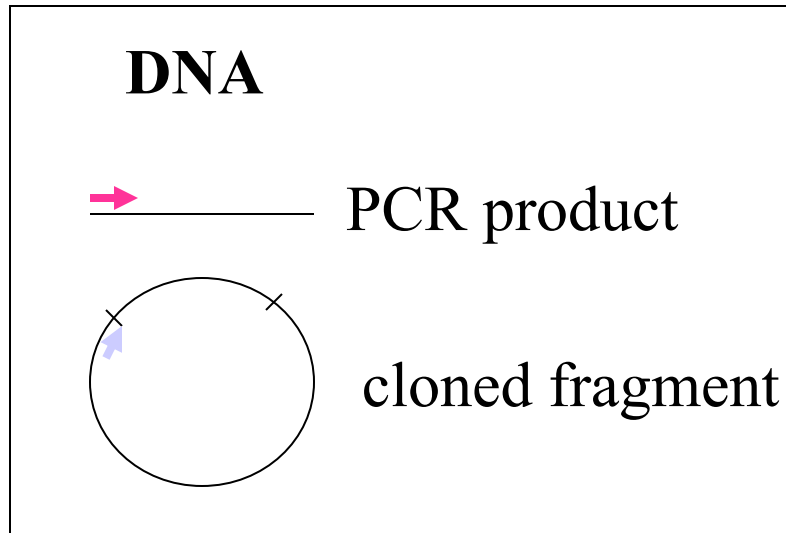
PCR



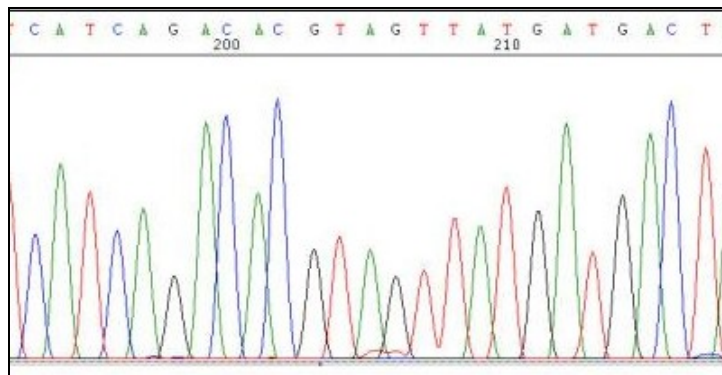
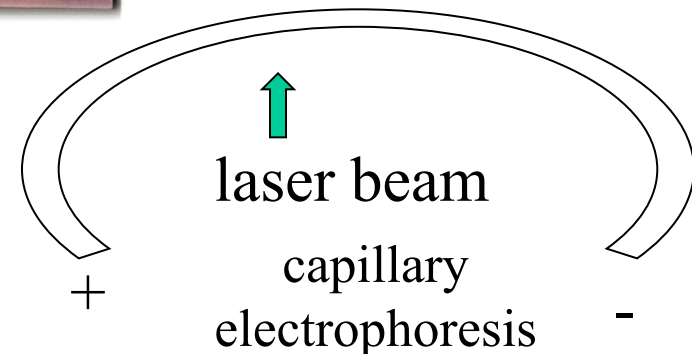
real-time PCR



Sekvencování DNA



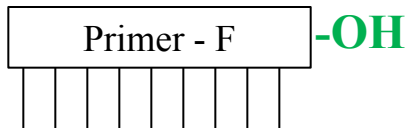
detector



Sekvenování PCR produktu:

- jen jeden primer
- vysoká koncentrace templátu (hodně kopií)

Primer - F	AAGTCAGTCTAAATGCGATTGGGA	Rev. Primer - R
Rev. Primer - F	TTCAGTCAGATTACGCTAACCCCT	Primer - R



1. Denaturace - 96°C
2. Nasednutí primeru - 50-60°C

Sekvenační „PCR“ - jen jeden primer

Primer - F **AAGTCAGTCTAAATGCGATTGGGA** Rev. Primer - R

Přisedání deoxynukleotidů ...



1. Denaturace - 96°C

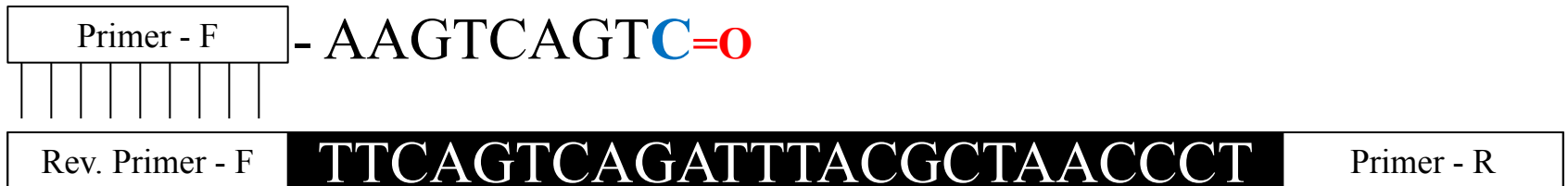
3. Polymerizace - 72°C

2. Nasednutí primeru - 50-60°C

Sekvenační „PCR“ - jen jeden primer

Primer - F **AAGTCAGTCTAAATGCGATTGGGA** Rev. Primer - R

Přisedání deoxynukleotidů ...
... až narazí na dideoxynukleotid



1. Denaturace - 96°C

3. Polymerizace - 72°C

2. Nasednutí primeru - 50-60°C

Sekvenační „PCR“ - jen jeden primer

Primer - F

- AAGTCAGTC=O

Primer - F

- AAGTCAGTCTAA=O

Rev. Primer - F

TTCAGTCAGATTACGCTAACCT

Primer - R

1. Denaturace - 96°C

2. Nasednutí primeru - 50-60°C

3. Polymerizace - 72°C

35 x

Sekvenační „PCR“ - jen jeden primer

Primer - F - AAGTCAGTC**C=O**

Primer - F - AAGTCAGTCTAA**A=O**

Primer - F - AAG**T=O**

Rev. Primer - F

TTCAGTCAGATTACGCTAACCT

Primer - R

1. Denaturace - 96°C

2. Nasednutí primeru - 50-60°C

3. Polymerizace - 72°C

35 x

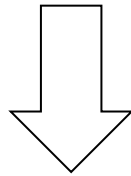
Výsledek sekvenační „PCR“

Primer - F - AAGTCAGTC**C=O**

Primer - F - AAGTCAGTCTAA**A=O**

Primer - F - AAG**T=O**

... a řada dalších fragmentů, každý z nich označený fluorescenčním dideoxynukleotidem



Kapilární elektroforéza

- seřazení fragmentů podle délky
- detekce barvy dideoxynukleotidů

Detekce fragmentů - kapilární elektroforéza

Primer - F - AAGTCAGTCTAA**A**=0 -

Primer - F - AAGTCAGTCT**A**=0

Primer - F - AAGTCAGTCT**T**=0

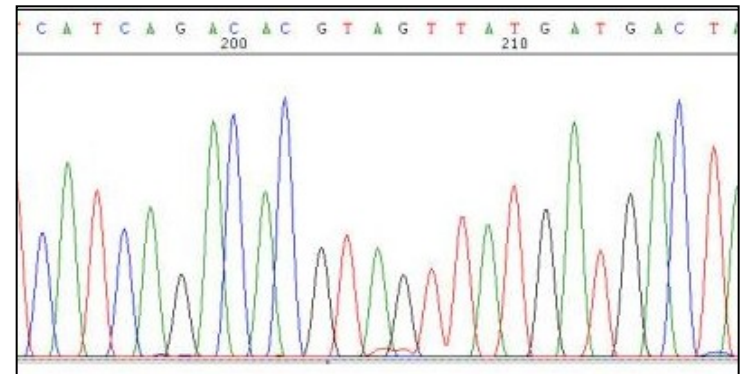
Primer - F - AAGTCAGT**C**=0

Primer - F - AAGTCAG**T**=0

Primer - F - AAGTCAG**G**=0

Primer - F - AAGTC**A**=0

Primer - F - AAGT**C**=0



krátké ----- dlouhé
(rychlé) ----- (pomalé)

+

Primer - F **AAGTCAGTCTAA**ATGCGATTGGGA Rev. Primer - R

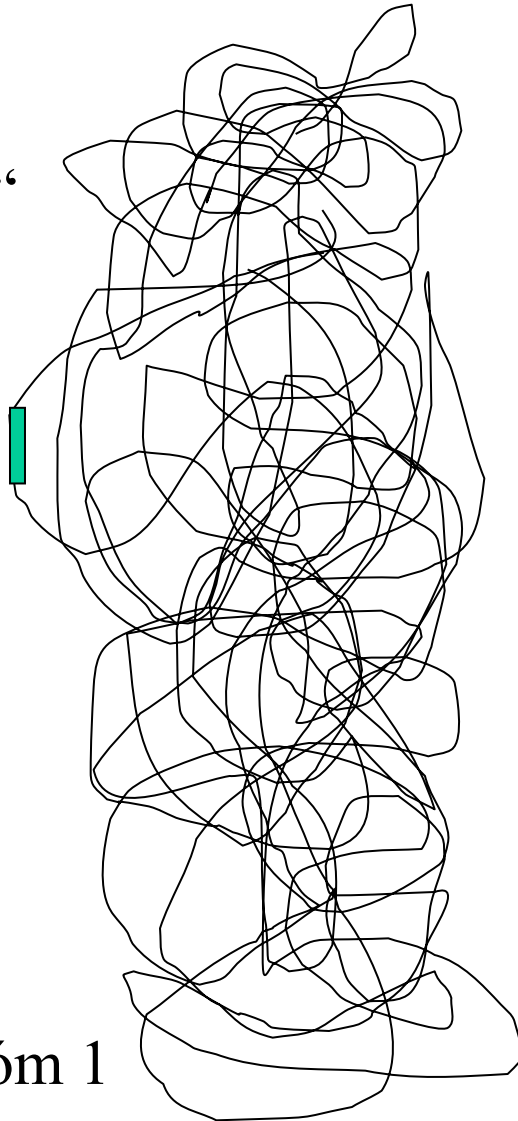
Rev. Primer - F **TTCAGTCAGATTACGCTAACCT** Primer - R

Genotypizace - stanovení genotypu

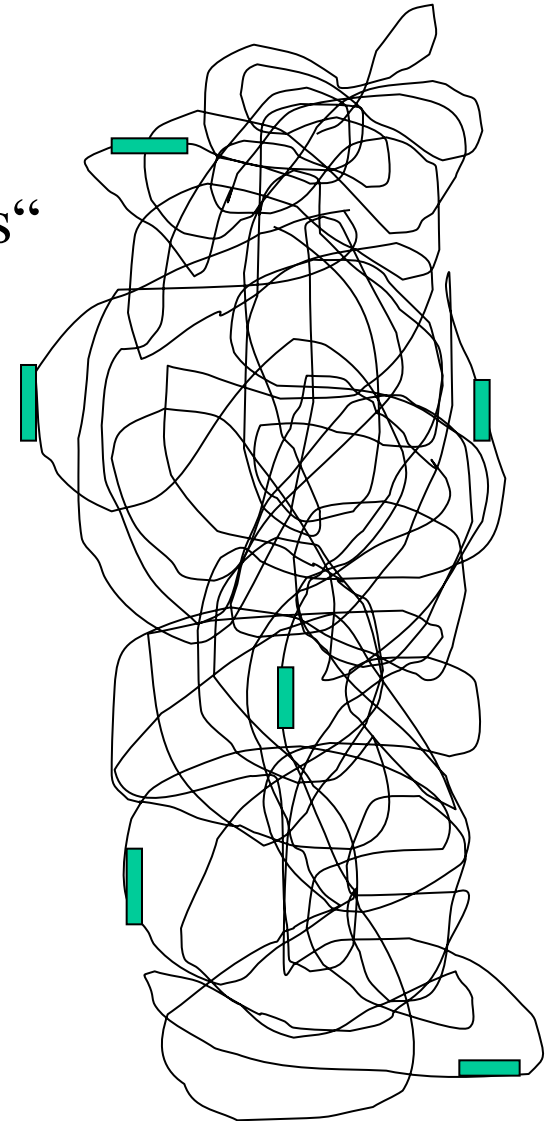
- stanovení formy (alely, haplotypu) určitého úseku DNA („genetického markeru”)
 - 1) izolace celkové DNA z tkání
 - 2) amplifikace požadovaného úseku DNA (PCR-based methods)
 - 3) studium variability daného úseku (lokus = marker = znak)

Typy genetických markerů

„single-locus“



„multi-locus“



Př.: chromozóm 1

Typy genetických markerů

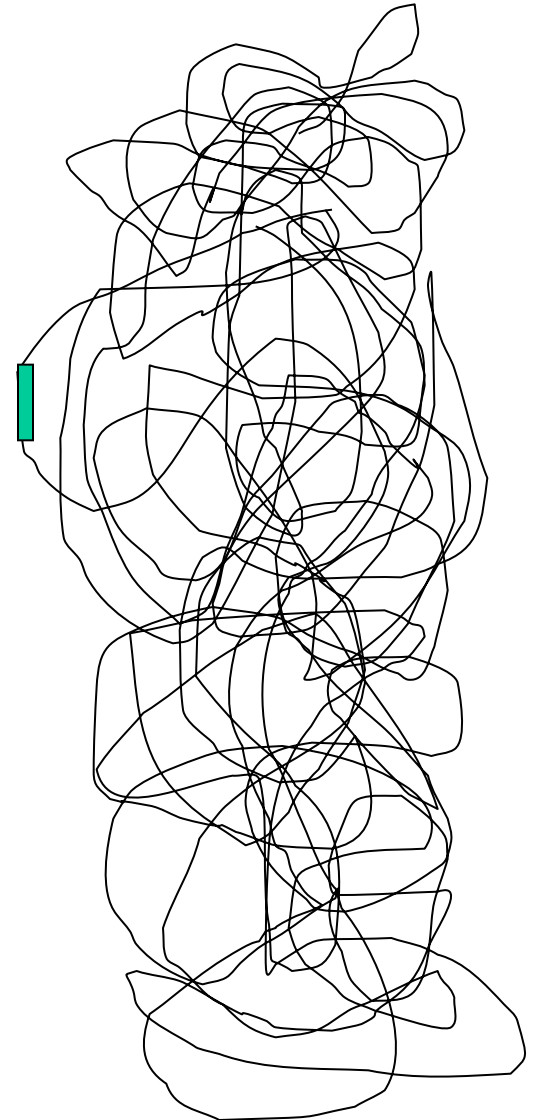
- **dominantní** markery – odliší pouze přítomnost (či nepřítomnost) daného znaku; tj. neodliší obě jeho formy na homologních chromozómech
- **kodominantní** markery – identifikace homologních alel, tj. je možno rozlišit homozygotní a heterozygotní stav (umožňují stanovit frekvenci alel)

Typy genetických markerů

	Single locus	Codominant	PCR assay	Overall variability
Nuclear multilocus				
Minisatellite DNA fingerprints	No	No	No	High
RAPD	No	No	Yes	High
AFLP	No	No	Yes	High
Nuclear single locus				
Alozymy	Yes	Yes	No	Low-medium
Mikrosatelite	Yes	Yes	Yes	High
SINE (LINE)	Yes	Yes	Yes	Low
SNPs (sekvence)	Yes	Yes	Yes	Low-high

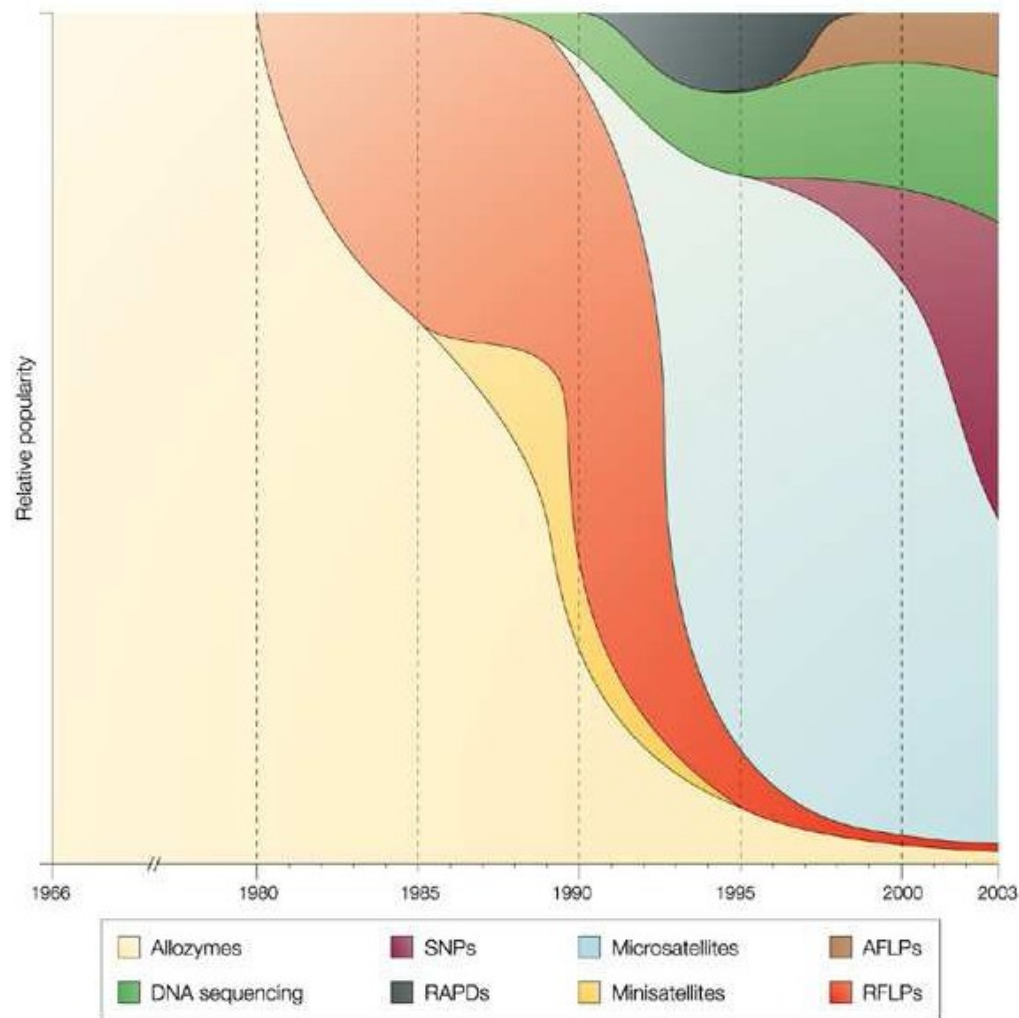
Single-locus genetic markers

- kodominantní – možno stanovovat frekvence alel (= lze odlišit homo- a heterozygota)
- allozomy a jiné funkční geny - MM
- mikrosatelity – délkový polymorfismus
- SNPs (single nucleotide polymorphisms) – sekvenční polymorfismus
- SINE, LINE – inzerce (tj. délkový polymorfismus)



Mikrosatelite

Mikrosatelity jsou a budou stále velmi užitečné markery v molekulární ekologii



Mikrosatelity

- VNTR („variable number of tandem repetitions“), SSR („simple sequence repeats“)
- jednotlivé alely se liší délkou

TTCAGGCACACACA**ATCTCTAGCTTCGA**

27 bp

TTCAGGCACACA**ATCTCTAGCTTTGA**

25 bp

genotyp diploidního jedince: **25/27**

Mikrosatelity

- 1-6 (nejč. 2-4) bp motiv
- početné po celém genomu
- vysoká úroveň polymorfismu (běžně 15 alel v populaci)
- Mendelovská dědičnost (autosomy) - kodominance
- ideální pro studium populační struktury a příbuzenských vztahů

Mikrosatelity - postup analýzy

- Izolace DNA



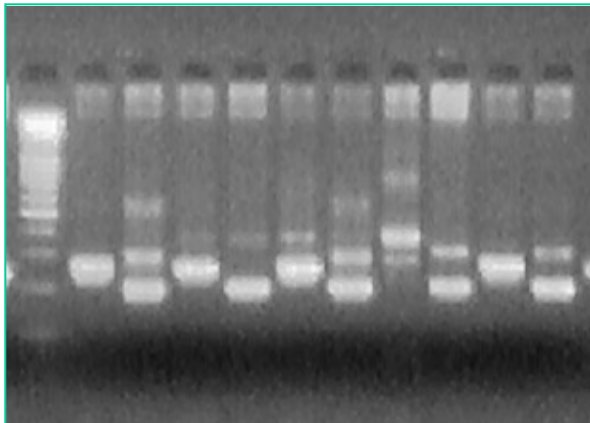
- PCR

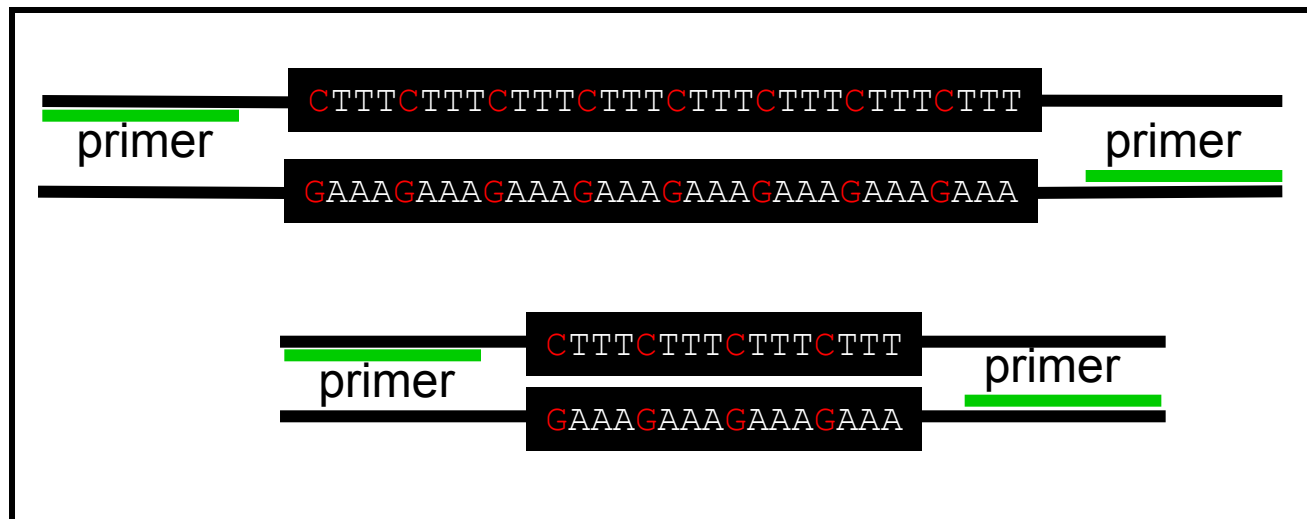
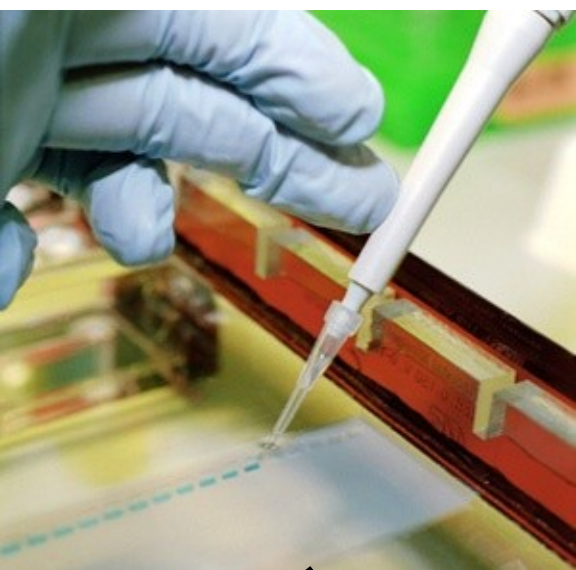


- Detekce
→ gelová elektroforéza

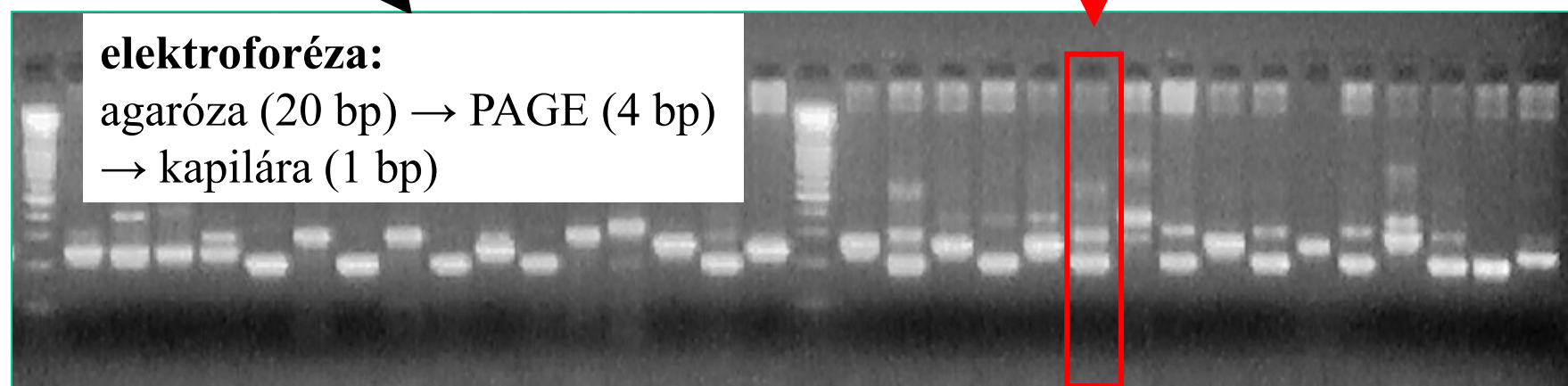


- sekvenátor (fragmentační analýza)

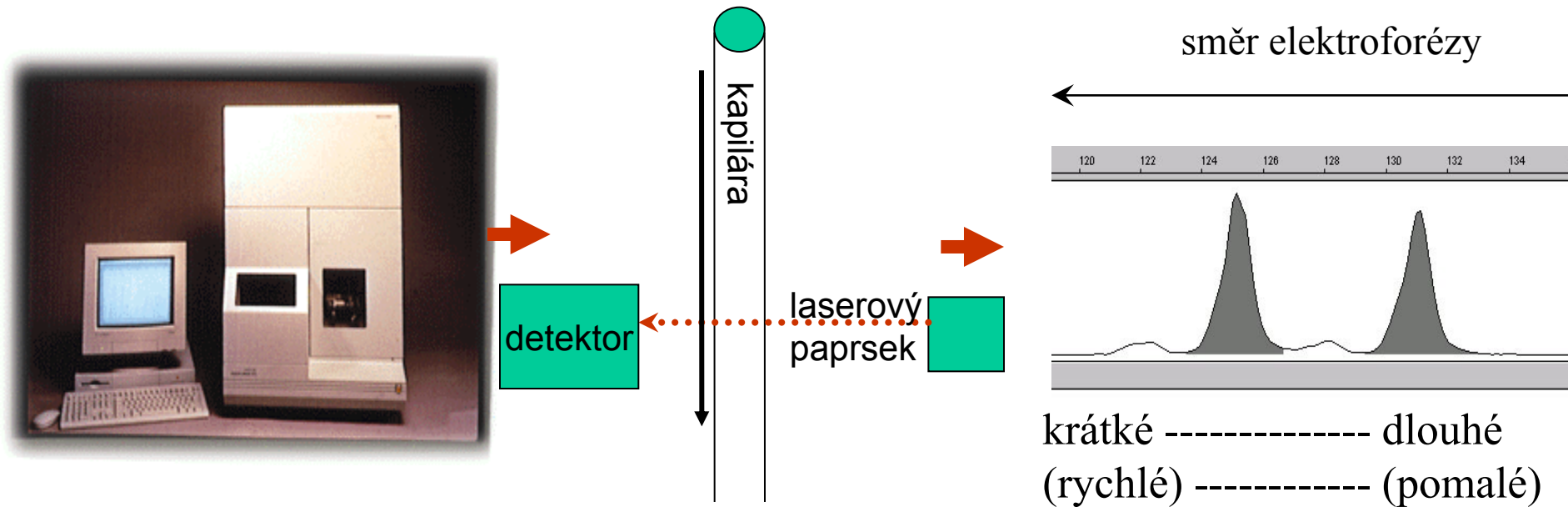




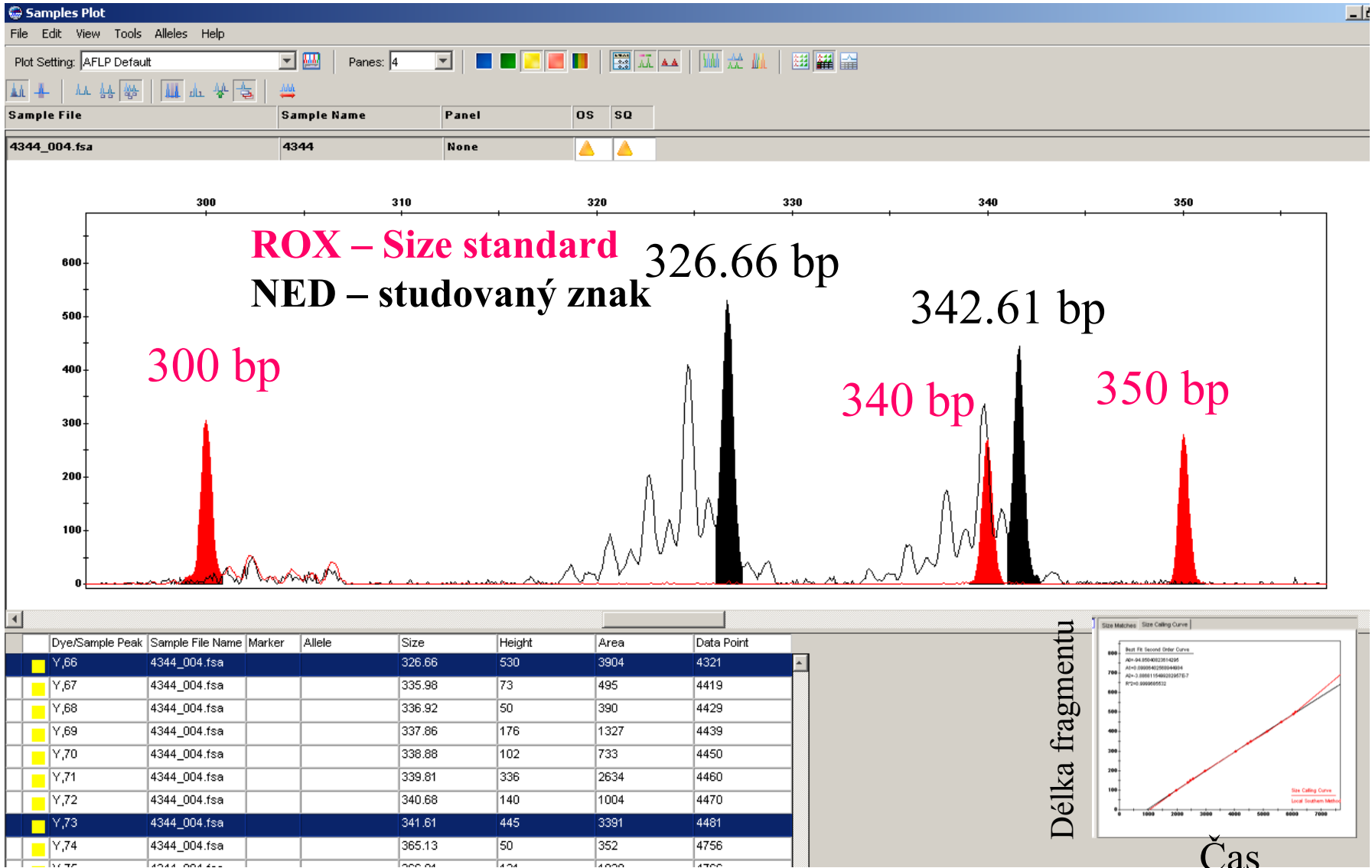
elektroforéza:
agaróza (20 bp) → PAGE (4 bp)
→ kapilára (1 bp)



Kapilární elektroforéza ~ Fragmentační analýza

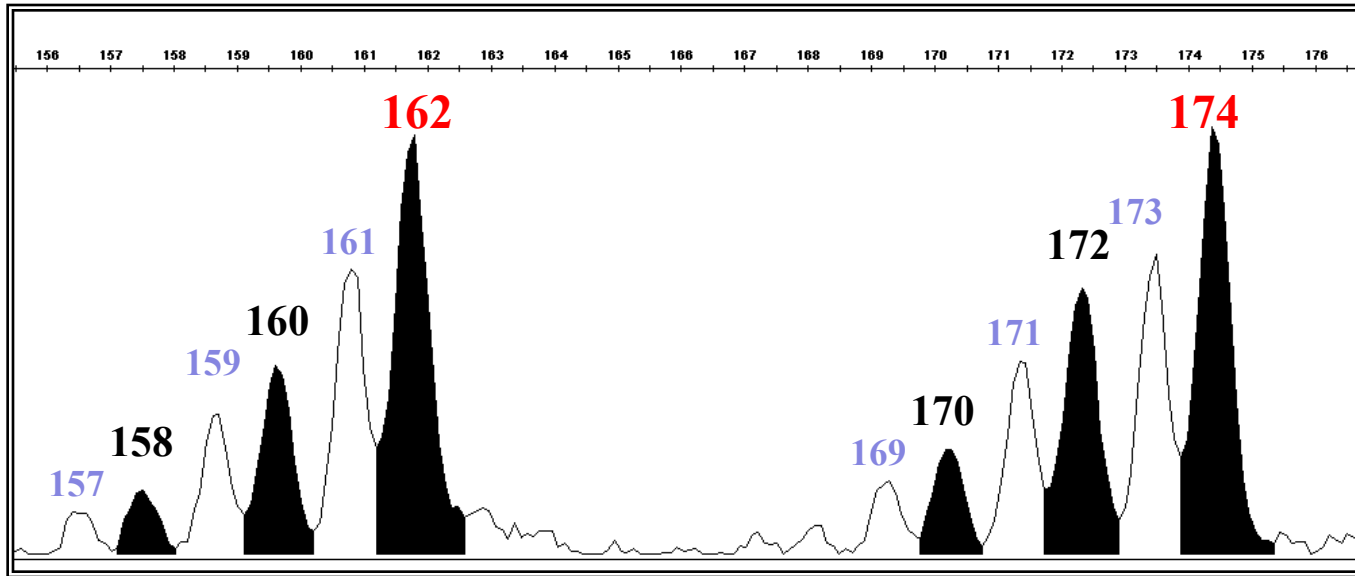


Stanovení délky PCR fragmentů srovnáním se známým standardem
(ten je označen jinou fluorescenční značkou než PCR produkt)



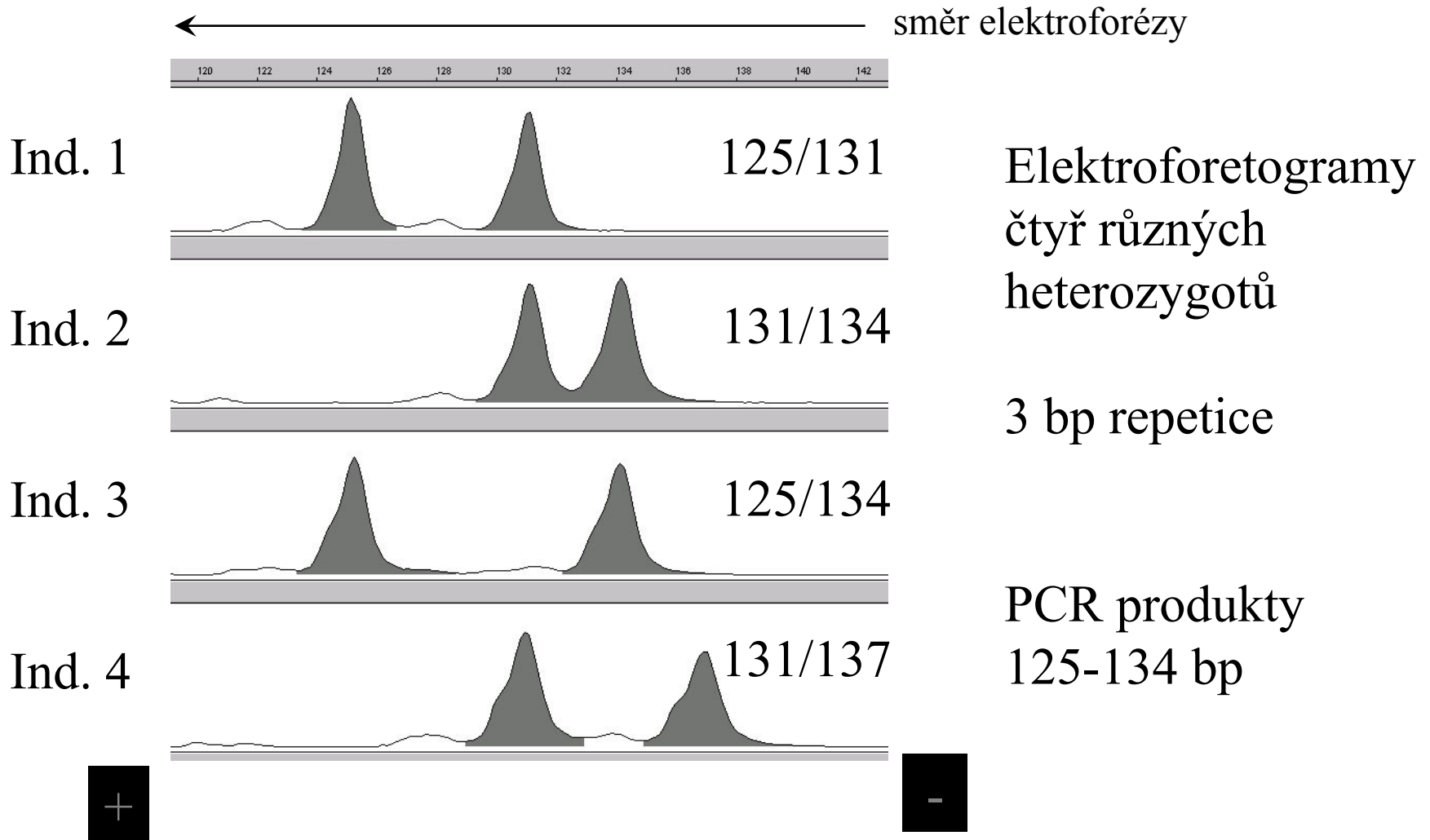
Genotyp mikrosatelitu na lokusu NED = 326/342 nebo 327/343

Genotyp 162/174

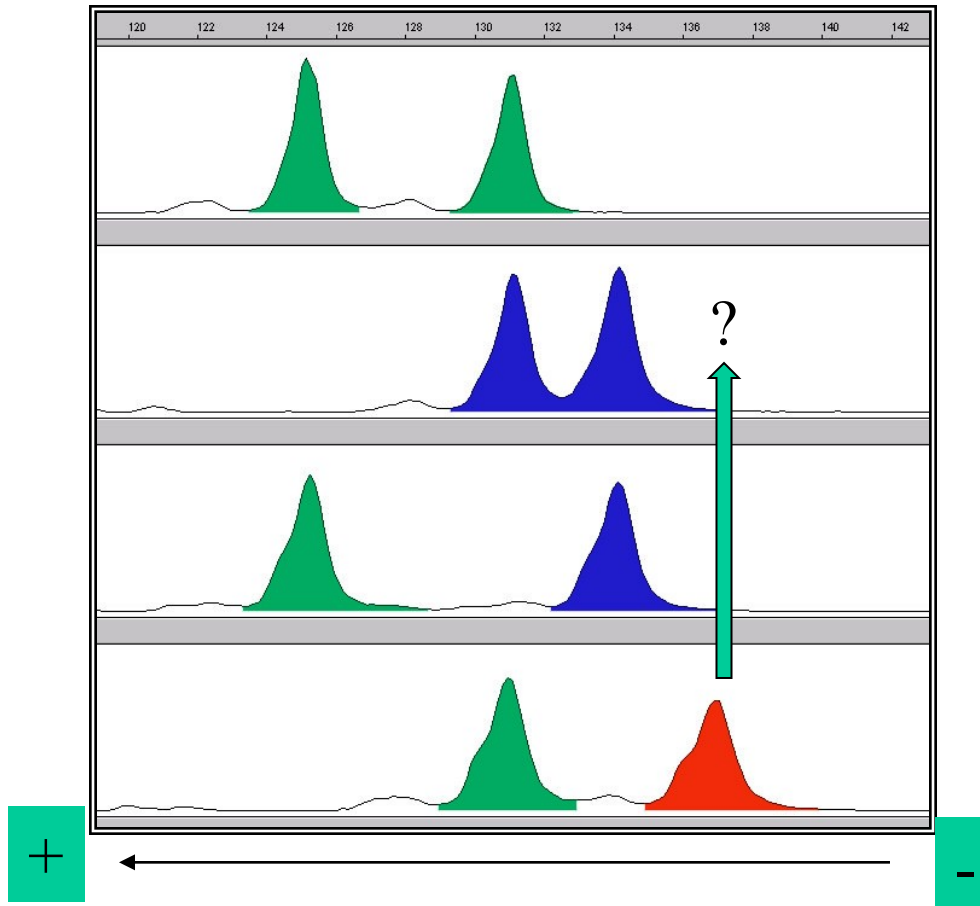


- alely a jejich stuttery jsou černě (rozdíl mezi nimi je 2 bp)
- bílé píky jsou tzv. „mínus A-alely“ a jejich stuttery = výsledek jiné chyby polymerázy, a to nepřidání koncového adeninu
- rozdíl mezi černým a sousedním bílým píkem je 1 bp (tj. chybějící adenin)
- pattern daného lokusu je vždy specifický a často záleží na PCR podmínkách

Srovnání různých jedinců - analýzy příbuznosti



Př. Analýza příbuzenských vztahů



Genotyp (bp)

Matka: 125/131

Otec: 131/134

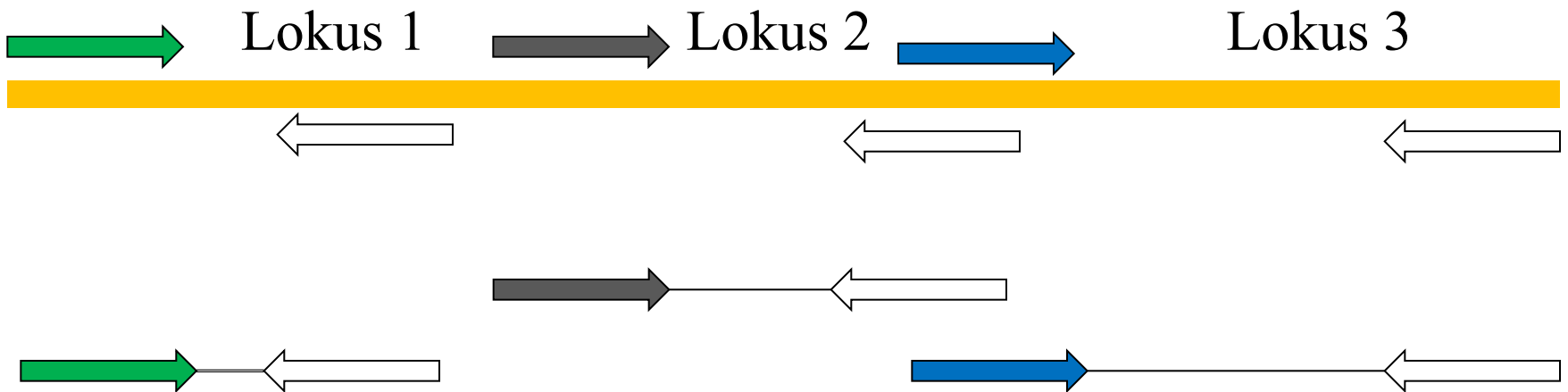
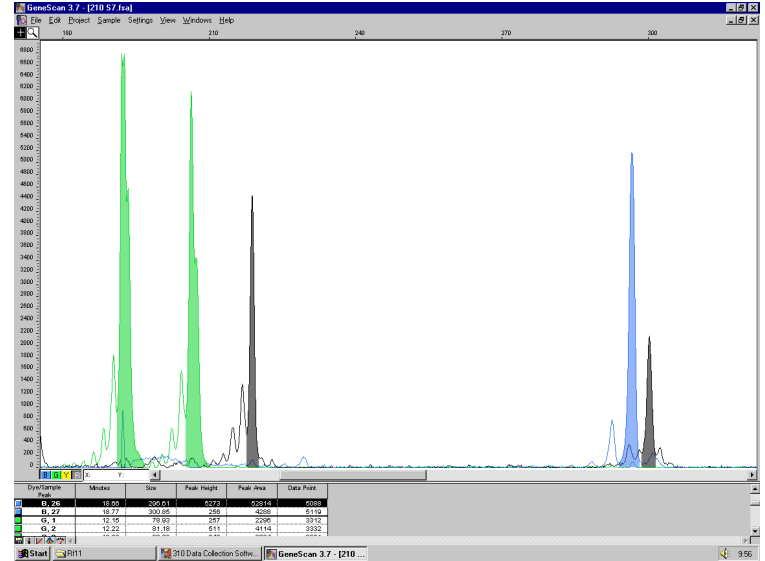
Potomek 1: 125/134

Potomek 2: 131/137

Sledovaný otec mohl zplodit potomka 1, ale zcela jistě není otcem potomka 2

Různé značení různých znaků

- Snížení časových a finančních nákladů
- = „multiplex set“
- Až 4 různé barvy (+ 5. barva jako velikostní standard) - analýza až 4 lokusů o stejné velikosti alel



Mikrosatelity - omezení

- nalezení lokusů (navržení primerů) je pracné a nákladné u volně žijících druhů (genomová knihovna, klonování, screening, sekvencování)

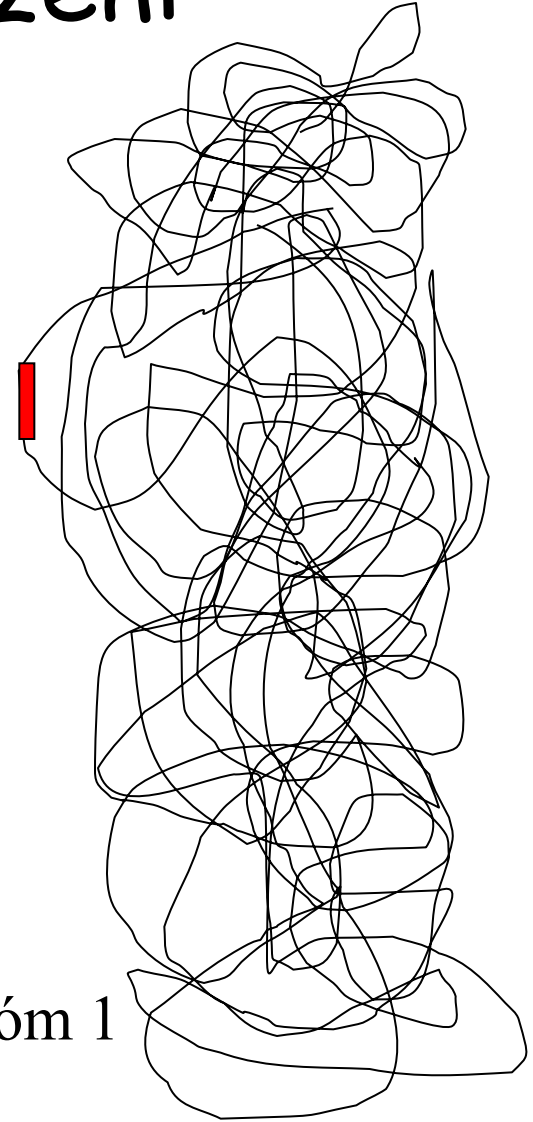


TTCAGG**CACACACA**TCTCTAGCTTCGA

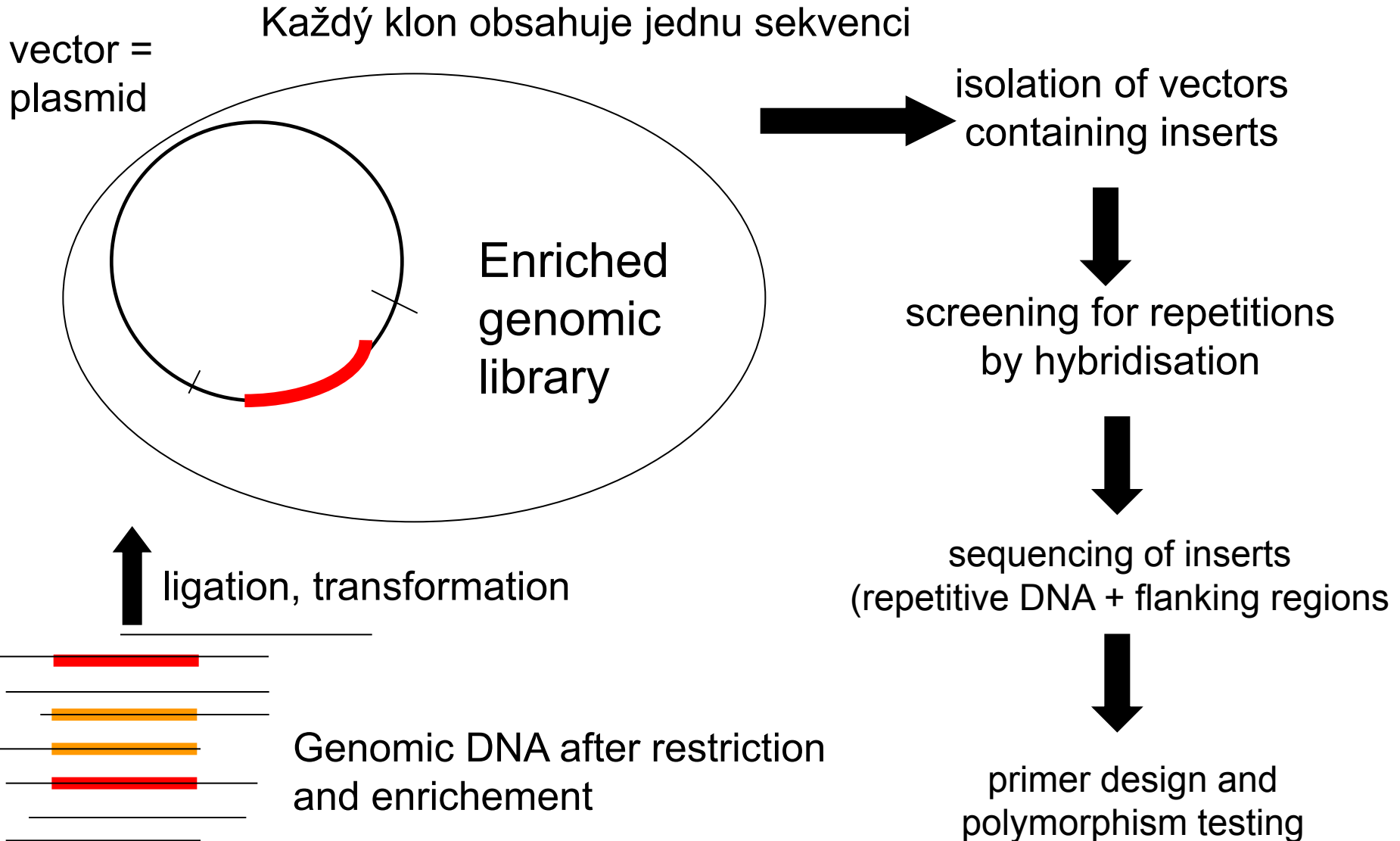


„flanking regions“ – ohraničují repetici a zde musí být navrženy primery pro PCR

Př.: chromozóm 1

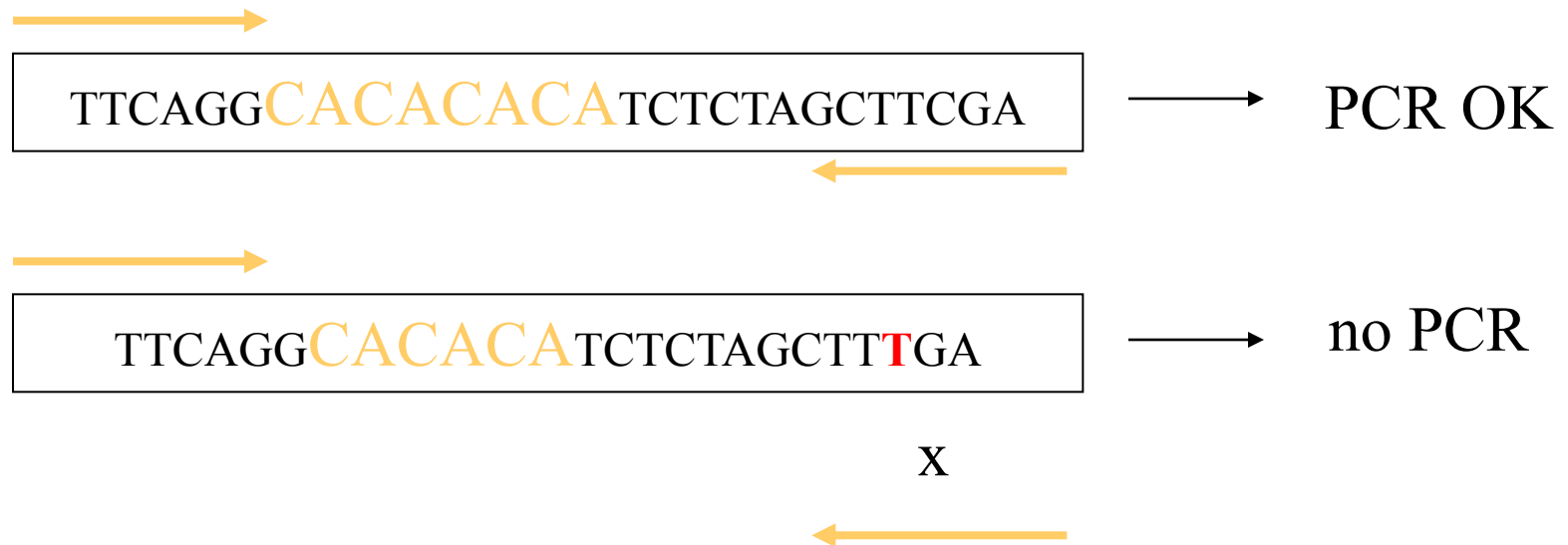


Restriction, enrichment, cloning, and sequencing



Mikrosatelity - omezení

- „cross-amplification“ – úspěšnost klesá s fylogenetickou vzdáleností
- nulové alely (mutace v primerových sekvencích) → vyšší proporce „homozygotů“



Mikrosatelity - budoucnost (?)

- „next-generation sequencing“ – velice rychlá sekvenace stovek tisíců fragmentů z jakéhokoliv genomu
- vyhledání repetitivních sekvencí vhodným softwarem a navržení primerů
- identifikace nových mikrosatelitů rychle, elegantně a relativně levně (1500 EUR)

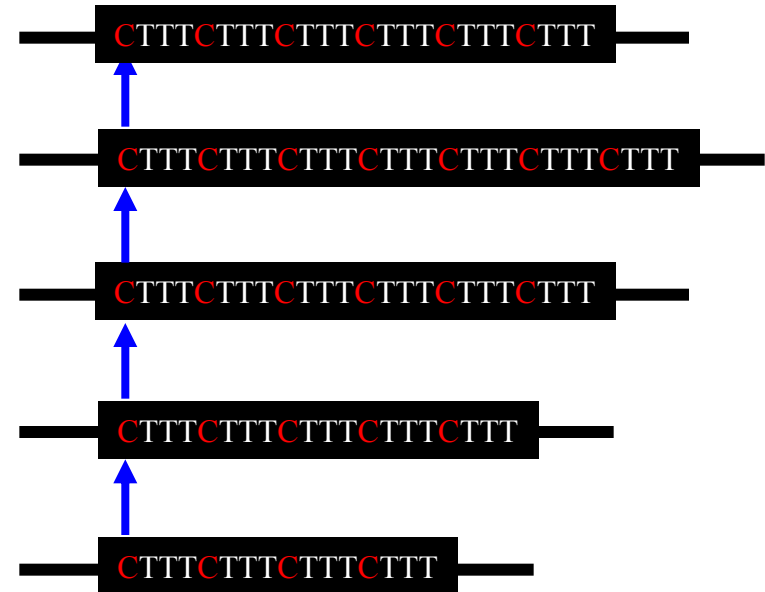
Teoretické mutační modely - analýzy vyžadující údaj o podobnosti alel

Dva extrémny

- **IAM – infinitive allele model**
Při mutaci ztráta nebo získání libovolného počtu opakování. Vzniká nová alela, která doposud v populaci nebyla - každá alela vznikne pouze jednou a pak už se nemění. **Není možno** určit podobnost (similarity) alel



- **SMM – stepwise mutation model**
(Mutace způsobeny pouze ztrátou nebo získáním jediného opakování motivu. Mutací může vzniknout alela, která je již v populaci přítomna – tzv. **homoplázie**. Je možno odhadnout podobnost alel.



Indels

- inzerce nebo delece 1bp či delších úseků – použití pouze pro modely vyžadující „**identity**“ (nepoužitelné pro modely vyžadující „**similarity**“)

TTCAGG CACACACA TCTCTAGCTTCGA

27 bp SMM model – možno kvantifikovat podobnost alel

TTCAGG CACACACA CA TCTCTAGCTTCGA

27 → 29 bp

TTCAGG CACACACA TCTC G TAGCTTCGA

27 → 28 bp

TTCAGG CACAC GACA TCTCTAGCTTCGA

27 → 28 bp

TTCAGG CACACCA TCTCTAGCTTCGA

27 → 26 bp

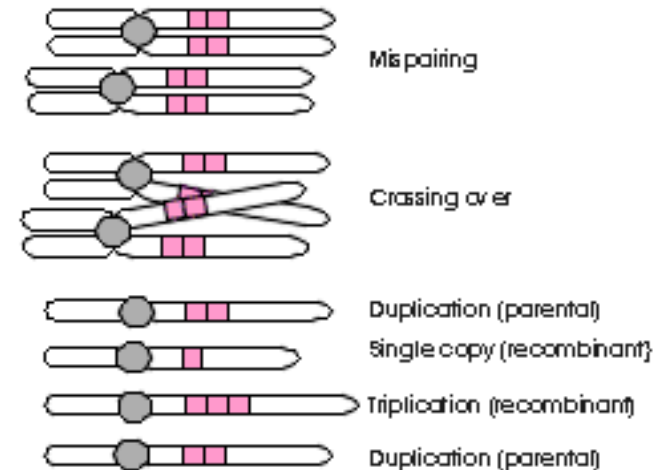
TTCAGG CACACACA TCTCTAGTTCGA

27 → 26 bp

„Indels“ – pouze pro analýzy, kde je vyžadována „identity“ a nikoliv podobnost

Proč je tolik alel? (microsatellite instability)

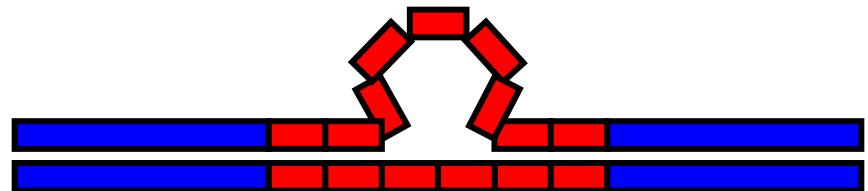
- **Nerovnoměrný (Unequal) crossing-over**
(díky špatnému alignmentu)



- **Sklouznutí polymerázy při replikaci**

Slip-strand mispairing

(při replikaci nejprve polymeráza sklouzne a vyrobí odlišný počet opakujícího se motivu mikrosatelitu, při alignmentu je pak část opakování vykloněna mimo dvoušroubovici, flanking regions tedy párují)



Bias (skutečná data)

- **Kratší mikrosatelity** (s malým počtem opakování motivu) **mají zřejmě tendenci se spíše prodlužovat** (slabě převládají adice nad delecemi)
- **Delší mikrosatelity se spíše zkracují** (náchylnější k velkým delecím)
- **Delší mikrosatelity rychleji mutují** (díky více opakováním je vyšší pravděpodobnost pro sklouznutí polymerázy (SSM) – mají více alel)

Mikrosatelity - závěry

- Mechanismy evoluce mikrosatelitů stále nepříliš objasněny
- Stepwise mutation model SMM platí jen omezeně
- = nevýhoda v populační genetice (jsou rychle nahrazovány jinými markery, např. SNPs)
- = tolik nevádí při identifikaci jedinců a analýzy příbuznosti (paternity)

SINE, LINE, etc.

(Shedlock et al. 2004, TREE; Ray et al. 2007, MolEcol)

- **Transposable elements**
- Vytváří kopie (většinou)
- Kopie integrovány na nová místa v genomu
- Obvykle nejsou specificky odstraňovány
- Molekulární fosílie – neexistují homoplasie !!!
- Nesmírně početné
- Člověk – víc jak polovina genomu (ost. druhy – 40-90%)

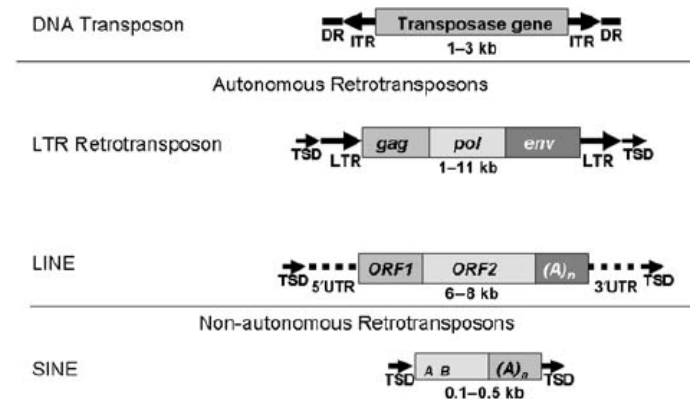


*Objev DNA transpozonů u kukuřice:
Barbara McClintock*

Typy transposabilních elementů

- **Kódující své proteiny, autonomní, 1-10 kb**

- **DNA transposony** (cut-and-paste)
- transposasa
- **Retrotransposony** (copy-and-paste)
- **LINE**
1-2 proteiny, kopie přes RNA
- **LTR retrotransposony**
5-6 proteinů, také přes RNA

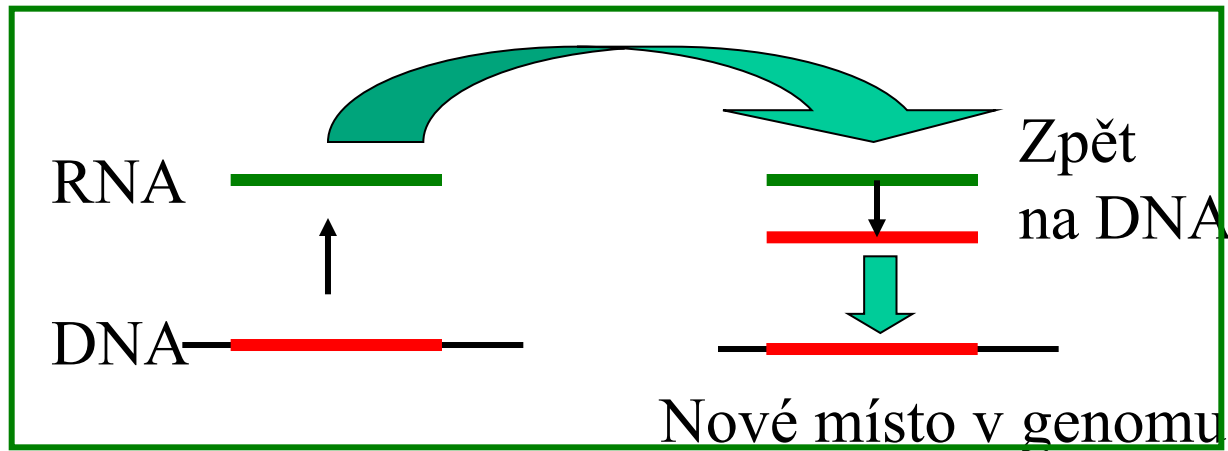


- **Nekódují proteiny, neautonomní, 100-1000 bp**

paraziti předešlých, např. **SINE** (člověk *Alu* – více než 1 milion kopií) – nejčastěji používané v populačních a fylogenetických studiích

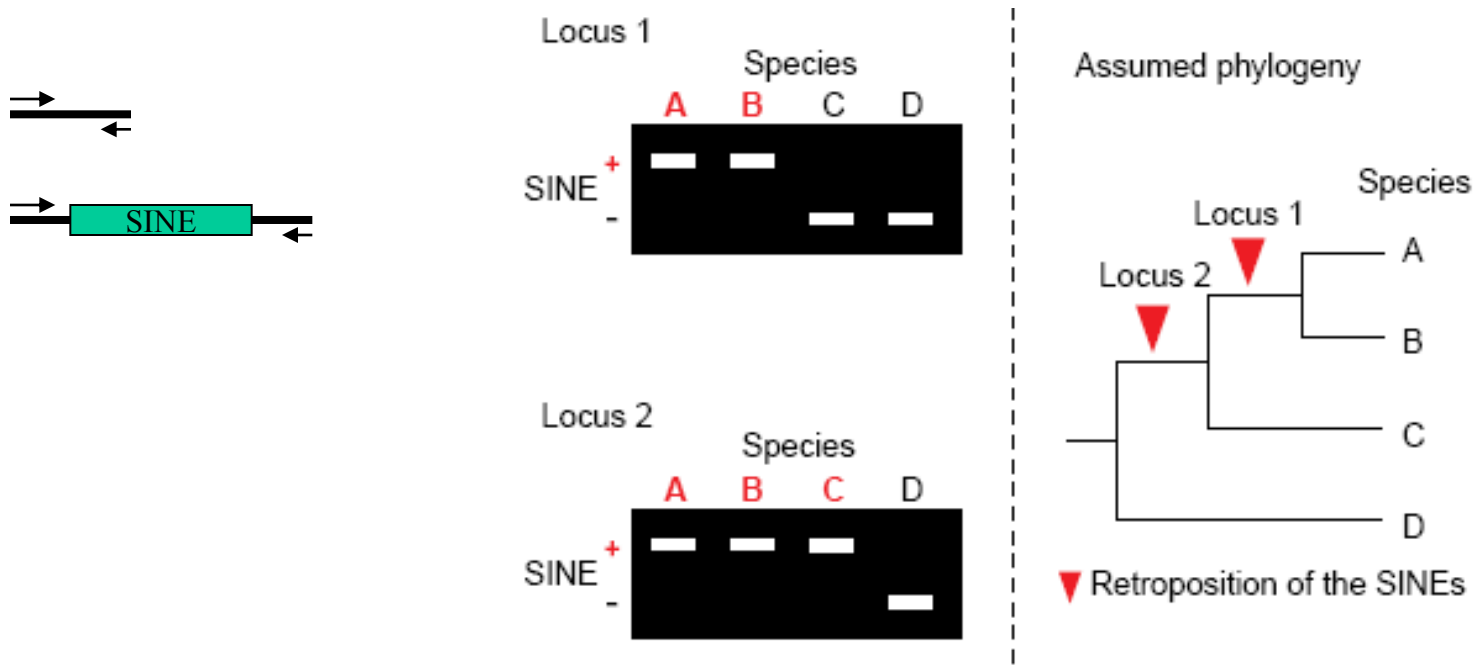
LINE - mechanismus transpozice

- Kopie přes RNA
- Reversní transkriptáza
- Mašinerii využívají **SINE** (jsou to „paraziti“),
Alu (SINE) a *L1* (LINE) se stejně rychle množí



- **LTR retrotransposony – opět přes RNA, složitější proces**

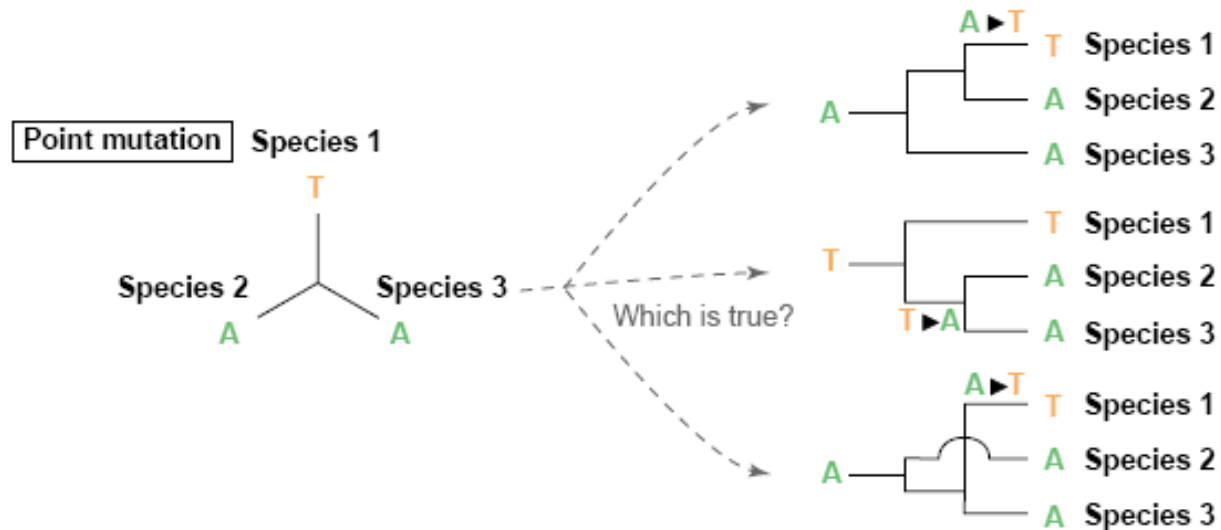
Velmi nízké riziko homoplázií → SINE = ideální fylogenetické markery



„single-locus marker“

- PCR amplifikace daného úseku a elektroforéza

Neexistují zpětné mutace = výhoda oproti sekvenačním datům



Příklad aplikace: kytovci vs. sudokopytníci (hroch je bratr velryby)