České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra telekomunikační techniky

Moderní blokové šifry II

Ing. Tomáš Vaněk, Ph.D. tomas.vanek@fel.cvut.cz

Náplň prezentace

- volba AES
  - MARS (nepovinné – nebude zkoušeno)
  - RC6 (nepovinné – nebude zkoušeno)
  - Serpent (nepovinné – nebude zkoušeno)
  - Blowfish (nepovinné – nebude zkoušeno)
  - Rijndael
- srovnání finalistů

AES

- volba nového algoritmu AES (konec 90. let)
- nástupce DESu
- NIST vyhlásil 2.1.1997 plně veřejnou a otevřenou soutěž s cílem najít silnou šifra pro vládní i komerční použití

Základní požadavky:

- bloková symetrická šifra
- otevřený algoritmus, nechráněný patenty
- bezpečnost algoritmu je důležitější než jeho rychlost

- soutěž trvala čtyři roky

AES – hodnotící kritéria

Bezpečnost	Cena	Algoritmické & implementační charakteristiky
• Skutečná bezpečnost ve srovnání s ostatními soutěžícími algoritmy • Kvalita výstupního ŠT - výstup musí být nerozeznatelný od náhodné permutace stejného vstupního bloku • Bezpečnost algoritmu musí být podložena solidními matematickými základy • Jiné bezpečnostní otázky vzešlé od (odborné) veřejnosti, včetně praktické demonstrace odolnosti vůči kryptoanalytickým útokům	• Licenční požadavky – celosvětově dostupný, neexklusivní licence, poskytovaný zdarma (royalty-free basis) • Licenční požadavky se musí týkat jak HW, tak SW implementace; rychlost algoritmů pod vybranými platformami • Pamětové požadavky – týká se jak HW tak SW implementace; roli hraje např. počet hradel, velikost kódu, požadavky na RAM	• Flexibilita – schopnost pracovat s delšími klíči bloky dat (klíče v rozsahu 128-256bitů po 32bitových krocích, bloky dat po 64 bitech) • Schopnost bezpečné a efektivní implementace v širokém spektru prostředí a aplikací (8bitové procesory, bankomaty, sítě, hlasová a satelitní komunikace, HDTV) • Možnost implementace AES jako proudové šifry, generátoru MAC, generátoru PRN, … • HW a SW přiměřenost • Jednoduchost návrhu

AES - průběh výběrového řízení 1997-2001

červen 1998

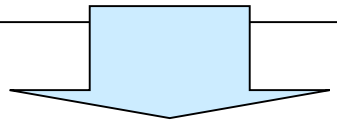
15 kandidátů

USA, Kanada, Belgie, Francie, Německo, Norsko, Velká Británie, Izrael, Jižní Korea, Japonsko, Austrálie a Kostarika

1. Kolo

Bezpečnost
SW efektivita
Flexibilita

červen 1999

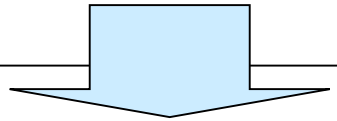


5 finalistů

2. kolo

Mars, RC6, Rijndael, Serpent, Twofish

Bezpečnost
HW efektivita



říjen 2000

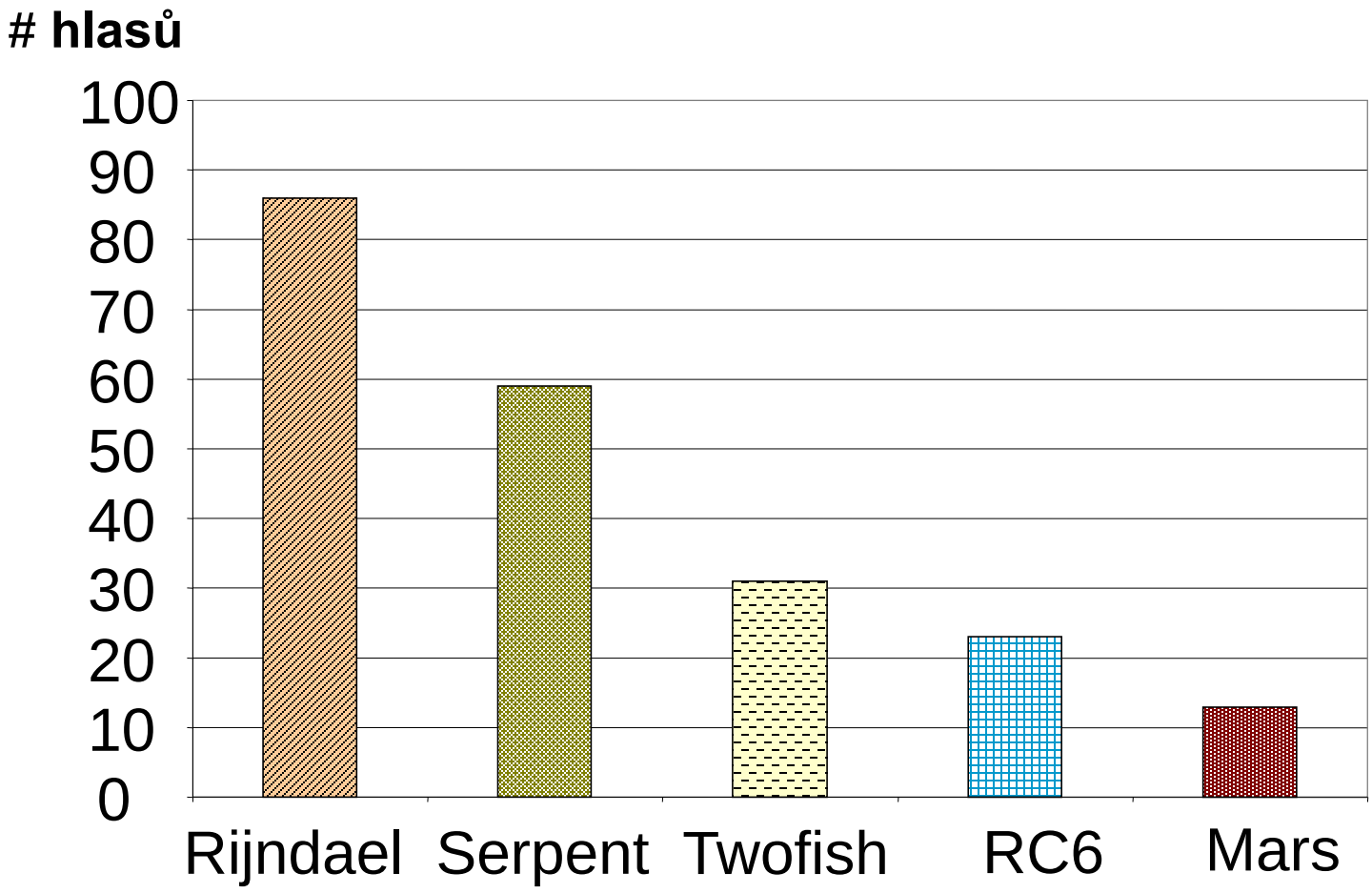
1 vítěz: Rijndael - Belgie

Kandidáti na AES

- CAST-256
- CRYPTON
- DEAL
- DFC
- E2
- FROG
- HPC
- LOKI97
- MAGENTA
- MARS
- RC6
- Rijndael
- SAFER+
- Serpent
- Twofish

	No Response	YES (1)	? (2)	NO (3)	YES - NO	RANK
Rijndael	7	77	19	1	76	1
RC6	4	79	15	6	73	2
Twofish	9	64	28	3	61	3
MARS	5	58	35	6	52	4
Serpent	6	52	39	7	45	5
E2	11	27	53	13	14	6
CAST-256	12	16	58	18	-2	7
SAFER+	13	20	47	24	-4	8
DFC	12	22	43	27	-5	9
Crypton	14	16	43	31	-15	10
DEAL	10	1	22	71	-70	11
HPC	12	1	13	78	-77	12
MAGENTA	9	1	10	84	-83	13
Frog	11	1	6	86	-85	14 (t)
LOKI97	10	1	7	86	-85	14 (t)

Výsledky průzkumu 167 účastníků 3rdAES Conference, Duben 2000



Obecné charakteristiky finalistů

- všech 5 šifer jsou iterované blokové šifry
- všech 5 finalistů používá whiteningu (bělení)
  - promíchání klíče a vstupních/výstupních dat
- 4 finalisté (kromě RC6) používají S-boxy (nelineární substituční funkce)
- 3 finalisté (MARS, Twofish, RC6) používají Feistelovo schéma
- 2 finalisté (Rijndael, Serpent) používají substitučně-permutační sítě (zpracovávají paralelně vstupní blok sérií substitucí a lineárních transformací)

MARS

Autor: IBM

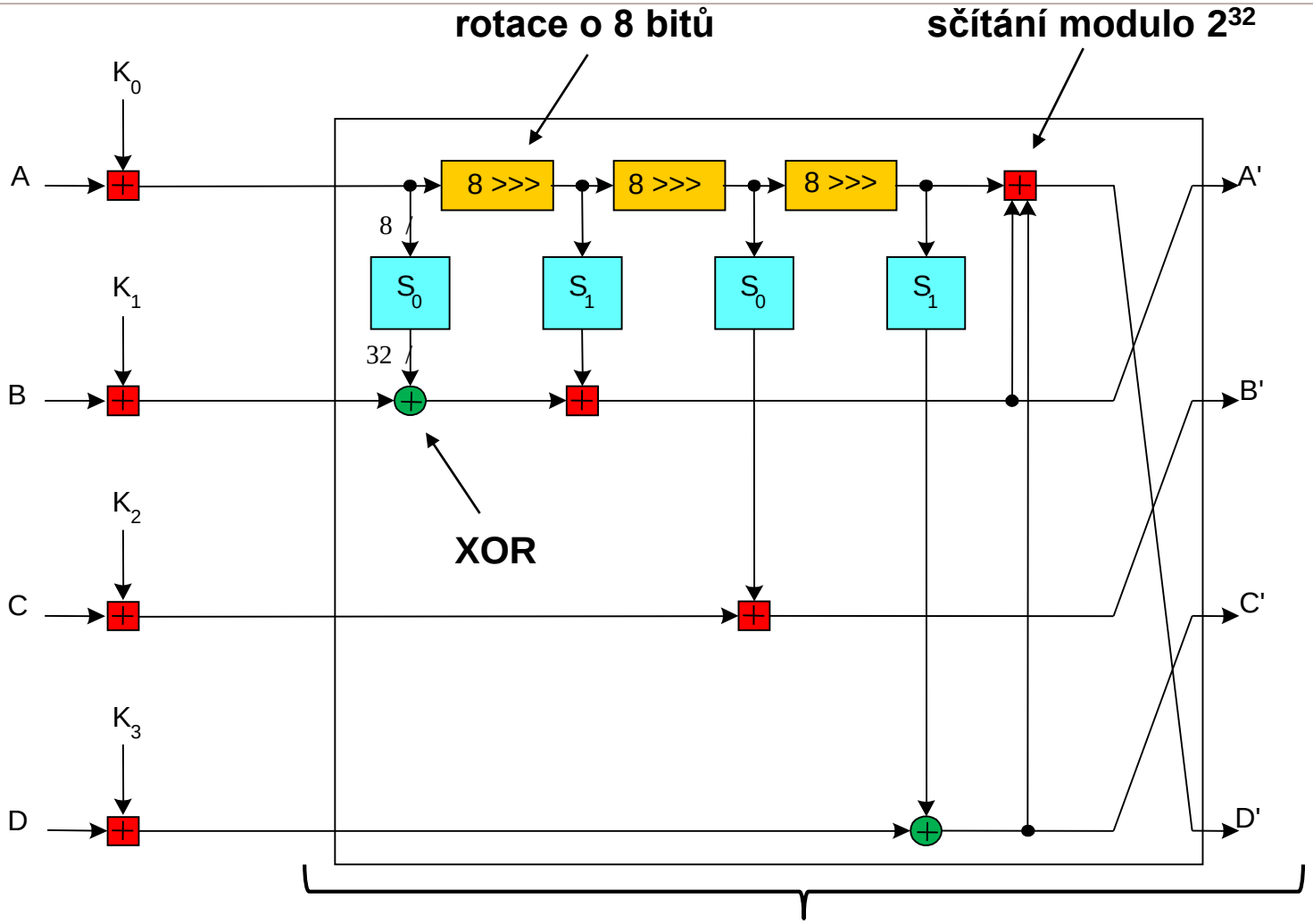
- 5. místo při volbě AES
- velikost bloku 128 bitů
- klíče 128, 192 nebo 256 bitů (dle požadavků NIST)
- obecně podporuje klíče 128 - 448 bitů dlouhé
- využívá rozšířené Feistelovo schéma typu 3
- velmi složitý návrh
  - 16 šifrovacích rund s klíči
  - 16 mixovacích rund bez klíčů

MARS

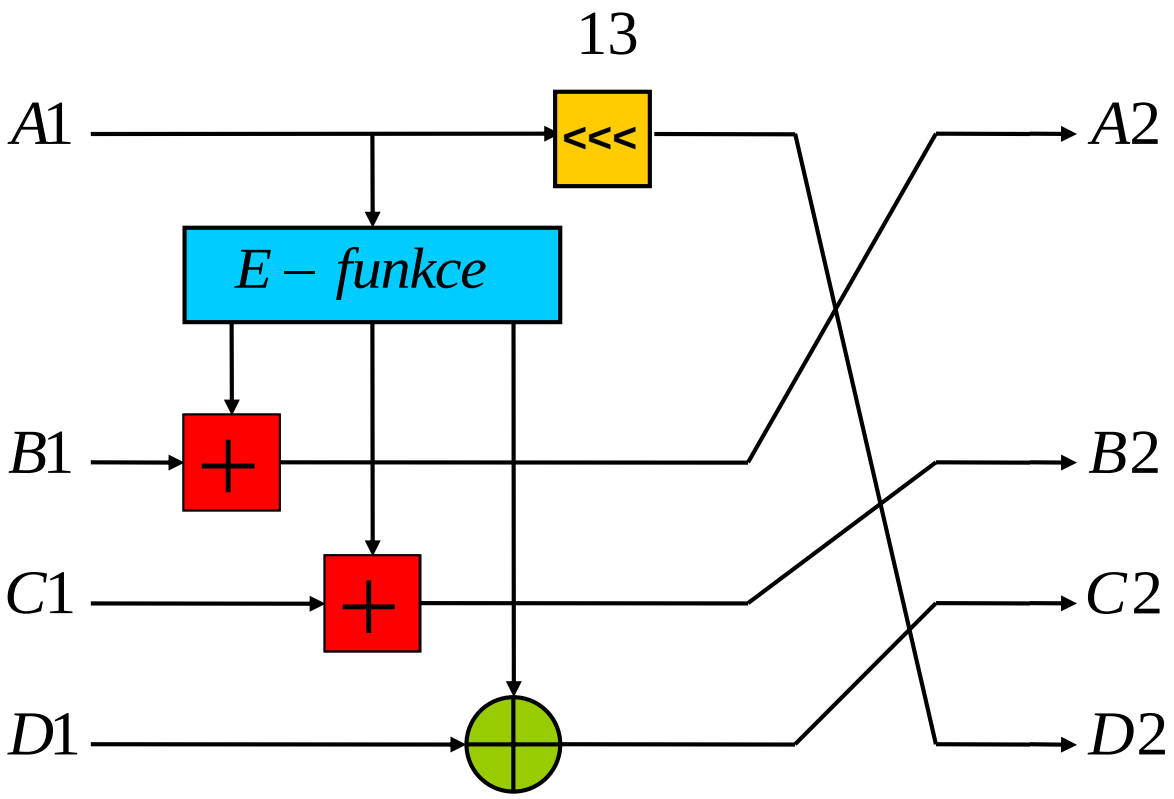
- rundy bez klíčů
  - dva S-boxy
    - každý obsahuje 256 32bitových slov
    - odolné vůči lineární a diferenciální kryptoanalýze
  - sčítání mod 2^{32}
  - XOR
- rundy s klíči
  - násobení v aritmetice mod 2^{32}
  - sčítání v aritmetice mod 2^{32}
  - pevné rotace
  - datově závislé rotace
  - S-box obsahující 512 32bitových slov vzniklý sloučením dvou menších S-boxů (každý s 256 32bitovými slovy)
  - přičítání rundového klíče pomocí XOR

MARS – celkový náhled

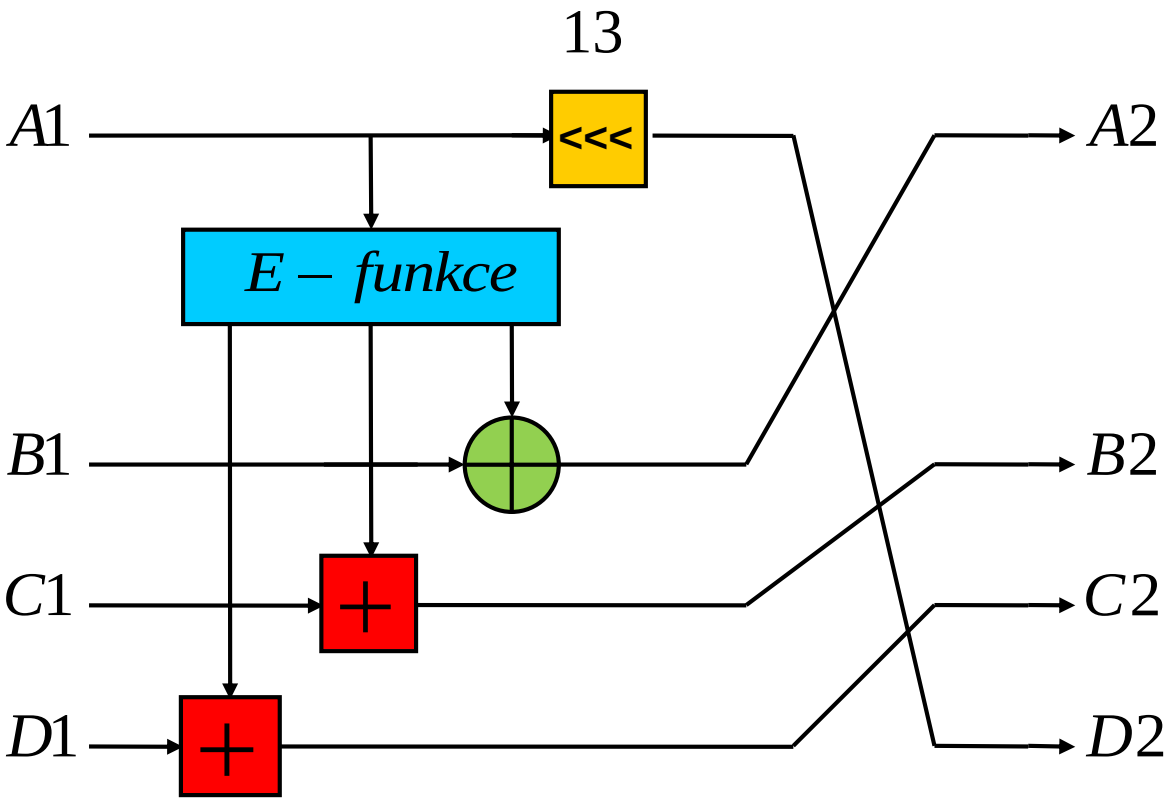
MARS – dopředné mixování



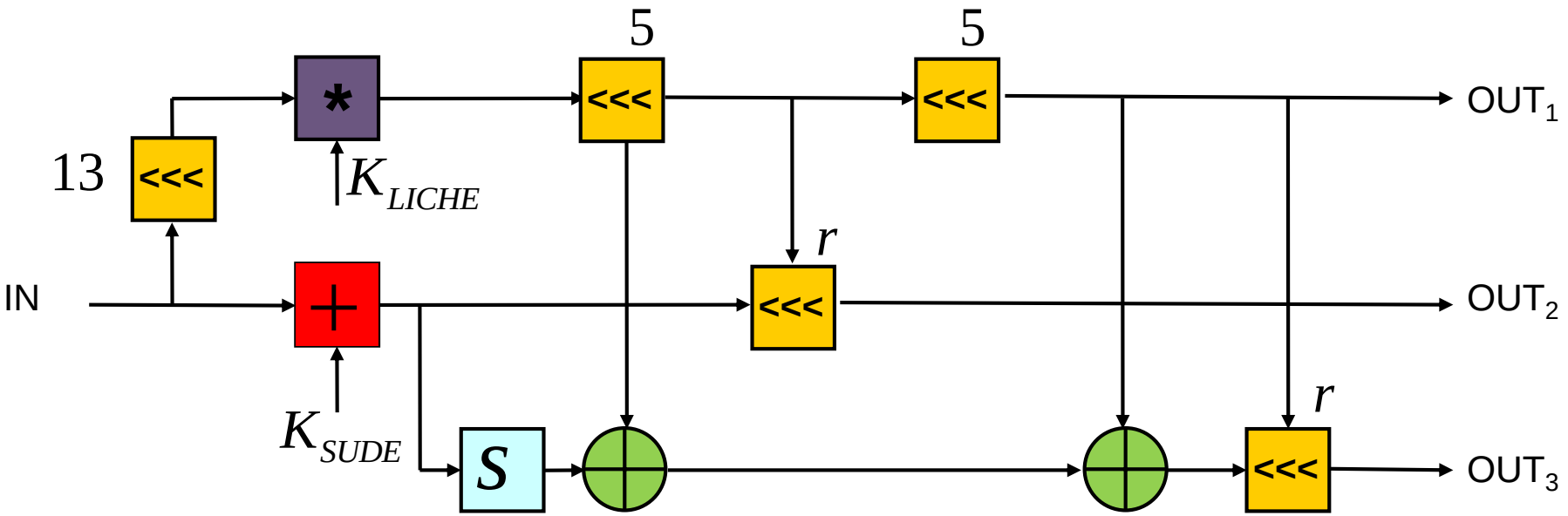
MARS – dopředné šifrování



MARS – zpětné šifrování

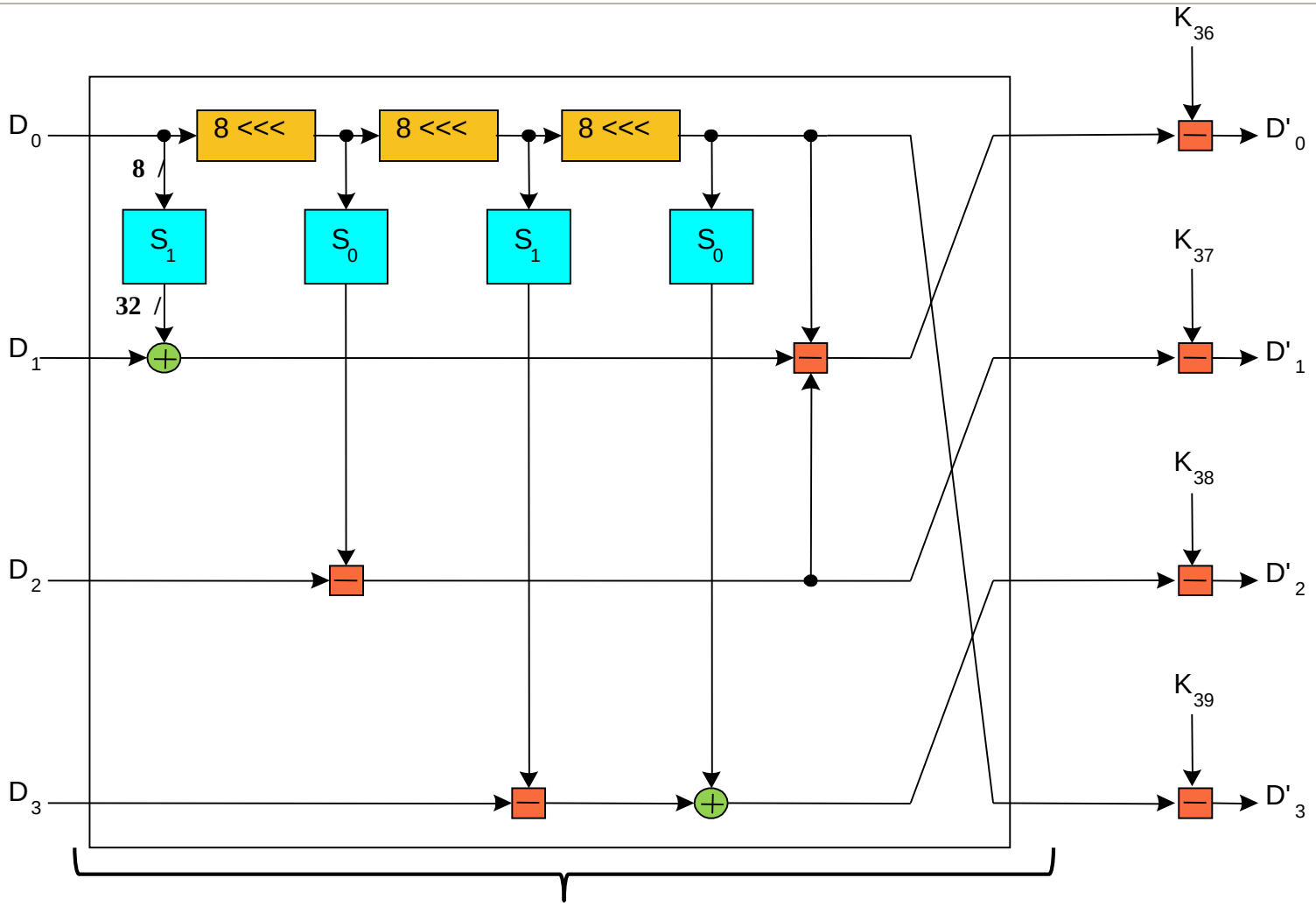


MARS – struktura expanzní E-funkce



- násobení mod 2^{32}
- sčítání mod 2^{32}
- rotace vlevo o 5 a 13 bitů
- rotace vlevo o *r* bitů (r dáno hodnotou pěti posledních bitů)

MARS – zpětné mixování



8x

MARS S-box

- S-box – pole 512 32bitových čísel
  - někdy se chová jako dva samostatné S-boxy - S_0 S_1
- S-box neobsahuje položku S[i]=(000…0) ani S[i]=(111…1)
- v podboxech S_0 a S_1 se každé dvě položky liší minimálně ve třech ze čtyřech bajtů
- libovolné dvě položky se liší minimálně ve 4 bitech
- Počáteční naplnění $S[5i+j]=SHA\text{-}1(5i,c_1,c_2,c_3)_j$
  - i=0…102 , j=0…4
  - $SHA()_j$ j-té slovo z výstupu SHA-1
  - c_1,c_2,c_3 - desetinný čísla rozvoj čísel π,ε
- v S-boxu neexistuje dvojice S[i],S[j] (i≠j) taková, že:
  - S[i]= S[j]
  - S[i]= ⌐S[j]
  - S[i]= -S[j]

MARS

- dešifrování probíhá zcela stejně jako šifrování (šifra F. typu)

Bezpečnost

- MARS jediný používá dvě nelineární funkce (S-boxy a datově závislé rotace)
- tento fakt spolu s heterogenní strukturou (16 šifrovacích rund a 16 mixovacích rund) zajišťuje větší složitost šifry než u zbývajících kandidátů
- toto je ale zároveň i nevýhoda MARSu
- nejlepší známý útok na MARS předvedl B. Schneier v roce 2000 kdy se mu pomocí útoku se známým OT podařilo prolomit oslabený MARS (pouze 21 z 32 rund z čehož 16 bylo mixovacích (=výrazně jednodušších))

RC6 - 32/20/16

Autor: RSA Laboratories , jeden ze spoluautorů R.Rivest

- 4. místo
- RC6 má několik volitelných parametrů:
  w - počet bitů slova
  r - počet rund
  b - počet bajtů klíče,

proto se podle nich přesně označuje jako RC6-w/r/b.

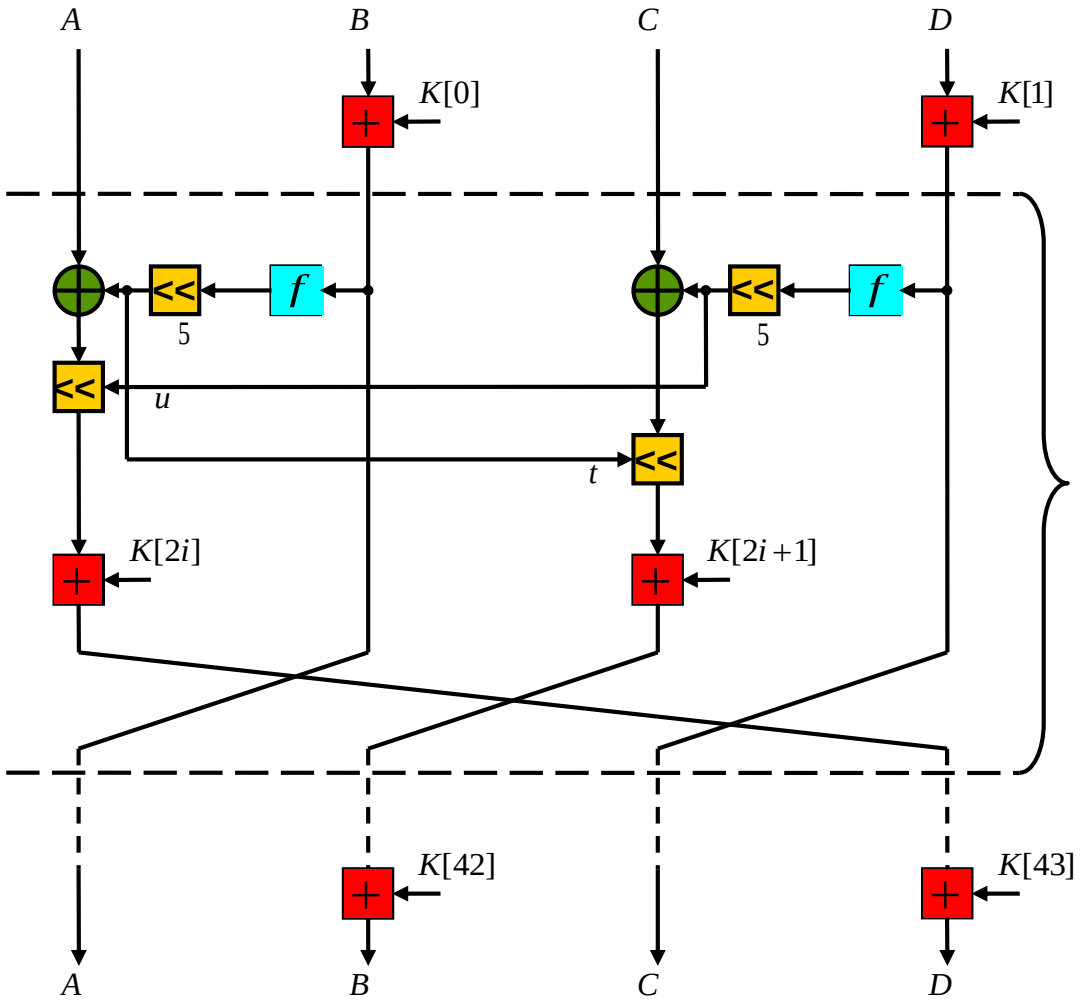
- pro kandidaturu na AES bylo stanoveno
  w = 32b
  r = 20
  b =16B, 24B nebo 32B ,

neboli blok 128 bitů a klíč 128,192 nebo 256 bitů

RC6

- vychází ze starší šifry RC5
  - RC6 = 2 paralelně propojené šifry RC5
- šifra Feistelova typu
- vstup/výstup: 4x32 bitů
- v každé rundě:
  - sčítání mod 2^{32}
  - násobení 2^{32}
    - tato operace není v RC5, zajistí, že rotace bude záviset na každém bitu slova *B* resp. *D* - viz následující slide
  - XOR
  - přičítání klíčů
- nepoužívá S-boxy, ale datově závislé rotace
- existují útoky na zjednodušené verze (15 rund)
- pro deklarovaný počet rund 20 je bezpečný

RC6



$K[x]$ rundový podklíč

$f(x) = x \cdot (2x+1) \bmod 2^{32}$

RC6

Bezpečnost

- bez ohledu na jednoduchost designu je RC přiměřeně odolná známým útokům
- není znám žádný útok na 20 rundovou variantu, přestože pro některé autory je počet rund nedostatečný
- pomocí lineární a diferenciální krypotanalýzy je možné prolomit 12 rundovou verzi
- statistické útoky založené na vybraných dvojicích OT-ŠT (choosen plain-ciphertext) prokázaly zranitelnost až do 13 rund

Twofish

Autoři: Bruce Schneier, John Kelsey, Doug Whiting
David Wagner, Chris Hall, Niels Ferguson

- 3. místo
- klasické Feistelovo schéma (jako DES)
- 16 rund
- klíč délky 128 až 256 bitů
- operace podobné jako v Rijndaelu
  - násobení v konečném poli F_2^8
  - sčítání mod 2^{32}
  - XOR
  - klíčově závislé S-boxy

Twofish

- vysoká roveň bezpečnosti, ale velmi složitý návrh
- podobně jako u Rijndaelu výkon klesá s délkou klíče

Operace v rundě

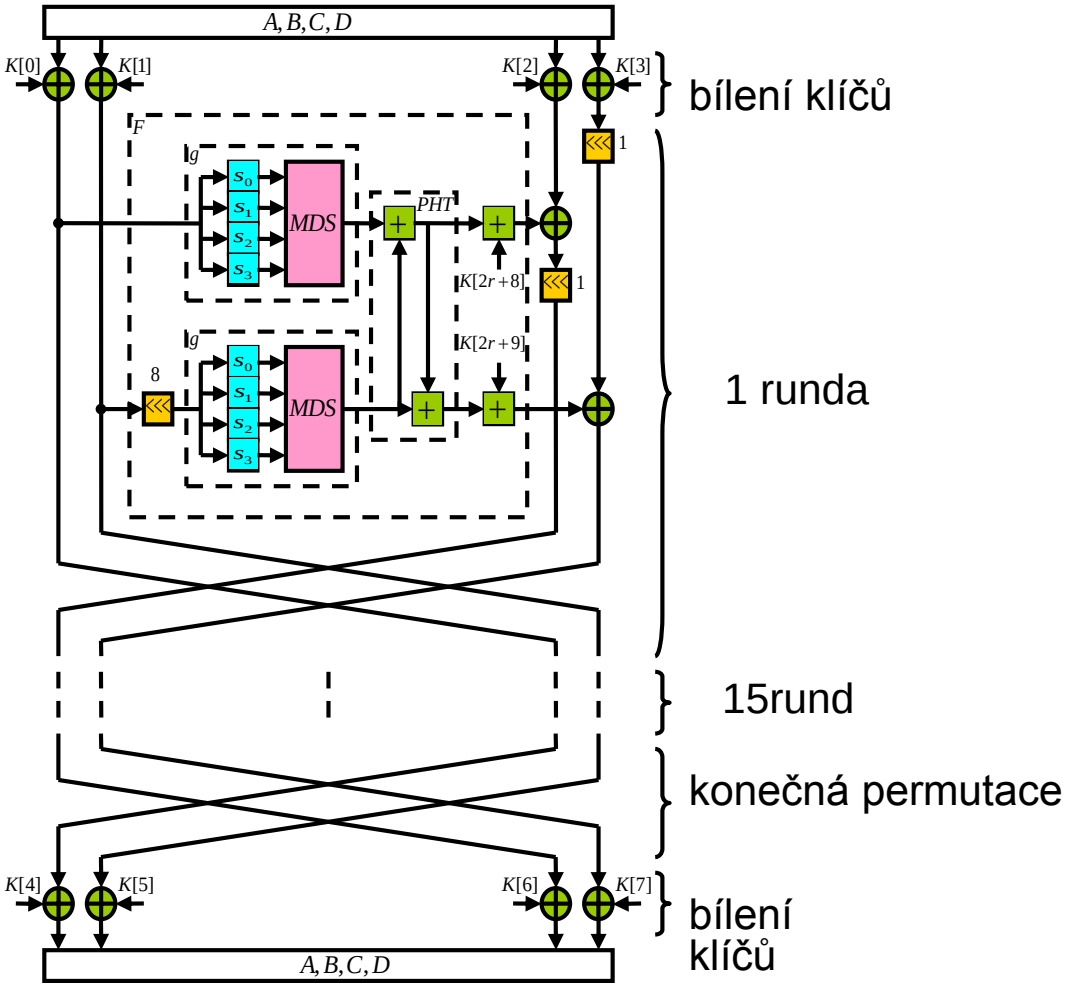
- 4 klíčově závislé S-boxy
- bitové rotace
- PHT - Pseudo-Hadamardova transformace
  - jednoduché míchání dvou vstupů, podle vzorce:
  - realizuje difúzi

$$a' = a + b \bmod 2^{32}$$

$$b' = a + 2b \bmod 2^{32}$$

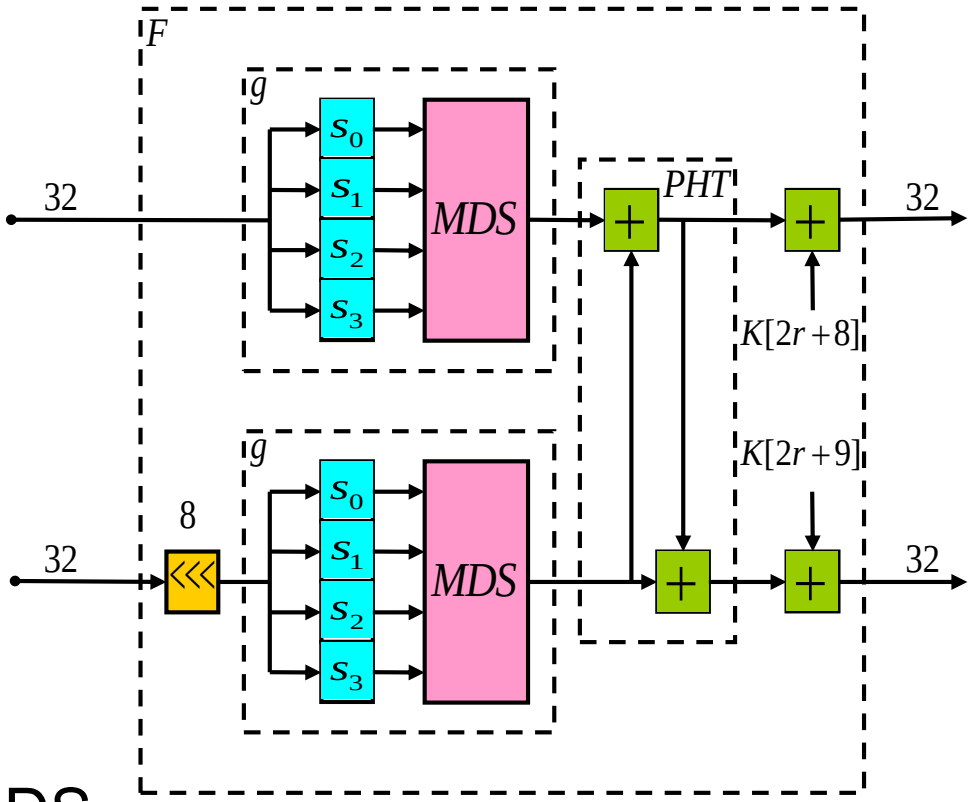
- polovina klíče je použita na šifrování a polovina modifikuje algoritmus (S-boxy)

Twofish


A, B, C, D
K[0]
K[1]
K[2]
K[3]
bílení klíčů
F
g
MDS
PHT
K[2r+8]
K[2r+9]
1
8
1 runda
15rund
konečná permutace
K[4]
K[5]
K[6]
K[7]
bílení klíčů
A, B, C, D

Twofish – operace v rundě

- z hlediska bezpečnosti je nejdůležitější funkce *g*
- vstupní 32bitové slovo je rozděleno na čtyři části
- každá čtvrtina vstupuje do jedné skupiny S-boxů
- každý S-box má 8 bitový vstup a výstup
- čtyři výstupy z S-boxů jsou chápány jako vektor v F_2^8 , který je vynásoben maticí MDS
- následuje přičtení rundových klíčů
- výsledek je interpretován jako 32bitové slovo



Serpent

Autoři: Ross Anderson
Eli Biham („objevitel“ diferenciální krypotanalýzy)
Lars Knudsen

- 2.místo
- navržen pro co nejvyšší bezpečnost
- odolný vůči všem dnes známým útokům
- 32 rund (velmi bezpečná, ale pomalá)
- není to šifra Feistelova typu
- substitučně-lineární transformační síť
  - jako Rijndael
- délka bloku 128 bitů (vstup/výstup 4x32 bitů)
- klíč může mát **libovolnou** délku do 256 bitů

Serpent

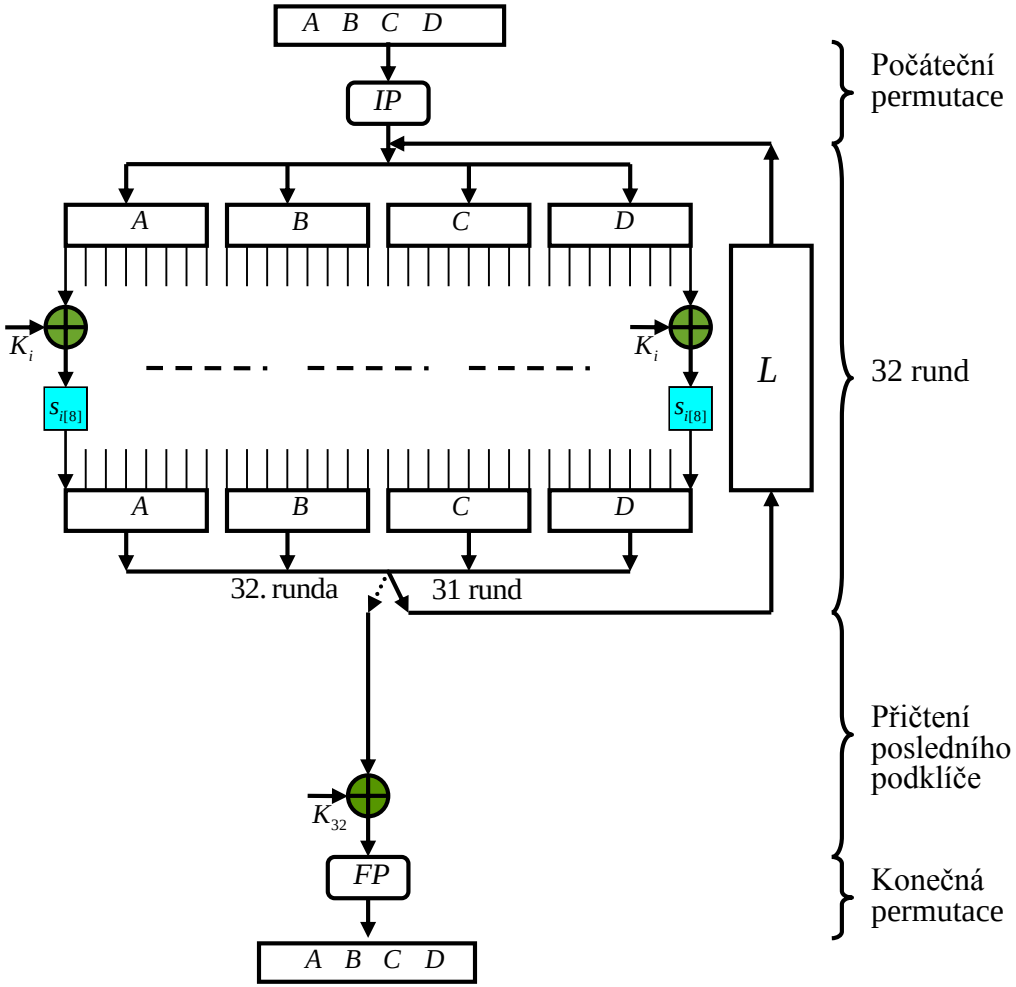
- velmi konzervativní návrh
- nepoužívá
  - datově závislé rotace, ani
  - násobení mod n, ani
  - sčítání mod n
- používá „tradiční“ operace
  - XOR
  - S-boxy
- vhodné pro čipové karty
- z počátečního klíče se spočítá 33 rundových klíčů
- pokud je klíč $k < 256$b, je doplněn jednou „1“ a více „0“ na celkovou délku 256b

Serpent - šifrování

- počáteční permutace (mění pořadí bitů v bloku)
- 32 rund, každá obsahuje :
  - xor s rundovým klíčem
  - průchod S-boxem
  - lineární transformace
- konečná permutace, která je inverzí k počáteční

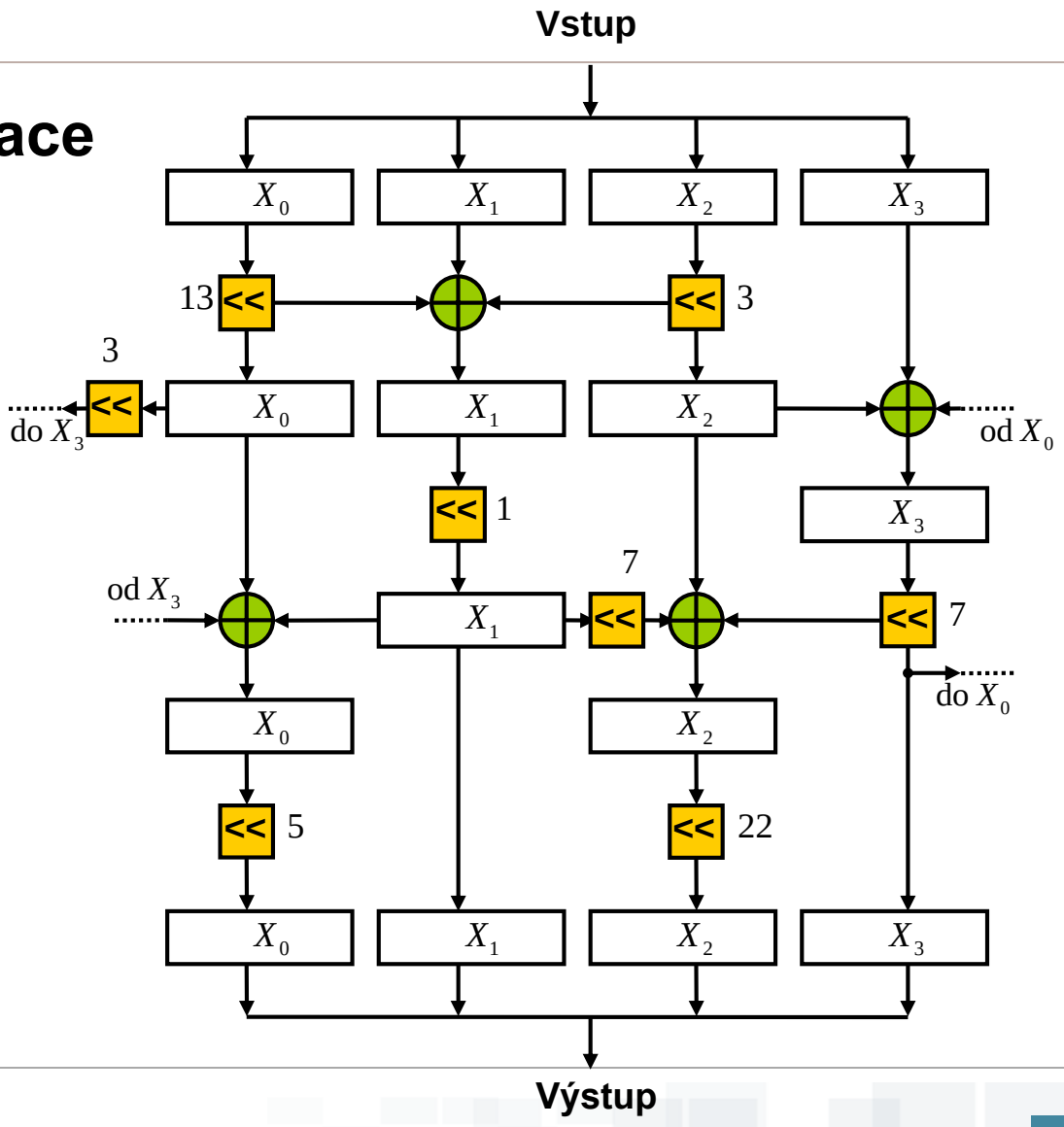
První a poslední krok nemají žádný význam z kryptografického hlediska. Slouží pouze k optimalizaci dat a zvyšují efektivitu výpočtů.

Serpent


A B C D
IP
A
B
C
D
K_i
K_i
$s_{i[8]}$
$s_{i[8]}$
L
A
B
C
D
32. runda
31 rund
K_{32}
FP
A B C D
Počáteční permutace
32 rund
Přičtení posledního podklíče
Konečná permutace

Serpent – blok L

Lineární transformace



Serpent

Bezpečnost

- Již s 16 rundami je Serpent dostatečně odolný proti všem dnes známým útokům.
- Zvýšení počtu rund na 32 dále zvětšuje celkovou bezpečnost šifry.
- Pomocí diferenciální kryptoanalýzy a útoků se znalostí vybraných OT se povedlo prolomit Serpent s 6 rundami.

Rijndael (AES)

Autoři: Vincent **Rij**men a Joan **Dae**men

- Belgie
- iterovaná bloková šifra (stejně jako DES)
- není šifra Feistelova typu (na rozdíl od DESu)
- substitučně-permutační síť
- veškeré matematické operace v AESu se odehrávají v konečném poli F_2^8 s nerozložitelným polynomem

$$F(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x + 1$$

Příklad: $\{53\} \bullet \{CA\} = \{01\}$ v poli F_2^8, protože

$(x^6 + x^4 + x + 1)(x^7 + x^6 + x^3 + x) =$

$x^{13} + x^{12} + x^9 + x^7 + x^{11} + x^{10} + x^7 + x^5 + x^8 + x^7 + x^4 + x^2 + x^7 + x^6 + x^3 + x =$

$x^{13} + x^{12} + x^{11} + x^{10} + x^9 + x^8 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + x$

a $x^{13}+x^{12}+x^{11}+x^{10}+x^9+x^8+x^6+x^5+x^4+x^3+x^2+x \bmod x^8+x^4+x^3+x+1 = 1$

Protože výsledkem násobení $\{53\}$ a $\{CA\}$ je 1,
$\{53\}$ je multiplikativní inverze $\{CA\}$.

Rijndael (AES) v číslech

- **Délka bloku:** **128***, 192 nebo 256 bitů
- **Délka klíče:** **128***, **192** nebo **256** bitů
  - nezávisle na délce bloku
- 10 až 14 rund (v závislosti na délce klíče a bloku)
- v každé** rundě se provádějí čtyři operace:
  - SubByte (nelineární operace)
  - ShiftRow (lineární operace)
  - MixColumns (nelineární operace)
  - AddRoundKey (lineární operace)

Nr	N_b=4	N_b=6	N_b=8
N_k=4	10	12	14
N_k=6	12	12	14
N_k=8	14	14	14

***v AES standardu**

****** **kromě poslední**

AES v číslech

- všechny operace v AES se provádějí na 2-D poli označovaném jako Stav (State)
- pole má vždy 4 řádky a 4 reps.6 resp. 8 sloupců
- počet sloupců závisí na velikosti bloku
- každá buňka pole obsahuje 1 byte dat
- celková velikost stavu je 128/192/256 bitů

$S[r,c]=in[r + 4c]$ pro $0 \le r < 4$ a $0 \le c < N_b$ N_b = délka bloku/32

Vstupní byty

In_0	In_4	In_8	In_{12}
In_1	In_5	In_9	In_{13}
In_2	In_6	In_{10}	In_{14}
In_3	In_7	In_{11}	In_{15}

Pole stavů

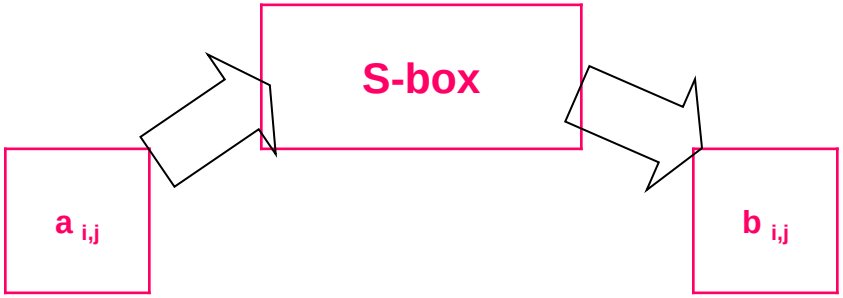
$S_{0,0}$	$S_{0,1}$	$S_{0,2}$	$S_{0,3}$
$S_{1,0}$	$S_{1,1}$	$S_{1,2}$	$S_{1,3}$
$S_{2,0}$	$S_{2,1}$	$S_{2,2}$	$S_{2,3}$
$S_{3,0}$	$S_{3,1}$	$S_{3,2}$	$S_{3,3}$

Výstupní byty

Out_0	Out_4	Out_8	Out_{12}
Out_1	Out_5	Out_9	Out_{13}
Out_2	Out_6	Out_{10}	Out_{14}
Out_3	Out_7	Out_{11}	Out_{15}

Rijndael (AES) – ByteSub

$a_{0,0}$	$a_{0,1}$	$a_{0,2}$	$a_{0,3}$
$a_{1,0}$	$a_{1,1}$	$a_{1,2}$	$a_{1,3}$
$a_{2,0}$	$a_{2,1}$	$a_{2,2}$	$a_{2,3}$
$a_{3,0}$	$a_{3,1}$	$a_{3,2}$	$a_{3,3}$



$b_{0,0}$	$b_{0,1}$	$b_{0,2}$	$b_{0,3}$
$b_{1,0}$	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$
$b_{2,0}$	$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	$b_{2,3}$
$b_{3,0}$	$b_{3,1}$	$b_{3,2}$	$b_{3,3}$

Cíl: vnesení nelinearity do procesu šifrování

ByteSub je nelineární operace ve dvou krocích:

1) na každý byte se v F_2^8 aplikuje multiplikativní inverze

2) na každý byte se aplikuje affiní transformace (nad F_2) ve tvaru

$$8F \bullet a_{i,j} \oplus A6$$

- operace SubByte má v AESu stejný význam jako „S-box“ v DESu
- může být implementován jako tabulka pro každý byte

Rijndael (AES) – ByteSub

Tabulka pro operaci ByteSub.

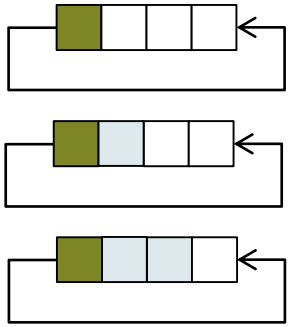
příklad: S_{in}={7b}

		y															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
x	0	63	7c	77	7b	f2	6b	6f	c5	30	01	67	2b	fe	d7	ab	76
	1	ca	82	c9	7d	fa	59	47	f0	ad	d4	a2	af	9c	a4	72	c0
	2	b7	fd	93	26	36	3f	f7	cc	34	a5	e5	f1	71	d8	31	15
	3	04	c7	23	c3	18	96	05	9a	07	12	80	e2	eb	27	b2	75
	4	09	83	2c	1a	1b	6e	5a	a0	52	3b	d6	b3	29	e3	2f	84
	5	53	d1	00	ed	20	fc	b1	5b	6a	cb	be	39	4a	4c	58	cf
	6	d0	ef	aa	fb	43	4d	33	85	45	f9	02	7f	50	3c	9f	a8
	7	51	a3	40	8f	92	9d	38	f5	bc	b6	da	21	10	ff	f3	d2
	8	cd	0c	13	ec	5f	97	44	17	c4	a7	7e	3d	64	5d	19	73
	9	60	81	4f	dc	22	2a	90	88	46	ee	b8	14	de	5e	0b	db
	a	e0	32	3a	0a	49	06	24	5c	c2	d3	ac	62	91	95	e4	79
	b	e7	c8	37	6d	8d	d5	4e	a9	6c	56	f4	ea	65	7a	ae	08
	c	ba	78	25	2e	1c	a6	b4	c6	e8	dd	74	1f	4b	bd	8b	8a
	d	70	3e	b5	66	48	03	f6	0e	61	35	57	b9	86	c1	1d	9e
	e	e1	f8	98	11	69	d9	8e	94	9b	1e	87	e9	ce	55	28	df
	f	8c	a1	89	0d	bf	e6	42	68	41	99	2d	0f	b0	54	bb	16

Rijndael (AES) – ShiftRow

$b_{0,0}$	$b_{0,1}$	$b_{0,2}$	$b_{0,3}$
$b_{1,0}$	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$
$b_{2,0}$	$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	$b_{2,3}$
$b_{3,0}$	$b_{3,1}$	$b_{3,2}$	$b_{3,3}$

žádná rotace



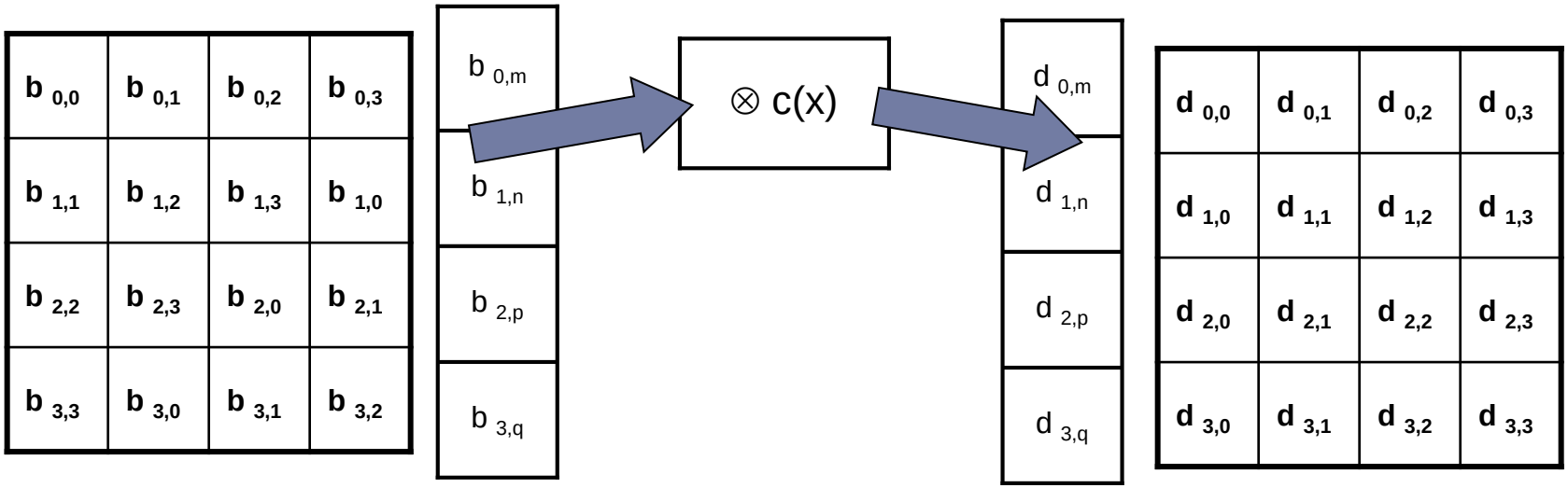
$b_{0,0}$	$b_{0,1}$	$b_{0,2}$	$b_{0,3}$
$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{1,0}$
$b_{2,2}$	$b_{2,3}$	$b_{2,0}$	$b_{2,1}$
$b_{3,3}$	$b_{3,0}$	$b_{3,1}$	$b_{3,2}$

Operace ShiftRow se provádí na jednotlivých řádcích.

Cíl: difúze mezi sloupci

	C_0	C_1	C_2	C_3
$N_b = 4$	0	1	2	3
$N_b = 6$	0	1	2	3
$N_b = 8$	0	1	3	4

AES – MixColumns

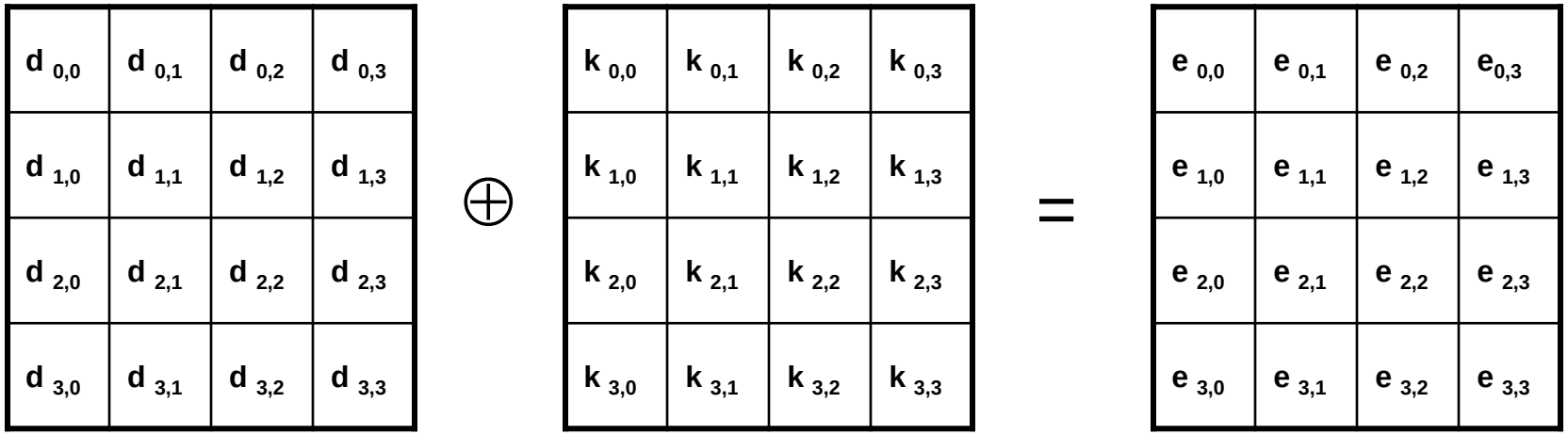


- operace MixColumn pracuje se sloupci
- každý sloupec se uvažuje jako polynom nad F_2^8 a je vynásoben s polynomem $c(x) = \{03\}x^3 + \{01\}x^2 + \{01\}x + \{02\}$ mod x^4+1
- Implementuje se pomocí XOR

Cíl: zajištění difůze mezi jednotlivými byty.
Společně s ShiftRow zajistí tzv. lavinovitý efekt
Koeficienty matice byly zvoleny také s ohledem na možnost efektivní implementace.

$$c(x) = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

AES – AddRoundKey

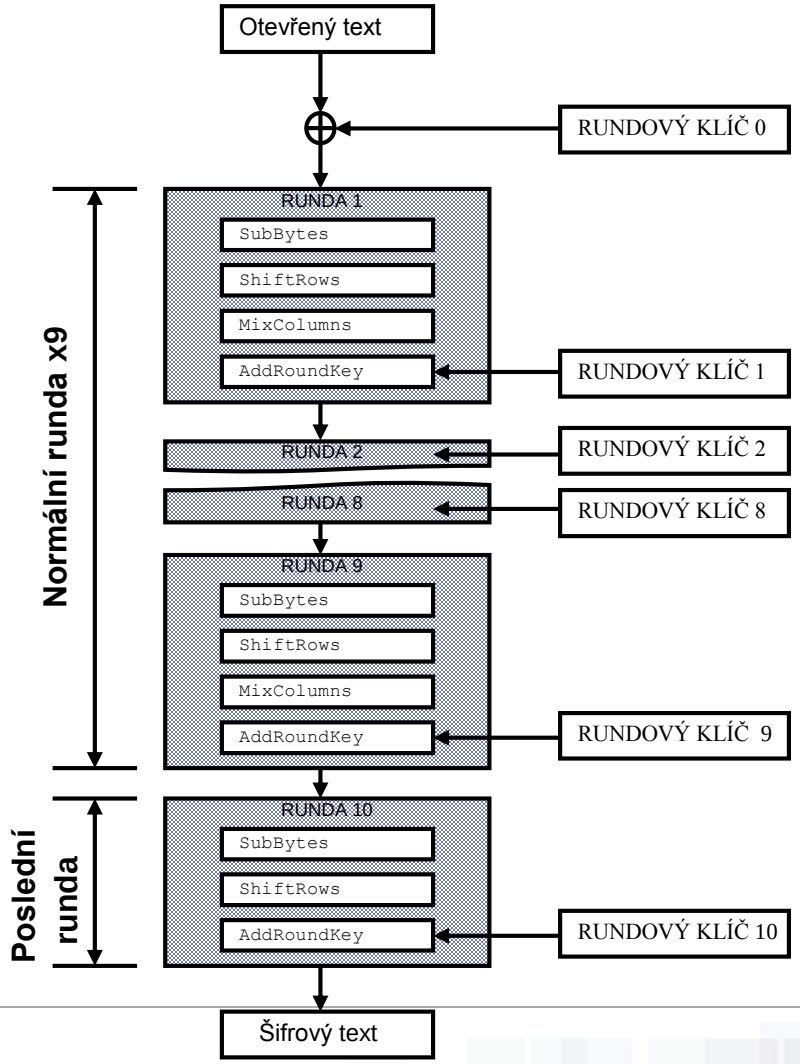


Operace AddRoundKey provádí přičtení rundového klíče ke Stavu.
Klíč rundy je určen pomocí plánovacího algoritmu (key schedule).

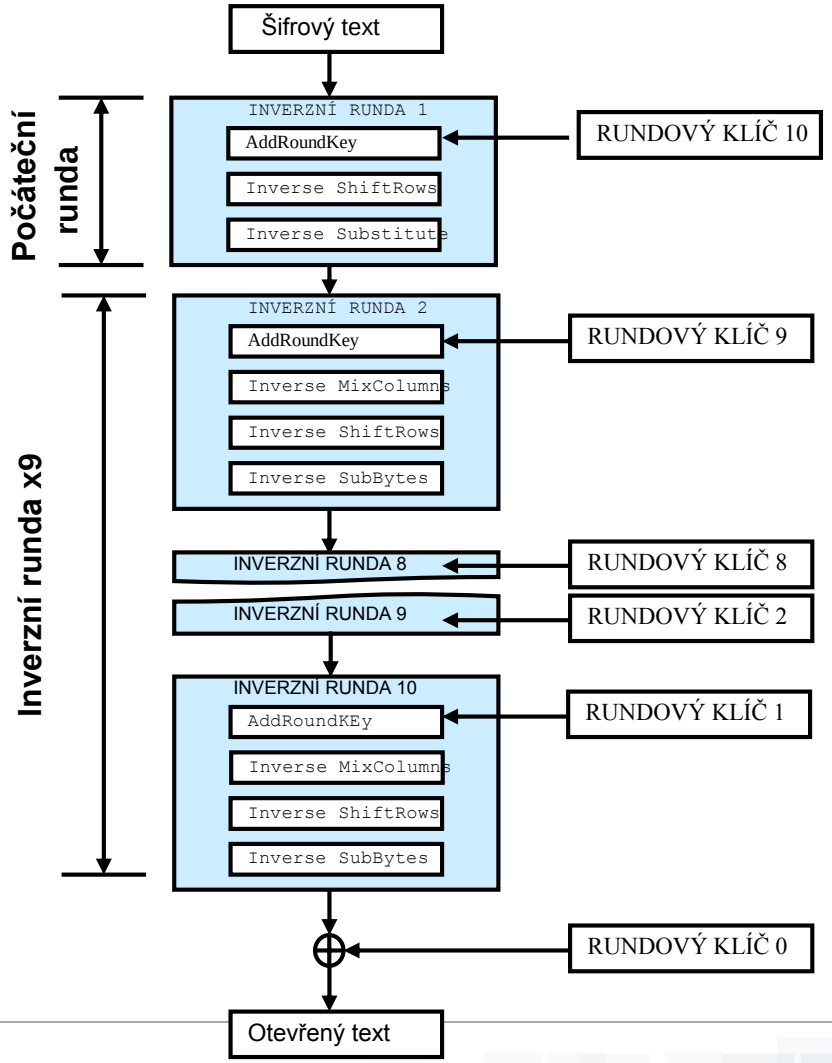
Cíl: operace v rundě musí být klíčově závislé.

XOR OT (nebo ŠT) a klíče se nazývá bílení (whitening) klíče. Je to jednoduchý postup zvyšující bezpečnost. Brání útočníkovi vytvářet odpovídající páry OT-ŠT. U Rijndaelu je realizován před první rundou.

Rijndael (AES) – šifrování

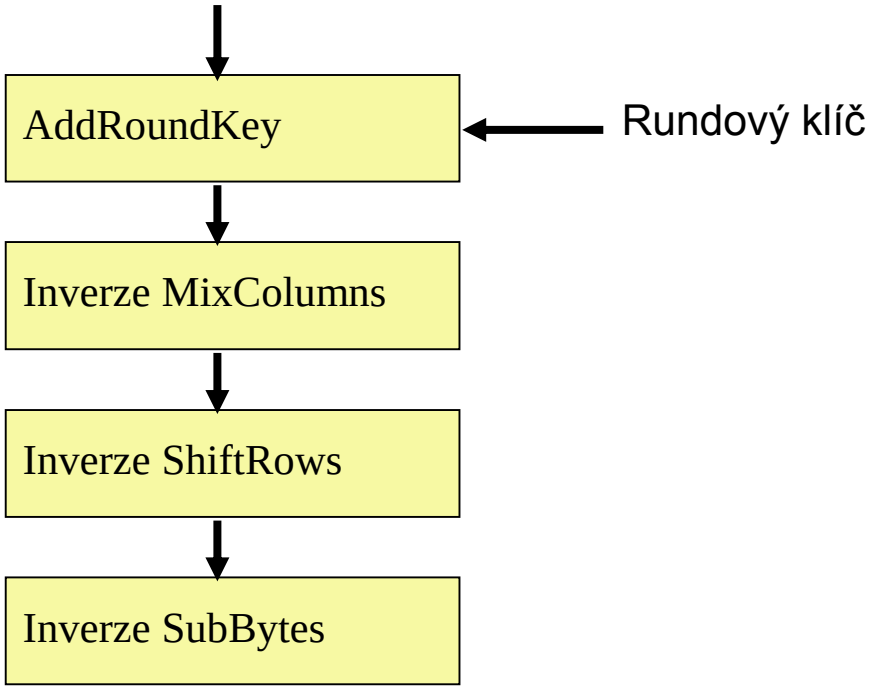


Rijndael (AES) – dešifrování



Rijndael (AES) – dešifrování

Při dešifrování probíhají inverze jednotlivých operací v opačném pořadí než při šifrování:



Rijndael (AES) – Dešifrování

- inverzní operace se provádějí v opačném pořadí než při šifrování
- kromě nelineární operace SubBytes je inverze zbylých operací velmi jednoduchá
- Rijndael je navržen tak, že lze použít stejný kód na šifrování i dešifrování
- pouze se zamění příslušné tabulky a polynomy (v každém ze 4 kroků)
- zbytek operací probíhá jako při šifrování

AES – dešifrování jednotlivých operací

- Operace AddRoundKey je invertibilní
  - operace $\oplus$ je inverzní sama k sobě tzn. po provedení opětovného přičtení polynomu mod 2 dostaneme původní polynom
- MixColumn je invertibilní
  - inverzi se realizuje pomocí násobení inverzním polynomem

$$c(x) = \{0b\}x^3 + \{0d\}x^2 + \{09\}x + \{0e\}$$

- ShiftRow je invertibilní
  - Inverze se realizuje jako cyklický posun doleva
- Nelineární operace ByteSub je také vratná
  - inverze je implementována pomocí vyhledávání v tabulce

AES – dešifrování

Inverze operace ByteSub

- Příklad S_{in}={21}

x \ y	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
0	52	09	6a	d5	30	36	a5	38	bf	40	a3	9e	81	f3	d7	fb
1	7c	e3	39	82	9b	2f	ff	87	34	8e	43	44	c4	de	e9	cb
2	54	7b	94	32	a6	c2	23	3d	ee	4c	95	0b	42	fa	c3	4e
3	08	2e	a1	66	28	d9	24	b2	76	5b	a2	49	6d	8b	d1	25
4	72	f8	f6	64	86	68	98	16	d4	a4	5c	cc	5d	65	b6	92
5	6c	70	48	50	fd	ed	b9	da	5e	15	46	57	a7	8d	9d	84
6	90	d8	ab	00	8c	bc	d3	0a	f7	e4	58	05	b8	b3	45	06
7	d0	2c	1e	8f	ca	3f	0f	02	c1	af	bd	03	01	13	8a	6b
8	3a	91	11	41	4f	67	dc	ea	97	f2	cf	ce	f0	b4	e6	73
9	96	ac	74	22	e7	ad	35	85	e2	f9	37	e8	1c	75	df	6e
a	47	f1	1a	71	1d	29	c5	89	6f	b7	62	0e	aa	18	be	1b
b	fc	56	3e	4b	c6	d2	79	20	9a	db	c0	fe	78	cd	5a	f4
c	1f	dd	a8	33	88	07	c7	31	b1	12	10	59	27	80	ec	5f
d	60	51	7f	a9	19	b5	4a	0d	2d	e5	7a	9f	93	c9	9c	ef
e	a0	e0	3b	4d	ae	2a	f5	b0	c8	eb	bb	3c	83	53	99	61
f	17	2b	04	7e	ba	77	d6	26	e1	69	14	63	55	21	0c	7d

AES - optimalizace

- Určeno pro systémy pracující s 32 bitovým vstupem (nebo větším).
- Urychlení algoritmu zkombinováním operací SubBytes a ShiftRows spolu s MixColumns a jejich transformací do několika vyhledání v tabulkách.
- Je nutné sestavit čtyři tabulky s rozměry 16x16, což zabere celkem 4x16x16x8=4096 bytů paměti.
- Rundu pak můžeme realizovat pomocí 16 vyhledání v tabulce a 12 32bitových operací XOR
- Poté následují čtyři 32bitové operace XOR s klíčem (operace AddRoundKey)

AES – bezpečnost

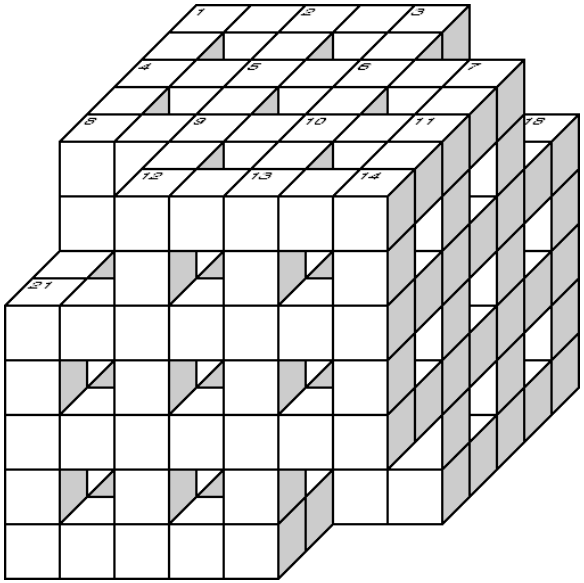
AES-128

- 2011 – útok na plný AES se složitostí $2^{126.1}$ kroků
- 4x efektivnější než útok hrubou silou

AES-192, AES-256

- popsány útoky s časovou složitostí 2^{172} a 2^{119} kroků
- funguje pouze se speciálním typem útoků - „related key“ útok
  - kryptoanalytik musí mít k dispozici OT zašifrovaném mnoha klíči, mezi kterými je vhodná vazba
  - týká se jen AES-256 s 10 rundami a AES-192 s 9 rundami
  - princip TMTO (Time Memory TradeOff)
  - úspora v času znamená zvýšené nároky na pamět
  - prostorová složitost útoku na AES-256 je 2^{119}
  - nelze prakticky zrealizovat
- 2011 – útoky se složitostí AES-256, $2^{189.7}$ and $2^{254.4}$

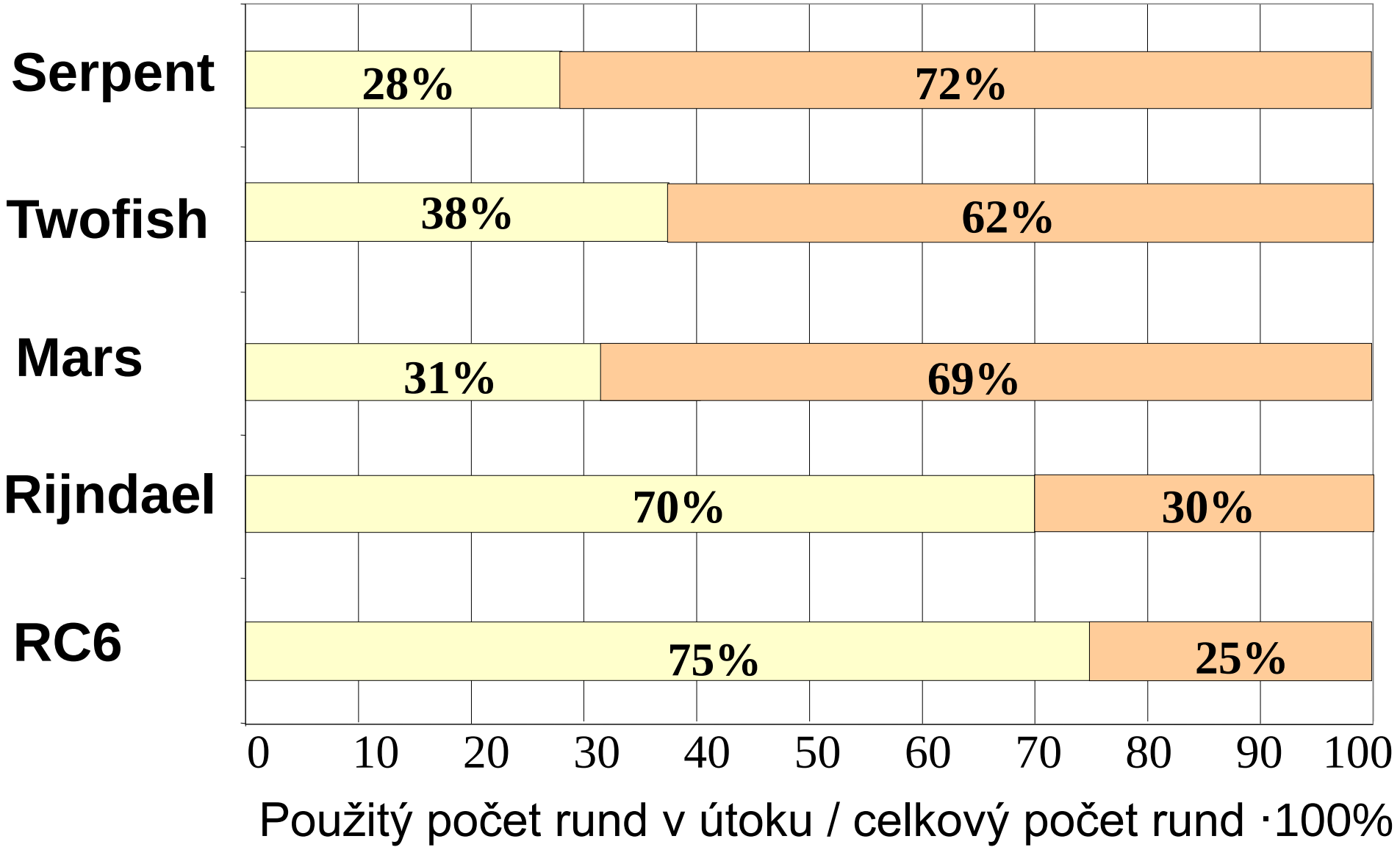
Srovnání kandidátů na AES

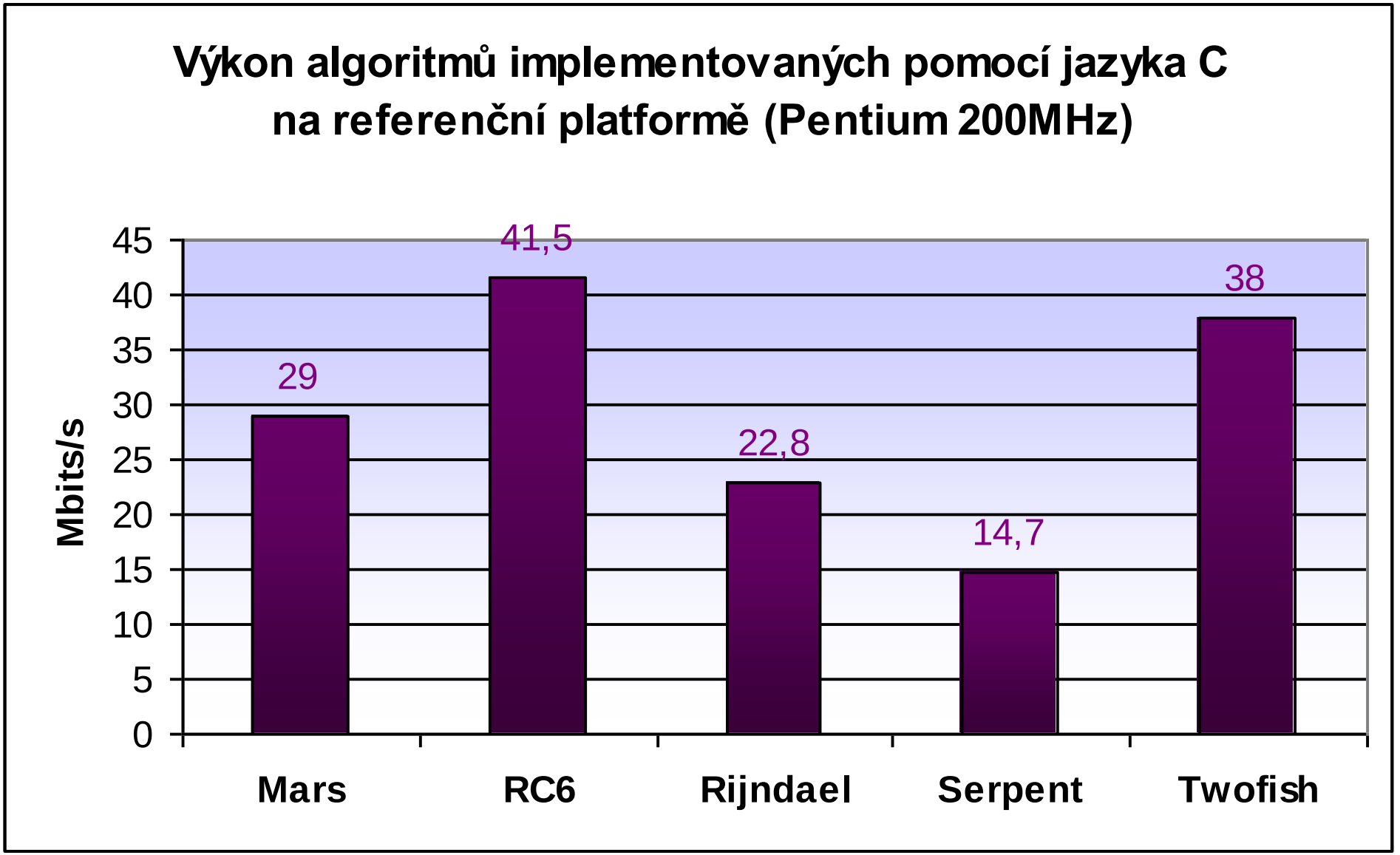


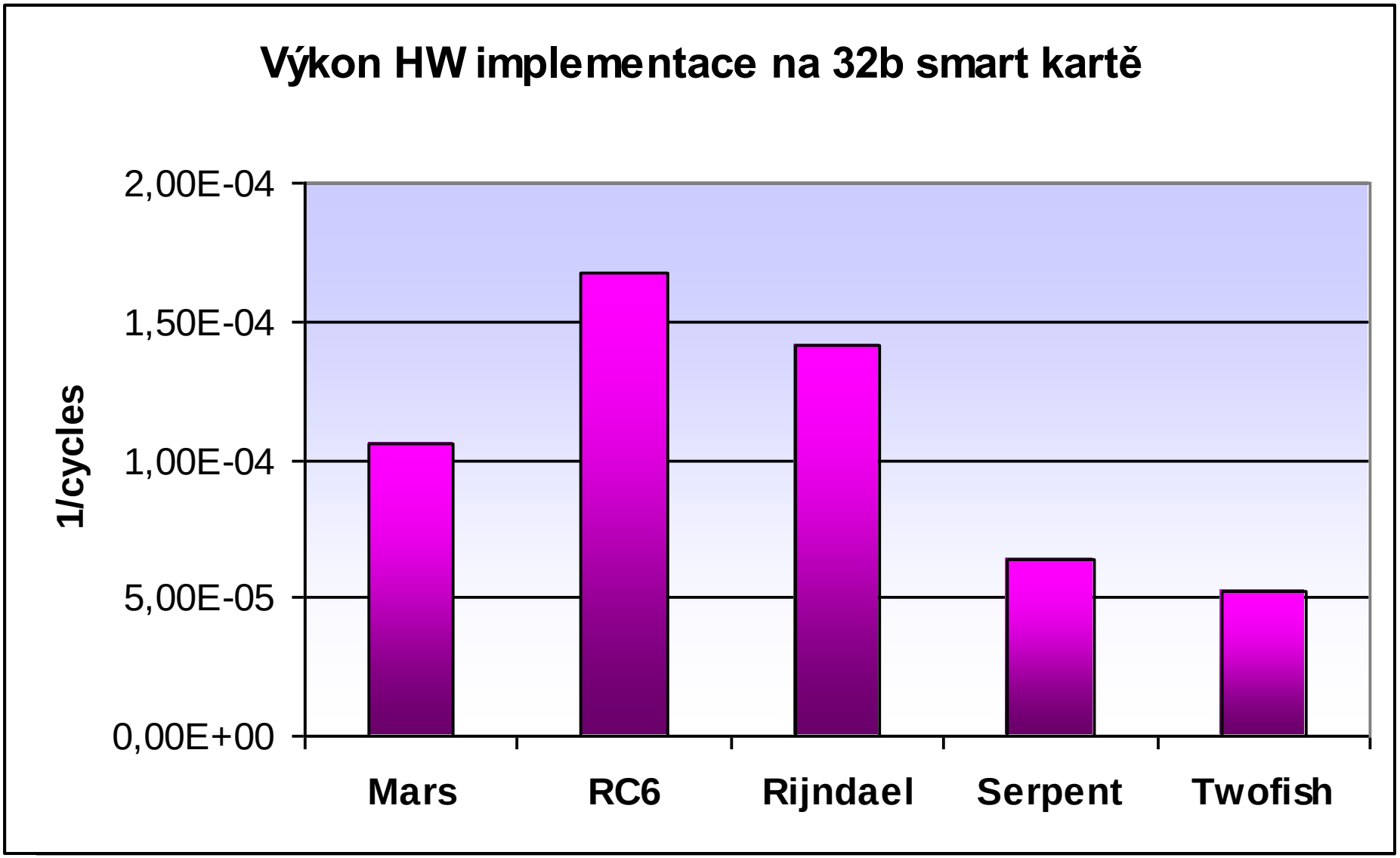
Omezené varianty algoritmů, které se podařilo prolomit

Algoritmus, Počet rund	Počet rund [délka klíče]	Typ útoku	Počet OT	Operací
Mars 16 Core (C)	11C	Amp. Boomerang	2^{65}	2^{229}
16 Mixovacích (M)	16M,5C	Meet-in-Middle	8	2^{232}
RC6	14	Statistic	2^{118}	2^{112}
20	15 [256]	Statistic	2^{119}	2^{215}
Rijndael	7 [192, 256]	Differential	2^{32}	2^{140}
10 (128)	8 [256]	Differential	$2^{128} - 2^{119}$	2^{204}
12 (192)	9 [256]	Related key	2^{77}	2^{224}
14 (256)				
Serpent	8 [192, 256]	Boomerang	2^{128}	2^{163}
32	9 [192, 256]	Amp. boomerang	2^{110}	2^{252}
Twofish	5 no post-whit	Related key	$2^{22.5}$	2^{51}
16	6 [256]	Differential	NA	2^{256}

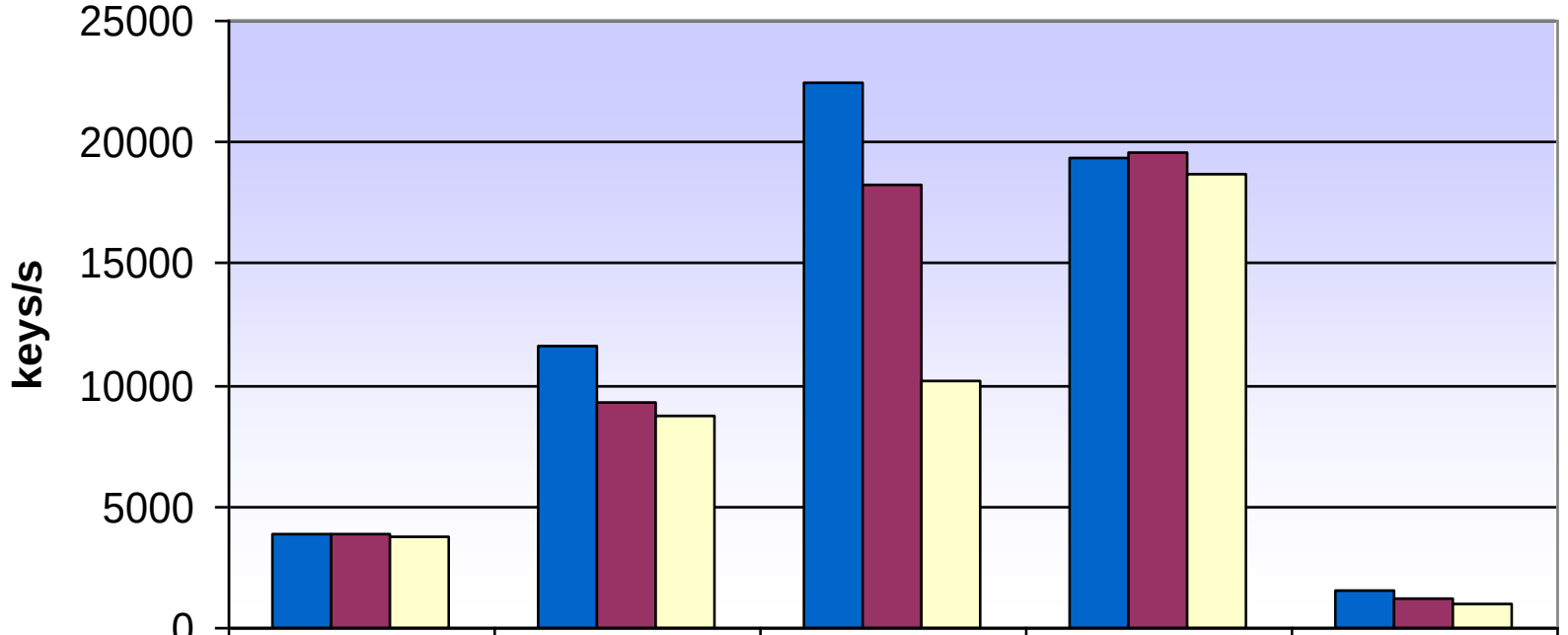
Bezpečnost: brute force nebo nějaký chytrý byť teoretický útok




Výkon algoritmů implementovaných pomocí jazyka C
na referenční platformě (Pentium 200MHz)
Mbits/s
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
29
41,5
22,8
14,7
38
Mars
RC6
Rijndael
Serpent
Twofish

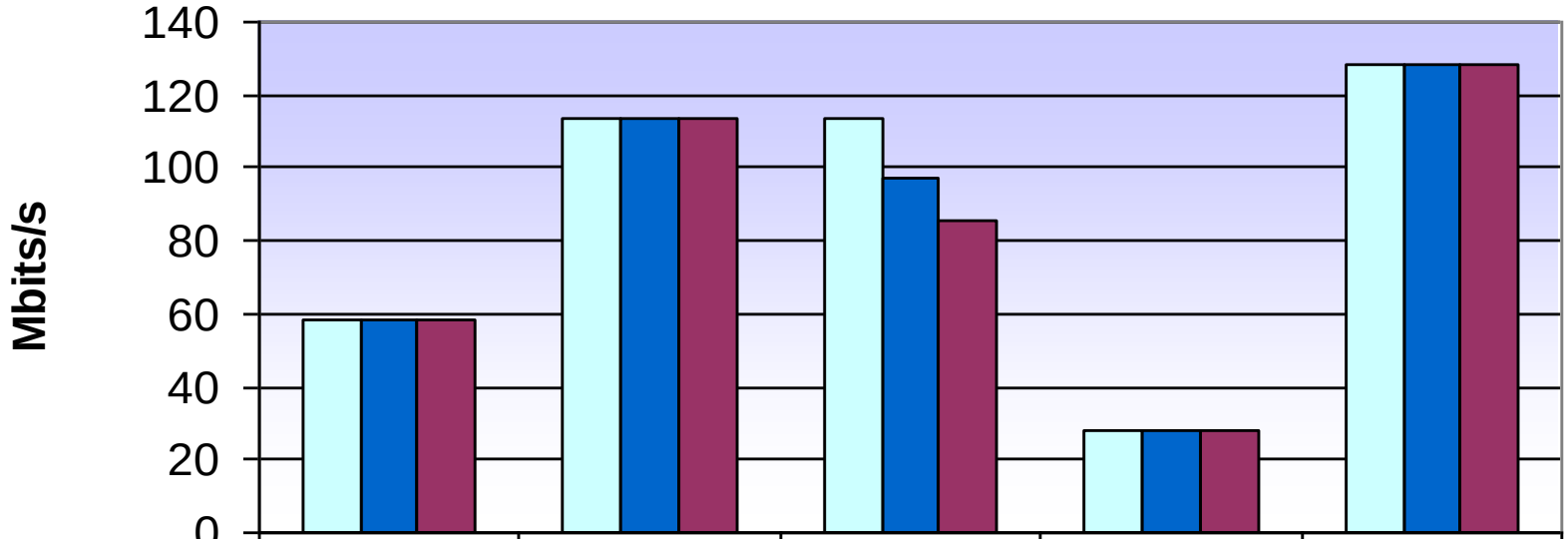

Výkon HW implementace na 32b smart kartě
2,00E-04
1,50E-04
1,00E-04
5,00E-05
0,00E+00
1/cycles
Mars
RC6
Rijndael
Serpent
Twofish

Timing test: Key Expansion



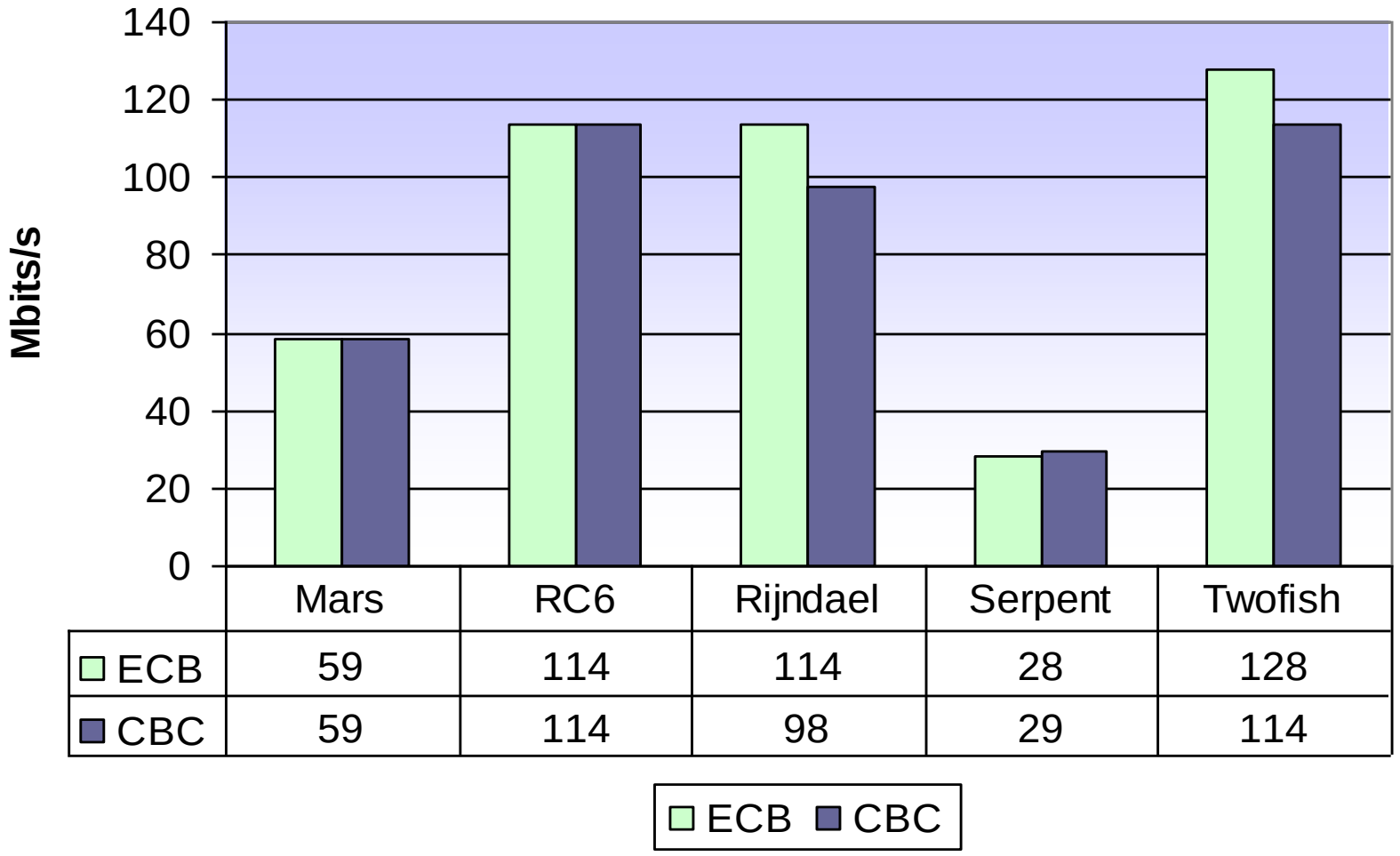
	Mars	RC6	Rijndael	Serpent	Twofish
128b	3878	11666	22434	19339	1558
192b	3896	9276	18258	19530	1237
256b	3789	8780	10197	18706	984

Key Length vs. Encryption Speed (16 Blocks)

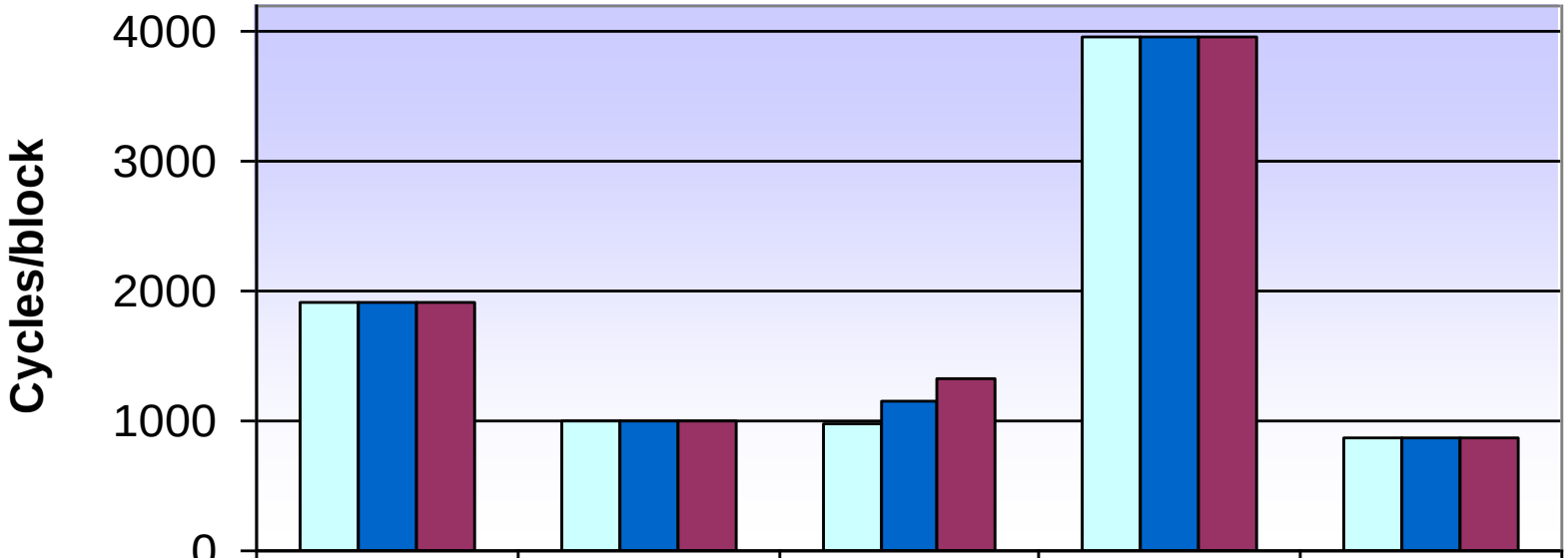


	Mars	RC6	Rijndael	Serpent	Twofish
128b	59	114	114	28	128
192b	59	114	98	28	128
256b	59	114	85	28	128

Mode vs. Encryption Speed (128-bit key/16 Blocks)



Key Length vs. Encryption Speed (16 Blocks)



	Mars	RC6	Rijndael	Serpent	Twofish
128b	1911	996	985	3966	871
192b	1911	997	1154	3963	871
256b	1913	996	1323	3962	871

Odkazy

AES – články o vývoji algoritmu, jeho posuzování a průběhu voleb v jednotlivých kolech

http://csrc.nist.gov/archive/aes/index.html

AES Round 1 Finalists

http://csrc.nist.gov/archive/aes/round1/round1.htm#algorithms

AES Round 2 Finalists

http://csrc.nist.gov/archive/aes/round2/round2.htm#algorithms

ADVANCED ENCRYPTION STANDARD - standard

http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf

Dotazy