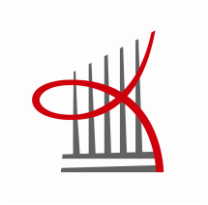


KEHITTYNEET

SALAUSMENETELMÄT

Lasse Rantanen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2013
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikan
suuntautuminen
Tampereen ammattikorkeakoulu

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikan suuntautumisvaihtoehto

LASSE RANTANEN: Kehittyneet salausmenetelmät

Opinnäytetyö 70 s., liitteet 40 s.
Huhtikuu 2013

Opinnäytetyöni käsittelee kehittyneitä salausmenetelmiä. Päädyin tähän aiheeseen, koska salausalgoritmien toimintamallit ja matematiikka kiinnostavat minua. Suurin osa työstä käsittelee Advanced Encryption Standardia ja sen toimintaa. Kyseinen salaus valikoitui pääaiheeksi sen maineen ja suuren kannattajakunnan takia. Halusin myös päästä vertailemaan salausten suorituskykyä ja toimintamalleja.

Suorituskykytestit koostuivat 60:sta TrueCrypt Bencmark mittauksesta, joissa mitattiin yhteensä kahdeksan salauksen tai salausten yhdistelmän suorituskykyä eri pakettikoilla. Näistä tuloksista luotiin kuusi kaaviota, joista kaikista näkyy selvästi, että Advanced Encryption Standard on tämän hetken suorituskykyisin symmetrinen salaus sekä salausten määrä vaikuttaa käänteisesti salausnopeuteen. Teoriaosuudessa saatiin selville, että AES on ainakin teoriassa myös kilpailevia asymmetrisiä salauksia nopeampi, vaikka se ei aivan kaikkiin tehtäviin sovikkaan.

Työn ollessa suorituskykytestejä vaille teoreettinen, ei sen tekemisessä tullut suuria ongelmia ja useiden salausmuotojen toiminta saatiin selitettyä ja suorituskykytestit ajettua. Työn suorituskykytestiin ei ohjelmistorajoituksen vuoksi saatu asymmetrisiä salauksia. Tämä estää AES:än suoran vertailun kyseisiin salauksiin. Työtä voitaisiin helposti syventää kyseisillä mittauksilla. Myös AES:än sovellusalueita voitaisiin tutkia tarkemmin ja samalla selittää yksityiskohtaisemmin kyseistä salausta käyttävien protokollien toimintaa. Algoritmin ollessa julkista tietoa, olisi myös salausmoottorin ohjelmointi työn puitteissa mielenkiintoinen vaihtoehto.

Asiasanat: Advanced Encryption Standard, RSA, tiiviste funktiot, TrueCrypt

ABSTRACT
Tampere University of Applied Sciences
ICT Engineering
Telecommunications Engineering and Networks

LASSE RANTANEN: Advanced encryption methods

April 2013

I have always been interested on cryptology and mathematics so advanced encryptions were obivious choise when choosing subject of thesis. Most of this thesis is about Advanced Encryption Standard and its competitiors and further on composed from theoretical comparing and performance tests.

Performance tests consist of 60 runs with TrueCrypt Bencmark tool. In this test 8 encryptions or there combinations is been tested with different size of packets. From those results were 6 graphs made that tell clearly the lead of Advanced Encryption Standards as industry's number one symmetric encryption. AES was compared to asymmetric encryptions in theoretical part of this thesis with good results.

This thesis being mostly theoretical there were no sign of problems and it accomplishes to explain the operation of most known encryptions and bencmarking the symmetric ones. This thesis could have been improved with asymmetric encryption benchmarks that weren't possible due software limitations. Protocols that use AES could have been explained more thoroughly and working self coded encryption illustration would be nice addition.

Key words: Advanced Encryption Standard, RSA, hash functions, TrueCrypt

SISÄLLYS

LYHENTEET JA TERMIT

AES	Advanced Encryption Standard
CBC	Cipher Block Chaining
DES	Data Encryption Standard
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	Hypertext Transfer Protocol Secure
IMAP	Internet Message Access Protocol
IP	Internet Protocol
NIST	National Institute of Standards and Technology
POP	Post Office Protocol
SHA-1	Secure Hash Algorithm
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SSH	Secure Shell
TCP	Transmission Control Protocol
TLS	Transport Layer Security
VPN	Virtual Private Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPA2	Wi-Fi Protected Access 2
WPA-PSK	WPA-Personal
WPA-802.1X	WPA-Enterprise

1 JOHDANTO

Digitaalisen tiedon määrä kasvaa jatkuvasti. Yhä useammat ihmiset ovat siirtäneet ainakin osan sosiaalisesta ja rahallisesta toiminnastaan tietokoneelle ja internettiin. Yritykset ja yksityiset haluavat valvoa tai salata osan tiedoistaan ulkopuolisilta. Tähän on kehitetty useita tapoja, ohjelmistoja ja ohjelmistojen taustalla toimivia salausalgoritmejä, jotka salaavat tietokoneen kiintolevyn, turvaavat yhteyden verkkopankkiin tai mitä ikinä käyttäjä haluaakaan pitää omana tietonaan.

Tämän työn tarkoituksena on tutustuttaa lukija tämän hetken käytetyimpään salaus algoritmiin, Advanced Encryption Standardiin, lyhyemmin sanottuna AES:ään. Kyseinen lyhenne esiintyy muunmuassa muistitikuissa, sähköpostiohjelmissa, verkkokaupoissa, verkkopankeissa ja pikaviestin ohjelmissa, vaikka käyttäjä ei sitä välttämättä huomaa tai tunnista.

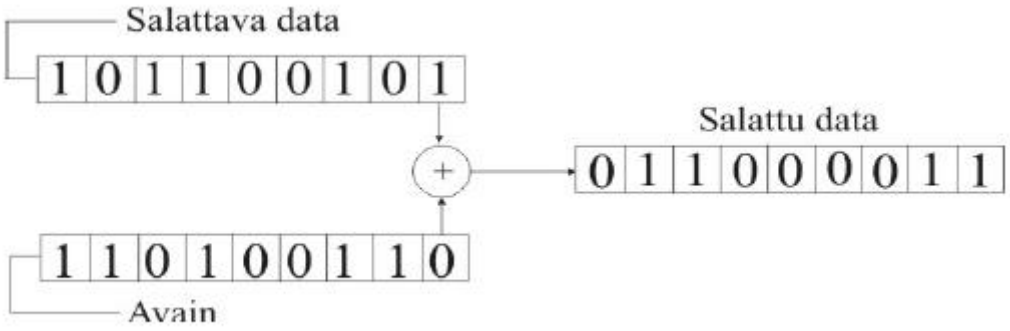
Tässä työssä selvitetään myös suorituskykytestien ja teoriaosuuksien avulla onko pitkään kehitetyllä, monesti validoidulla Yhdysvaltain virastojen ja useiden prosessorivalmistajien tukemalla salausalgoritmi AES:llä jotain mitä muilla ei ole.

2 SALAUKSET

2.1 Symmetriset salausmenetelmät

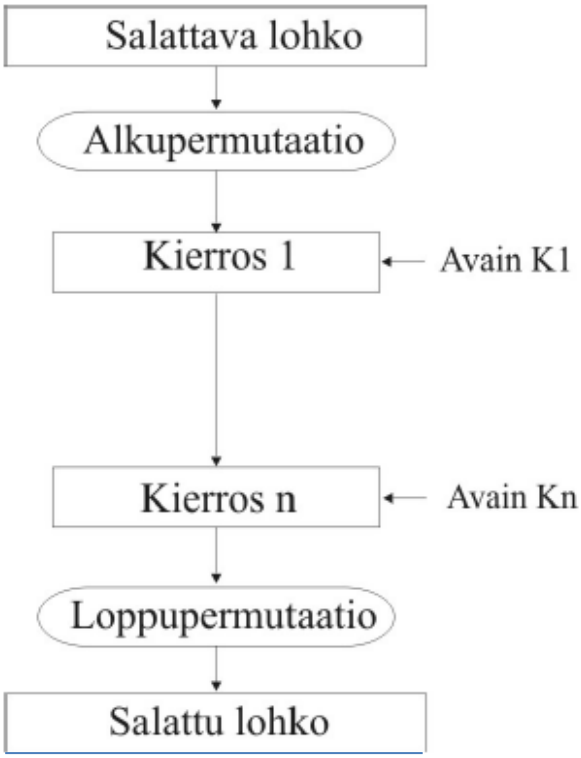
Symmetrisessä salausmenetelmässä lähetys ja vastaanotto tapahtuvat samaa avainta käyttäen. Viestin salauksen purkamiseen tarvittava avain on suoraan johdettavissa salausavaimesta. Menetelmää käytetään sen nopeuden vuoksi, mutta ongelmana on kuitenkin avainten hallinta, koska purkamiseen vaadittava avain on sama kuin salaamiseen. Avaimen siirtoon, esimerkiksi käyttäjältä toiselle, käytetään usein niin sanottua salaus tokenia tai epäsymmetristä salausta. Symmetriset salaumenetelmät voidaan jakaa kahteen alaluokkaan: jonosalaus ja lohkosalaus.

Jonosalausmenetelmässä salattava informaatio salataan bitti bitiltä. Salauksena se onkin nopea, ja sitä käytetään mm. GSM-puheluissa A5-salauksen muodossa, mutta A5-salaus on kuitenkin murrettavissa. Salaus ja purku tapahtuvat samalla operaatiolla, eli avaimen ja selkotekstin yhteenlasku XOR-operaatiolla. Tämä on esitetty kuvassa 1. Yksinkertaista rakennetta ja suurta salausnopeutta haettaessa jonosalaus on hyvä menetelmä.



KUVA 1. Jonosalauksen periaate (Salo 2005)

Lohkosalauksessa algoritmille annetaan lohko, eli useampi bitti kerrallaan, esimerkiksi 64 tai 128 bittiä. Kryptaaja saa päättää salataanko lohkot samalla salausavaimella, vai käytetäänkö uuden lohkon salaamisen osana aikaisemman lohkon salakirjoitusta. Alussa ja lopussa lohkon bitit permutoidaan, eli niiden järjestystä muutetaan (kuva 2).



KUVA 2. Lohkosalauksen periaate (Salo 2005)

Mikäli salattava tieto on lyhyempi kuin lohko, luodaan sen perään täytebittejä. Nykyisin käytössä olevia symmetrisiä salausalgoritmeja ovat mm. Blowish, AES, CAST ja RC5. (Salo 2005, 20.)

2.2 Epäsymmetriset salausmenetelmät

Epäsymmetriseen salaukseen käytetään avainparia, jonka avaimet eroavat toisistaan. Toinen avaimista on julkinen ja toinen yksityinen. Julkisella avaimella salattu materiaali voidaan avata yksityisellä avaimella ja toisinpäin. Esimerkiksi sähköpostia lähettäessä voidaan teksti salata vastaanottajan julkisella avaimella, jolloin vain hän pystyy avaamaan sen käyttämällä omaa yksityistä avaintaan.

Julkisen avaimen suurin etu, verrattuna symmetrisiin, on sen helppo avainten hallinta, mutta heikkoutena sen raskaus, koska salausavaimet ovat merkittävästi pidempiä kuin symmetrisissä järjestelmissä. Julkisen avaimen heikkoutena on myös sen helpompi purkaminen, koska murrettava salausavain ryhmä voidaan rajata niihin, jotka täyttävät salauksen vaatimat matemaattiset ominaisuudet. Esimerkiksi parillisia lukuja ei tarvitse kokeilla, koska ne eivät kuulu alkulukuihin, joita käytetään salauksen luonnissa. Jos epäsymmetrisellä salauksella tavoitellaan samaa turvatasoa kuin symmetrisellä, pitää avaimen olla pidempi. (Salo 2005, 21, 22.)

2.2.1 RSA-salausmenetelmä

RSA on maailman käytetyin epäsymmetrinen salausalgoritmi. Salaus tapahtuu kahden suuren alkuluvun kertomisella. Systeemi perustuu siihen, että on hyvin vaikeaa jakaa tekijöihin kahden suuren alkuluvan tulo, joten sitä voidaan käyttää julkisena avaimena. Alla esitetään RSA-avainparin luomisen vaiheet.

Ensin valitaan kaksi erittäin suurta alkulukua, *p* ja *q*. Jonka jälkeen lasketaan luku n kaavalla 1.

$$n = p \cdot q \tag{1}$$

Tämän jälkeen lasketaan phi (Φ) kaavalla 2.

$$\Phi = (p-1)\cdot(p-1) \tag{2}$$

Seuraavaksi valitaan pariton luku *e*, joka on välillä $1<e<\Phi$. Jonka jälkeen lasketaan luku *d* kaavalla 3.

$$d = e-1 \cdot \bmod \Phi \tag{3}$$

Julkinen avain on (*n*,*e*) ja salainen avain on *d*. Salaus on esitetty kaavassa 4 ja sen purku kaavassa 5.

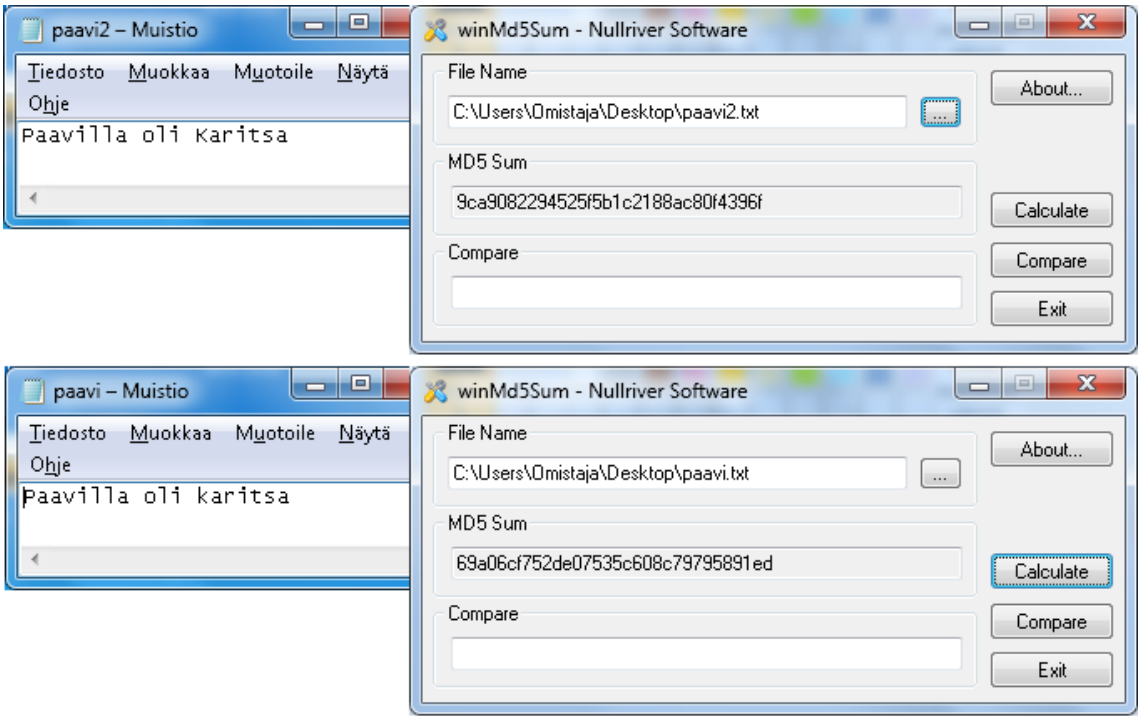
$$c = m^8 \cdot \mathrm{mod}\, n \tag{4}$$

$$m = c^d \cdot \mathrm{mod}\, n \tag{5}$$

RSA-salauksen turvallisuus johtuu siitä, että modulusta *n* on hyvin vaikea jakaa alkutekijöihin *p* ja *q*. (Salo 2005, 22.)

2.3 Tiivistefunktio

Kolmas yleinen salauksen muoto on tiivistefunktio eli kansankiellä hash. Tiivistefunktion ideana on tuottaa syötetystä datasta ennalta määrätyn mittainen datajono, esimerkiksi 160 bittiä. Tiivistefunktiot ovat yleensä yksisuuntaisia, eli funktion antamaa bittijonoa ei pysty enää muuntamaan alkuperäiseksi syötteeksi. Mitä parempi tiivistefunktio, sitä suurempi on valmiin tiivisteen muutos, kun syötettä muutetaan. Tämä näkyy kuvassa 3. (Keränen, Teeriaho 2006, 1,2.)



KUVA 3. Tiivistefunktioiden ero

Kaksi yleisintä tiivistefunktioiden käyttötapaa ovat salasanahallinta ja viestin oikeellisuuden tarkistaminen. Salasanahallinnassa palvelimen tai käyttöjärjestelmän kappale salasanasta hashataan ennen tallennusta, ja sitä verrataan käyttäjän syöttämän salasanan hashiin käyttäjän kirjautuessa. Viestin oikeellisuuden varmistamisessa lähettäjä voi lisätä viestinsä loppuun viestistä lasketun hashin, johon vastaanottaja voi verrata vastaanottamastaan viestistään laskemaan hashiin. Mikäli hashit ovat identtiset, on viesti todennäköisimmin alkuperäinen. (Keränen, Teeriaho 2006, 1,2.)

Tunnettuja tiivistefunktioita ovat muunmuassa Ronald Rivestin kehittämät MD2, MD4 ja MD5, joista jälkimmäisin tuottaa 16 tavuisen tiivisteen, sekä NIST:n standardoima SHA-1, joka tuottaa 20 tavuisen tiivisteen. MD5-hashia on käytetty muunmuassa edesmenneiden Windows-käyttöjärjestelmien, ja joidenkin Linux-käyttöjärjestelmien salasanahallintaan. (Keränen, Teeriaho 2006, 1, 2.)

3 AES-SALAUS

3.1 AES-salauksen synty ja menestys

AES-salaus sai alkunsa, kun sen kehittäjät Vincent Rismen ja Joan Daemen osallistuivat ja voittivat kehittämällään salauksella Yhdysvaltain hallituksen järjestämän avoimen kilpailun vuonna 1997. Kilpailun tavoitteena oli löytää seuraaja jo 1976 käyttöönotettuun, ja sittemmin vanhentuneelle Digital Encryption Standard -salaukselle. Salausta kutsuttiin ensin Rijndaeliksi, sen kehittäjien mukaan, mutta Yhdysvalain National Institute of Standards and Technology julkaisi sen viiden vuoden validointiprosessin jälkeen nimellä Advanced Encryption Standard (AES). Sittemmin se on muun muassa sisällytetty ISO/IEC 18033-3 standardiin. Siitä on tullut ensimmäinen Yhdysvaltain NSA:n hyväksymä avoimen algoritmin salausmenetelmä. Siitä on tullut myös luultavasti suosituin avoin salausmenetelmä kansainvälisesti. (National Institute of Standards and Techonology 2001, 1,2.)

3.2 Algoritmi

AES-salauksessa lohkon eli datataulukon koko on 128 bittiä, vaikkakin Rijndael sallisi jopa 256 bitin lohkon ja salausavaimen koko on 128, 192 tai 256 bittiä. Lohkosalaukseen perustuvan algoritmi alkaa tiedon jakamisella neljä kertaa neljän tavun taulukoihin. Loppu koostuu neljästä päätoimituksesta ja neljästä alitoimituksesta, joissa käsitellään taulukoiden dataa, ja joiden toistokerta määräytyy avainkoon perusteella taulukon 1 mukaisesti.

TAULUKKO 1. Avainkoon määräytyminen kierrosten lukumäärän mukaan

kierrosten lukumäärä	avain/bittiä
10	128
12	192
14	256

Seuraavaksi esitetään pää- ja alitoimitukset. Ensimmäinen päätoimitus on avaimen laajennus. Salausavaimesta tehdään uniikit variantit tuleville algoritmin kierroksille. Avainten luontiin käytetään Rijndaelin avaintaulukkoa. Tämän jälkeen seuraava päätoimitus on alustava kierros. Alustavan kierroksen alitoimituksena on avaimen lisäys kierros. Jokainen taulukon tavu yhdistetään xor -toimituksella kyseiselle kierrokselle luotuun avaimeen.

Kolmas päätoimitus on varsinaiset kierrokset. Kierroksien alitoimituksina ovat tavujen korvaus, rivin vaihto, sarakkeiden yhdistys ja avaimen lisäys kierros. Tavujen korvauksessa jokainen taulukon tavu korvataan epälineaarisesti korvaustaulukkoa hyväksikäyttäen toisella tavulla. Rivin vaihdossa jokainen taulukon rivi siirretään tietyn määrän verran eteenpäin. Sarakkeiden yhdistymisessä taulukossa olevien sarakkeiden tavut yhdistetään. Neljäntenä päätoimituksena on viimeinen kierros. Viimeisen päätoimituksen alitoimituksina ovat tavujen korvaus, rivin vaihto ja avaimen lisäys kierros. (National Institute of Standards and Techonology 2001, 14–22.)

3.2.1 Tavujen korvaus

Tavujen korvauksessa jokainen taulukon tavu muutetaan kahdeksi hexamerkiksi. Ensimmäiset neljä bittiä muodostavat ensimmäisen merkin, ja jälkimmäiset neljä muodostavat toisen merkin. Tämän jälkeen hexamerkkejä verrataan tätä varten tehtyyn korvaustaulukkoon, jossa hexamerkit sijoittuvat x- ja y-akselille ja niiden risteyskohdasta tulee taulukon uusi tavu, joka vielä muutetaan takaisin binääriksi. (National Institute of Standards and Techonology 2001, 14–22.)

3.2.2 Rivin vaihto

Rivin vaihdossa taulukon neljä riviä kiertävät vasemmalle seuraavasti. Toinen rivi kiertää yhden sarakkeen vasemmalle, kolmas rivi kaksi saraketta ja neljäs rivi kolme saraketta. Tämä on havainnollistettu kuviossa 1.

0.0 0.1 0.2 0.3		0.0 0.1 0.2 0.3
1.0 1.1 1.2 1.3		1.1 1.2 1.3 1.0
2.0 2.1 2.2 2.3	>	2.2 2.3 2.0 2.1
3.0 3.1 3.2 3.3		3.3 3.0 3.1 3.2

KUVIO 1. Rivinvaihto (National Institute of Standards and Techonology 2001, 17, muokattu)

3.2.3 Sarakkeiden yhdistys

Sarakkeiden yhdistys vaiheessa jokaiselle sarakkeen tavulle suoritetaan xor, ennalta määritellyn matriisin kanssa. Esimerkkinä matriisi 128 bittisen avaimelle, kaava 6. (National Institute of Standards and Techonology 2001, 14–22.)

$$\begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2311 \\ 1231 \\ 1123 \\ 3112 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

4 AES TURVALLISUUS

4.1 AES:n murtoyritykset

AES:n julkaisun jälkeen on dokumentoitu useita hyökkäysyrityksiä salauksen murtamiseksi. Algoritmin toimintaa tutkivaa/hyväksi käyttävää murtoyritystä ei ole toistaiseksi löydetty, vaikkakin sellasien uskottiin onnistuvan AES:n suhteellisen yksinkertaisen algoritmin vuoksi. Kaikki onnistuneet hyökkäykset ovat olleet niin kutsuttuja side channel -hyökkäyksiä, missä ei oteta kantaa itse algoritmiin ollenkaan, vaan tutkitaan salattavaa dataa ja sen salauksen kestoa. Side channel -hyökkäykset vaativat lähes poikkeuksetta ajettavan ohjelman salausta suorittavalla koneella, tai todella suuren tunnetun data määrän toimiakseen. Esimerkkeinä näistä toistaiseksi menestyksekkäin side channel -hyökkäys, vuonna 2010 David gullasch ja Stephan Krenn julkaisivat dokumentin, jossa kuvailtiin onnistunut hyökkäys 128 bittistä AES-salausta vastaan, ilman, että tiedettiin salausavain taikka salattava data, mutta se vaatii onnistuakseen haittaohjelman ajamisen salausta suorittavassa koneessa. (Krenn, Gullasch, Bangerter, sivunro.)

4.2 Rautatason salaus

AES-salaus voidaan toteuttaa pienellä tarkoitukseen tehdyllä piirillä, joka voidaan liittää emolevylle, USB -tikkuun, puhelimeen tai johonkin muuhun dataa käsittelevään laitteeseen. Vaihdettaessa ohjelmistopohjaisesta rautapohjaiseen salaukseen voidaan välttää osa side channel -hyökkäyksistä, sekä nopeuttaa salausta mikäli isäntäkoneen prosessori ei tue AES – käskykantaa.

5 AES IMPLEMENTOINTI

5.1 AES käskykanta

AES-salauksen tullessa yhä suositummaksi tietotekniikassa, Intelin ehdotuksesta vuonna 2008, Intel ja AMD alkoivat sisällyttää suorittimiinsa erillisen käskykannan AES saluksen eri vaiheiden suorittamiseen. Sittemmin sama käskykanta on levinnyt myös VIAn x86 pohjaisiin suorittimiin, ja joihinkin ARM-suorittimiin. Vuonna 2010 Intel julkaisi AES-NI käskykannan omille prosessoreilleen, parantaen edelleen suorittimien kykyä AES-salauksen luontiin ja purkamiseen. Alkuperäisessä AES-käskykannassa on erillinen käsky seuraaville suoritteille:

Yksi kierros salatessa
Viimeinen kierros salatessa
Yksi kierrossa purkaessa salausta
Viimeinen kierros purkaessa salausta
Kierros avainten luonti
Sarakkeiden yhdistys
Kahden 64-bittisen luvun kertominen keskenään (Gueron 2009, 15–17.)

AES- ja AES-NI -käskykannallisissa prosessoreissa voidaan suorittaa algoritmin avaimen laajennus osuus itse prosessorissa, eikä erillista lookup tablea tarvita. Näin estetään avaimiin kohdistuva side channel –hyökkäys, jossa hyökkääjä yrittää päätellä salasanat siitä kuinka kauan prosessorilla menee lukea ulkoista lookup tablea. (Gueron 2009, 23.)

AES-käskykanta on nykyään tuettuna useilla eri alustoilla ja ohjelmilla, esimerkkeinä Solaris Cryptographic Framework, Oracle Database, OpenSSL, FreeBSD:n työkalut, Os X:n FileVault ja Windowsin BitLocker.

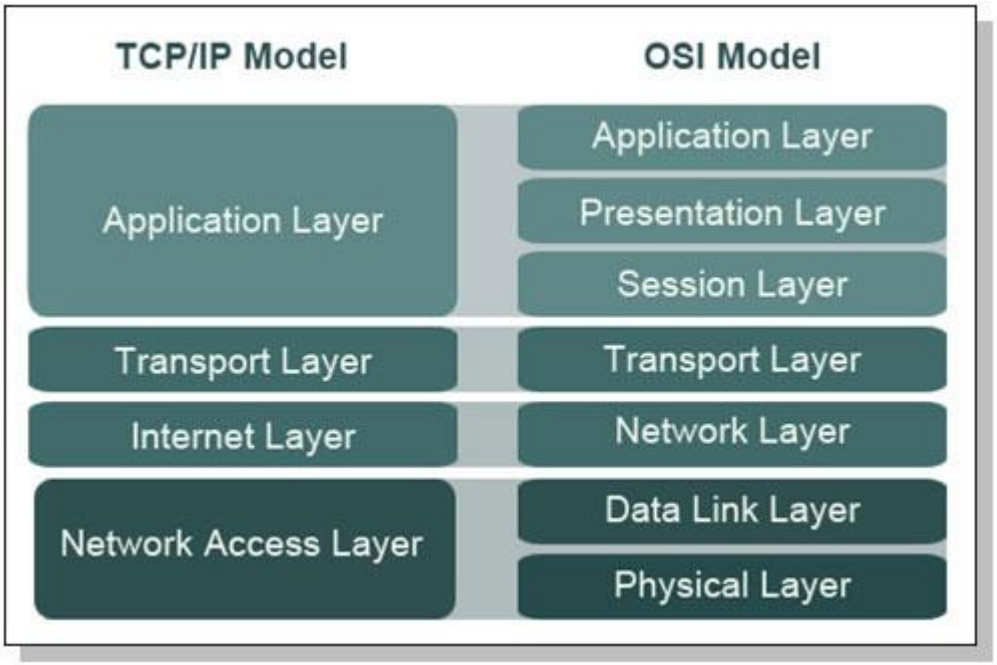
5.2 Ohjelmointikielet

AES-salaus voidaan implementoida tällä hetkellä ainakin c, c++, c#, .NET, Java, Javascript, PHP ja Python ohjelmointikieliin. Viime vuonna (2012) julkaistiin myös ensimmäinen näytönohjainta salaukseen käyttävä ohjelma, jolla pitäisi valmistajan mukaan päästä näytönohjaimesta ja prosessorista riippuen 2-5 kertaisiin nopeuksiin, pelkkään prosessoriin verrattuna. (gKrypt, 2012)

6 SOVELLUSALUEET

AES-salauksella on kaksi pääasiallista sovellusaluetta, datan ja tietoliikenteen salaaminen. Datan salauksessa yksittäisellä tietokoneella tai palvelimella on salausohjelma joka salaa tietoa joko pyydettäessä tai juoksevasti normaalin käytön ohella. Pyydettäessä tapahtuva salaaminen tarkoittaa yhden tai useamman tiedoston taikka kansion salaamista käyttäjän erikseen pyytämänä. Lähes kaikki jälkikäteen asennettavat salausohjelmat tukevat tätä vaihtoehtoa. Juokseva salaus tarkoittaa sitä, että data salataan tai salaus puretaan automaattisesti, sitä mukaan kun ohjelma tai käyttöjärjestelmä dataa käyttää. Esimerkkinä Windows 7 Ultimate ja Enterprise versioiden mukana tuleva Bitlocker -ohjelmisto, jolla voi salata käyttöjärjestelmän niin halutessaan. (Microsoft 2007.)

Tietoliikenteessä AES-salausta voidaan käyttää kahden tietokoneen tai tietokoneen ja palvelimen välisen tietoliikenteen salaamiseen, näistä esimerkkinä pankkitapahtumat, sähköpostin siirto ja luku sekä Voice over IP puhelut. Suosituin AES-salausta tukeva protokolla on Transport Layer Security eli lyhyemmin TLS. TLS toimii TCP/IP-mallin transport kerroksella ja OSI-mallin session ja presentation kerroksilla(kuva 4). Näillä kerroksilla TLS toimii muiden protokollien kanssa niiden siirtämän datan salaukseen, esimerkkinä HTTP:n suojattu versio HTTPS, joka käyttää TLS:ää siirrettävän datan salaukseen. Muita samalla OSI kerroksella toimivia protokollia jotka osaavat hyödyntää TLS:sää ovat ainakin sähköpostin siirtoon luodut POP, IMAP ja SMTP sekä etäyhteyksiä varten luodut SSH ja VPN. (Gilbert-Knight, Bergfeld, Chapman 2012.)



Kuva 4. TCP/IP- ja OSI-malli. (Learn Networking. 2008)

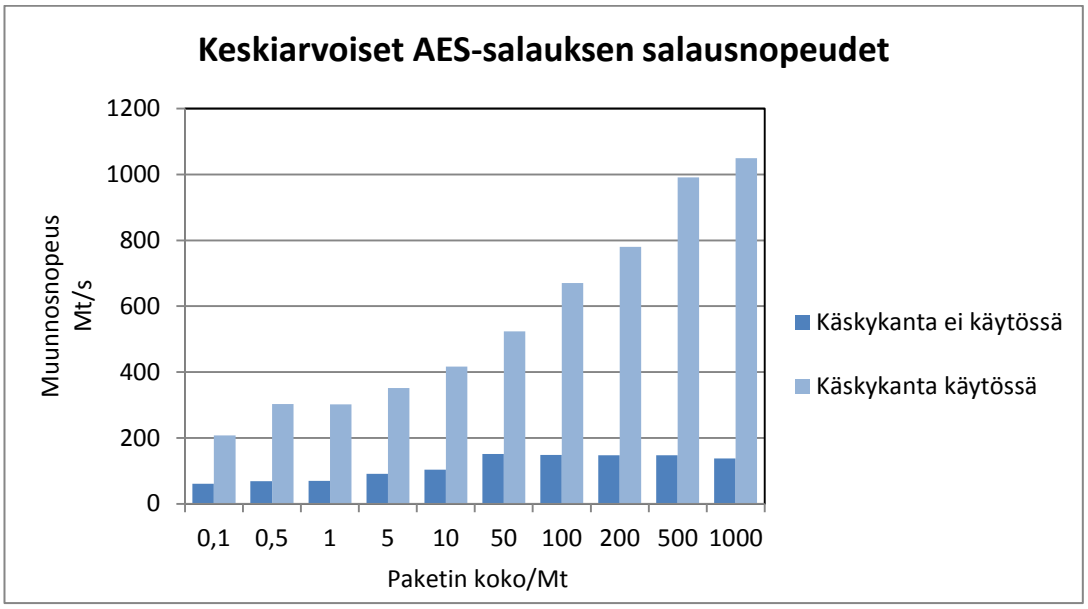
Toinen tietoliikenteessä tunnettu AES-salausta käyttävä protokolla on WPA2, jota käytetään langattomien Wi-Fi verkkojen datan salaukseen. WPA:sta on julkaistu erilliset versiot yksityisten (WPA2-PSK) ja yritysten (WPA-802.1X) käyttöön. WPA2:ssa data salataan 128 bitin lohkoissa ja 128 bitin avaimella. Salaus tapahtuu niin sanotussa CBC moodissa, jossa edeltävän lohkon salaustekstiä käytetään seuraavan lohkon salaukseen eräänlaisella takaisinkytkennällä. (Wi-Fi Alliance 2013.)

7 SUORITUSKYKY

Osana tätä työtä haluttiin mitata symmetristen salausten ja AES-NI-käskykannan suorituskyky (Liitteet 1-20). Mittaukseen käytettiin ilmaisen TrueCrypt -ohjelman benchmark -toimintoa, koska käyttäjän valittavana on käytettävien prosessoriytimien määrä, sekä ohjelma tukee haluttaessa AES-NI-käskykantaa. Lisäksi testit ajetaan keskusmuistissa, poistaen näin tallennusmedian suorituskyvyn vaikutukset tuloksiin. Testeihin käytettiin Samsung NP530U3C kannettavaa tietokonetta, jossa on Intel i5-3317U prosessori, neljä gigatavua keskusmuistia ja käyttöjärjestelmänä 64-bittinen Windows 7 Home Premium. Kaikki ylimääräiset ohjelmat ja prosessit lopetettiin testien ajaksi, koska ne saattavat vaikuttaa mittaustuloksiin negatiivisesti, varaamalla kellojaksoja prosessorilta tai viemällä tilaa keskusmuistista.

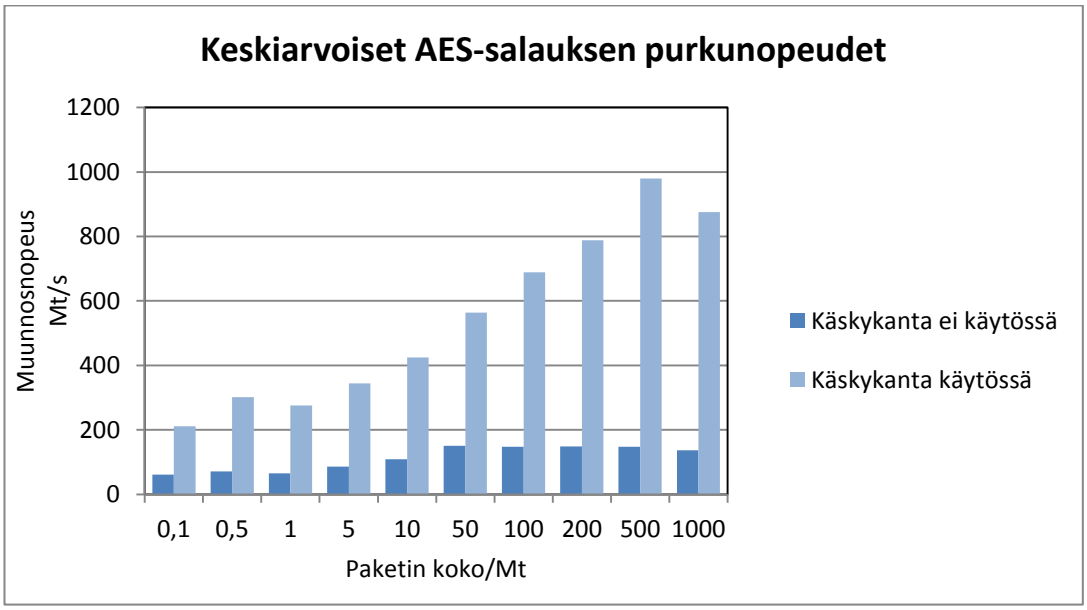
TrueCrypt -ohjelmiston benchmark -toiminnossa on valittavana salattavan paketin koko, jolle on kymmenen arvoa 100 kilotavun ja yhden gigatavun väliltä. Testissä salataan ja puretaan valitun kokoinen testitiedosto, yhteensä kolmella symmetrisellä salauksella tai näiden salauksien yhdistelmällä. Vaihtoehtoina ovat AES, Twofish, Serpent, sekä valittavissa on kahden ja kolmen salauksen yhdistelmiä. Kaikilla pakettikoilla tehtiin kolme testiä AES-NI-käskykanta käytössä ja poissa käytöstä, keskiarvojen saamiseksi. Tulevat kuviot perustuvat näistä mittaustuloksista saatuihin keskiarvoihin.

Kuviossa 2 vertaillaan kaikilla pakettikoilla AES-salauksen salausnopeutta AES-NI-käskykannalla ja ilman. Kuviossa vaaka-akselilla on paketin koko ja pystyakselilla muunnosnopeus. Tuloksista nähdään AES-NI-käskykannan olevan kolmesta kahdeksaan kertaan nopeampi pakettikoosta riippuen, eikä sen nopeuden kehitys pysähdy 50 Megatavun pakettikoon jälkeen toisin kuin ilman käskykantaa.



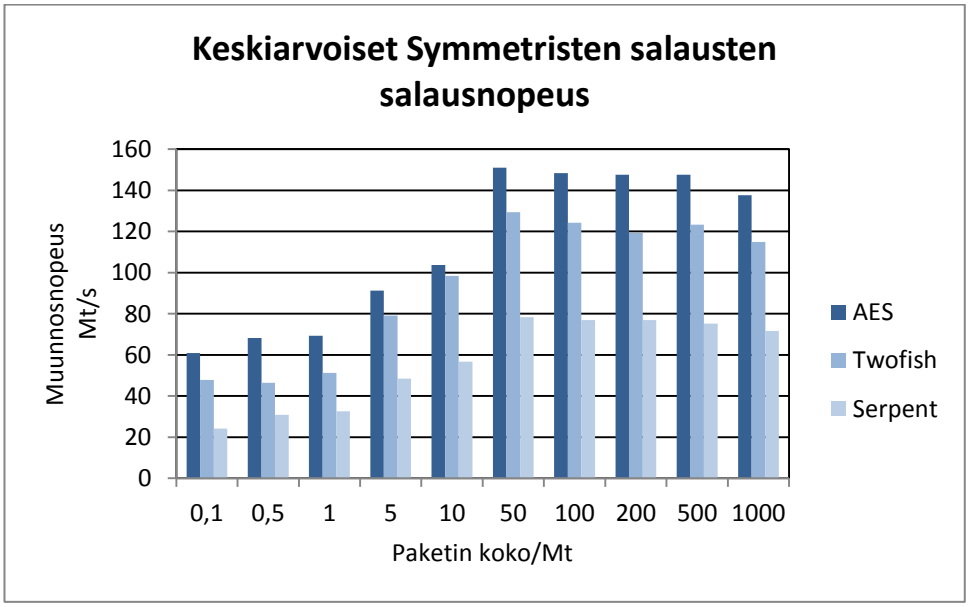
KUVIO 2. AES-salauksen salausnopeus

Kuviossa 3 vertaillaan kuvion 2 mukaisesti salauksen purkunopeutta. Vaaka-akseli kuvaa edelleen paketin kokoa ja pystyakseli muunnosnopeutta. Tulokset ovat hyvin lähellä salausnopeuksia, joka johtuu AES-salauksen symmetrisestä algoritmistä, jossa purkaminen tapahtuu salauksen käänteisversiolla. Kun paketin koko on 1000Mt ja muunnosnopeus n.850Mt/s ja käskykanta on käytössä, havaitaan kuviossa selvä muutos. Pakettikokoon 500Mt asti,kun käskykanta on käytössä, pylväät kasvavat, mutta kun pakettikoko on 1000Mt, muunnosnopeus putoaa n.850Mt/s. Myös pakettikokoa 0,5Mt käytettäessä, kun käskykanta on käytössä, havaitaan selvästi suurempi pylväs kuin pakettikoossa 1Mt, joka poikkeaa selvästi muista saaduista arvoista.



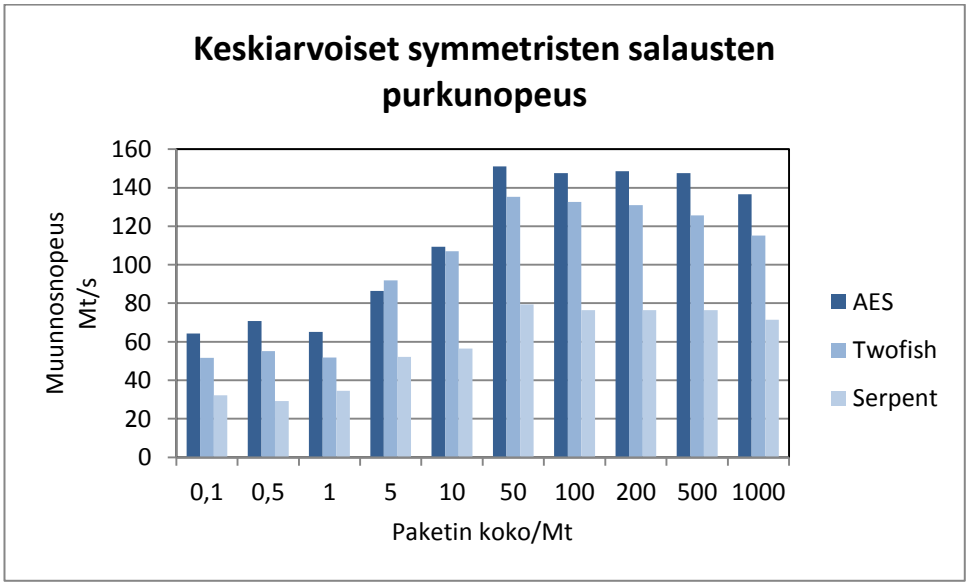
KUVIO 3. AES-salauksen purkunopeus

Kuviossa 4 vertaillaan symmetristen salausalgoritmien salausnopeutta, kun AES-NI käskykanta ei ole käytössä. Kuvaajassa vaaka-akselilla on paketin koko ja pystyakselilla muunnosnopeus. Kuvaajasta nähdään, että AES on nopein ilman käskykantaakin, mutta Twofish jää vain 5-15 prosenttia jälkeen. Kolmanneksi tuli Serpent, joka jää noin puoleen AES-salauksen salausnopeudesta.



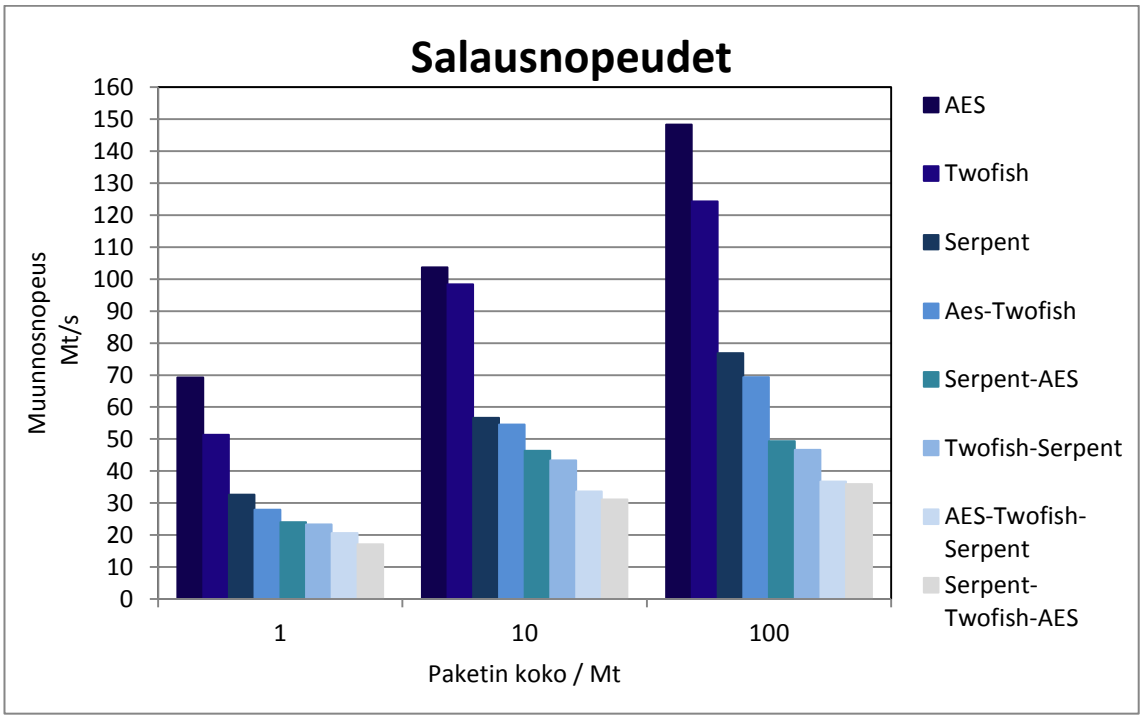
KUVIO 4. Symmetristen salausten salausnopeus

Kuviossa 5 vertaillaan symmetristen salausten purkunopeutta toisiinsa nähden. Tulokset ovat hyvin samankaltaiset kuvion 4 kanssa. Eli kuviosta 5 voidaan päätellä, että AES on nopein purkunopeudessa ja Serpent hitain. Twofishin purkunopeudet ovat näiden kahden välistä. AES-NI käskykanta ei ole käytössä.



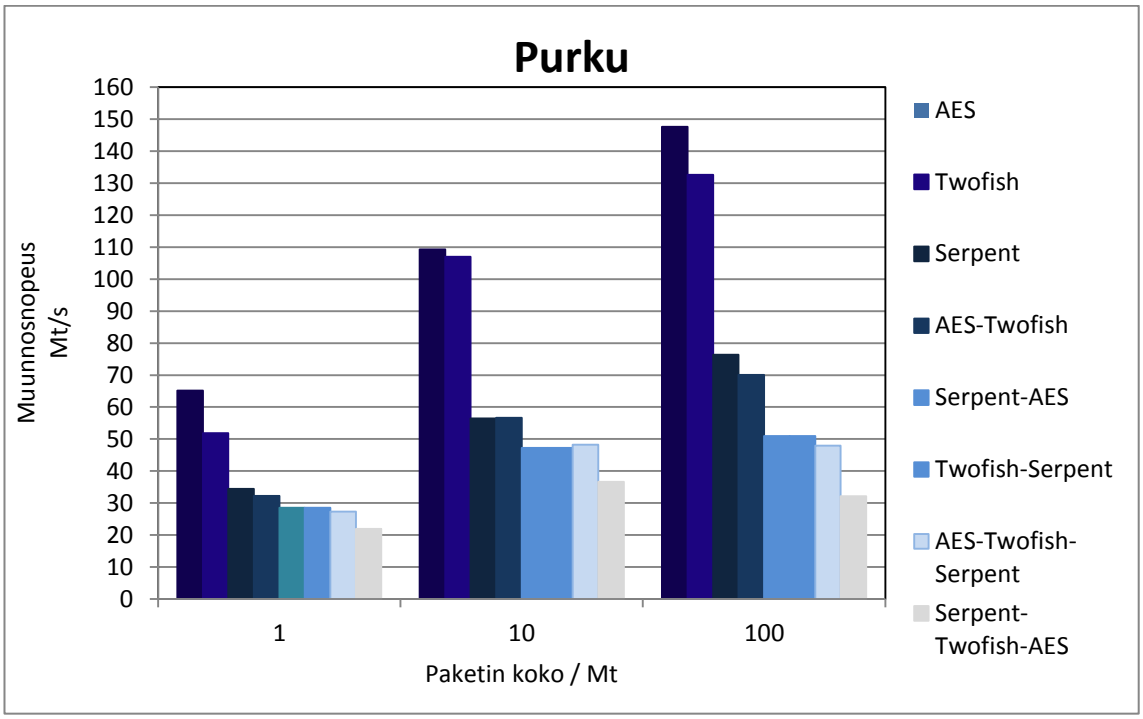
KUVIO 5. Symmetristen salausten purkunopeus

Kuviossa 6 vertaillaan yhdessä ja erikseen ajettujen salausten salausnopeuksia. Vaaka-akselilla on paketin koko ja pystyakselilla muunnosnopeus. Yhdessä ajetut testit koostuvat joko kahden tai kolmen salauksen jonosta. Kuviosta nähdään, että yksittäiset salaukset ovat huomattavasti nopeampia kuin kahden tai kolmen salauksen jonot, ja, että salausten määrä vaikuttaa käänteisesti salausnopeuteen. AES-NI käskykanta ei ole käytössä.



KUVIO 6. Salausnopeudet

Kuviossa 7 vertaillaan yhdessä ja erikseen ajettujen salausten purkunopeuksia. Vaaka-akselilla on paketin koko ja pystyakselilla muunnosnopeus. Yhdessä ajetut testit koostuvat joko kahden tai kolmen salauksen jonosta. Kuviosta nähdään, että yksittäiset salaukset ovat huomattavasti nopeampia kuin kahden tai kolmen salauksen jonot ja, että salausten määrä vaikuttaa käänteisesti purkunopeuteen. AES-NI käskykanta ei ole käytössä.



KUVIO 7. Purku

POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tekeminen onnistui suhteellisen tiukasta aikataulusta huolimatta mielestäni hyvin ja sain käsiteltyä kaikki ne asiat jotka halusin. Tietysti joissakin asioissa olisi voinut mennä syvemmälle tekniikkaan, mutta jätin suosiolla kilpailevat tekniikat vähemmälle huomiolle, jotta saisin itse AES:n selostettua riittävän selkeästi. Työssä huomattiin, että AES:lle kehitetystä AES-NI on merkittävä hyöty salaukselle ja sen turvin se onkin markkinoiden nopein.

Lähdeaineiston koostuessa ainoastaan internetsivuista, internettiin ladatuista kirjoista ja oppimisaineistosta oli tieto hyvin ja nopeasti saatavilla, sekä käytössä esteittä ympäri vuorokauden, auttaen työn nopeaa valmistumista. Löysin myös muutamia ulkomailla julkaistuja mielenkiintoisia teoksia joihin haluaisin tutustua tämän työn jälkeen. Internet lähdeaineistona oli toisaalta myös hankala, koska piti olla erittäin lähdekriittinen ja tunnettuja julkaisuja aiheesta oli välillä hankala löytää ilman lukumaksuja. Työssäni olisin voinut käyttää monipuolisempia lähteitä esimerkiksi kirjallisuutta, lehtiartikkeleita ja asiantuntijoiden haastatteluja.

Nyt kun työ on tehtynä olen vakuuttunut siitä, että vastaavaa työtä aloittaessa tulevaisuudessa valitsen mieluusti modernimman aiheen. AES-salauksen markkinajohtajuudesta huolimatta se on lähes 15 vuotta vanhaa tekniikkaa, ja siitä johtuen joitain dokumentteja ja julkaisuja ei löydy internetistä, paikallisista kirjastoista tai kaupoista, eikä keskustelu aiheesta ole kovin vilkas.

LÄHTEET

Gueron, S.2009. Intel®'s Advanced Encryption Standard (AES) Instructions Set. http://download-software.intel.com/sites/default/files/m/6/5/5/4/7/20457-Advanced_Encryption_Standard__28AES_29_Instructions_Set_Rev_2_2801_29.pdf

Krenn, S., Gullasch, D. & Bangerter, E. Cache Games – Bringing Access-Based Cache Attacks on AES to Practice. Luettu 24.3.2013 http://eprint.iacr.org/2010/594.pdf

National Institute of Standards and Techonology. 26.10.2001. ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (EAS). Luettu 24.3.2013 http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf

Salo T. 2005. Tutkintotyö. Puheensalaus tiedonsiirtoverkossa. https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/10332/TMP.objres.219.pdf?sequence=2

Microsoft. 30.4.2007. Windows BitLocker Drive Encryption Step-by-Step Guide. Luettu 12.4.2013 http://technet.microsoft.com/en-us/library/c61f2a12-8ae6-4957-b031-97b4d762cf31

Gilbert-Knight, A., Bergfeld, C., Chapman, A. 12.4.2012. An Introduction to Transport Layer Security. Luettu 12.4.2013 http://www.techsoup.org/support/articles-and-how-tos/introduction-to-transport-layer-security

Wi-Fi Alliance 2013 Knowledge Center. Luettu 12.4.2013 http://www.wi-fi.org/knowledge-center/glossary/w

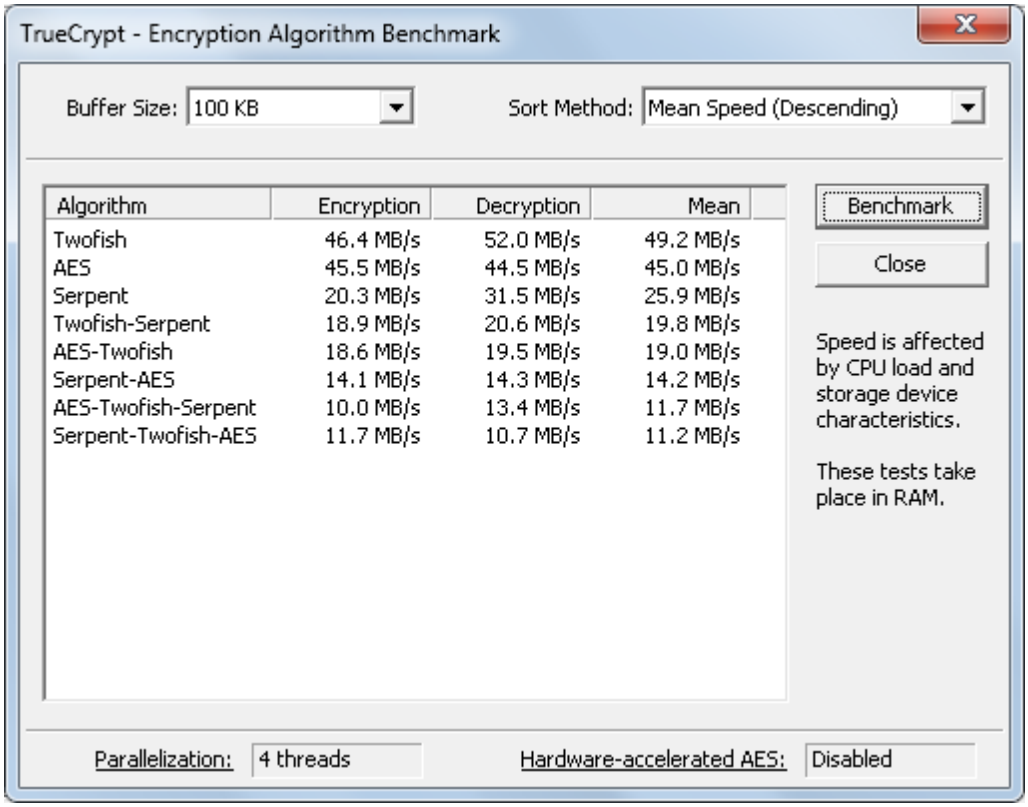
Keränen, Teeriaho. 2006. Salausmenetelmät osa 2. Luettu 15.4.2013. http://ta.ramk.fi/~jouko.teeriaho/krypto2006/salausmenetelmat2_7tiivisteetMACitallekirjoitus.pdf

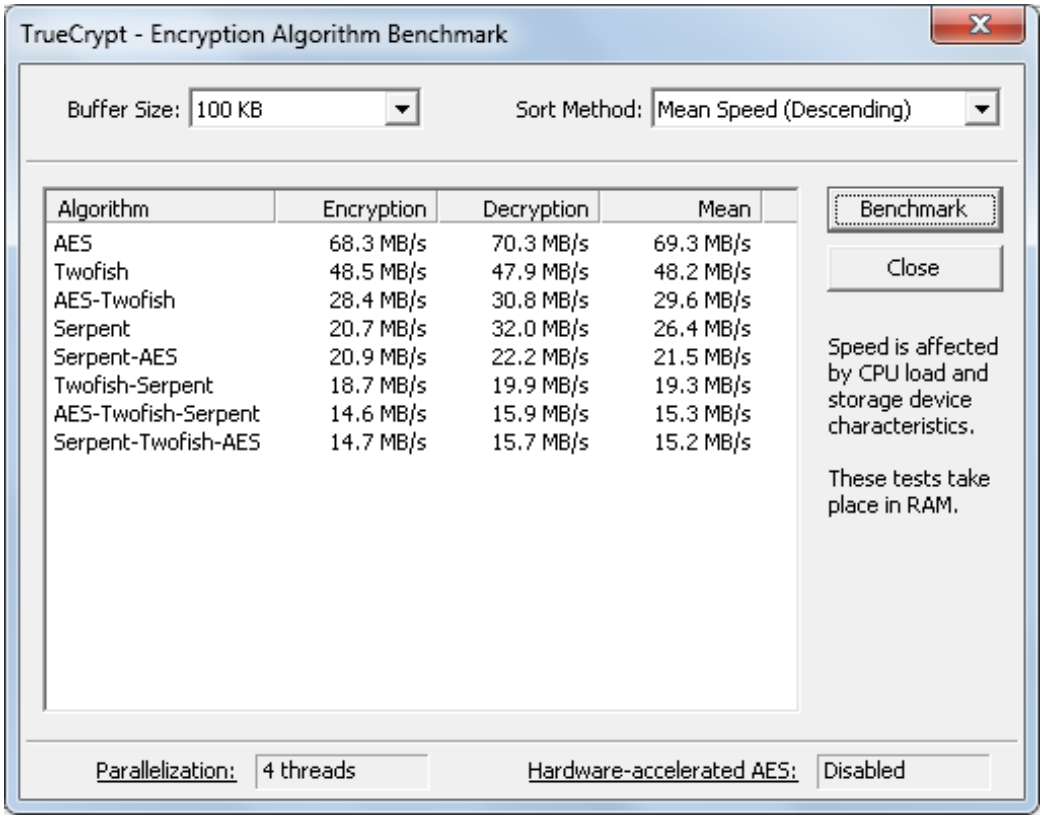
gKrypt. 2012. Luettu 24.4.2013. http://www.gkrypt.com/

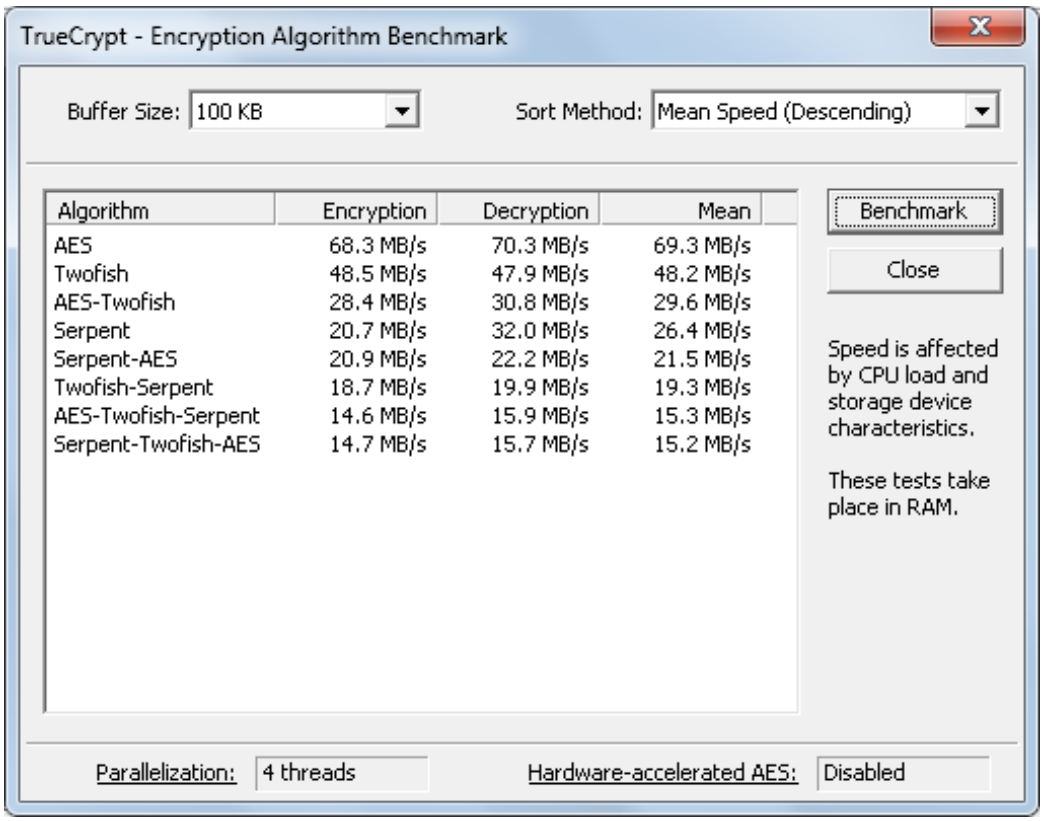
Learn Networking. 2008. The TCP/IP Stack and the OSI Model. http://learn-networking.com/tcp-ip/the-tcpip-stack-and-the-osi-model

LIITTEET

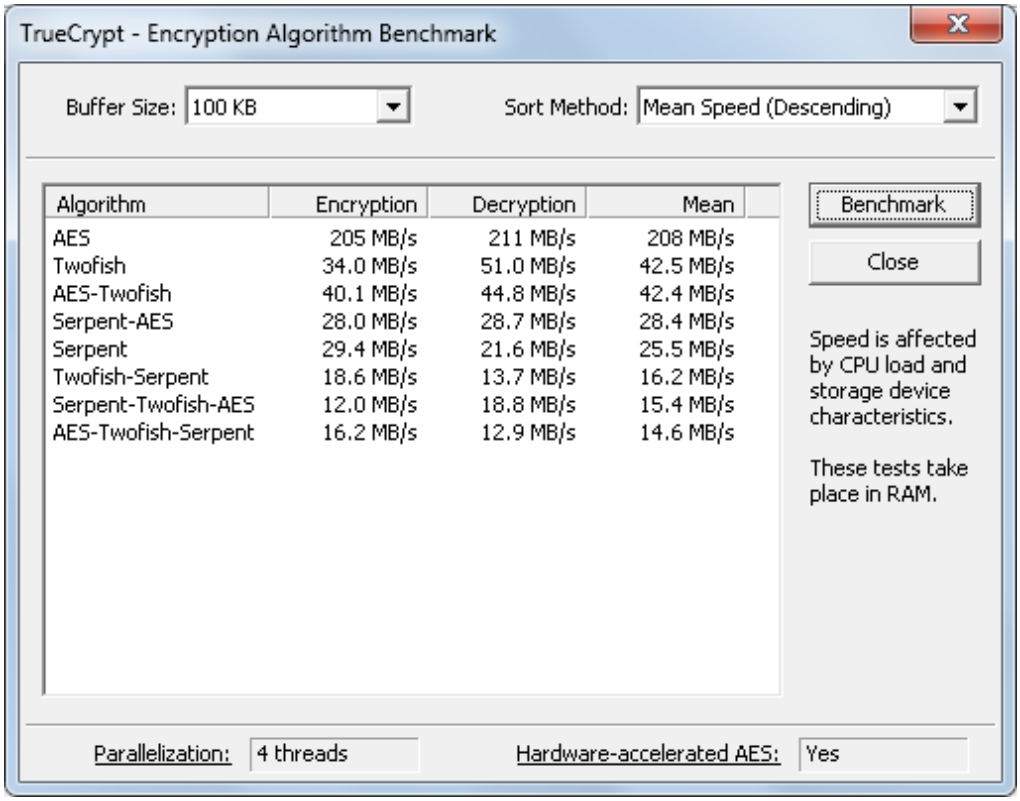
Liite 1. Suorituskykymittaus 100 Kt, aes-kiihdytys pois päältä

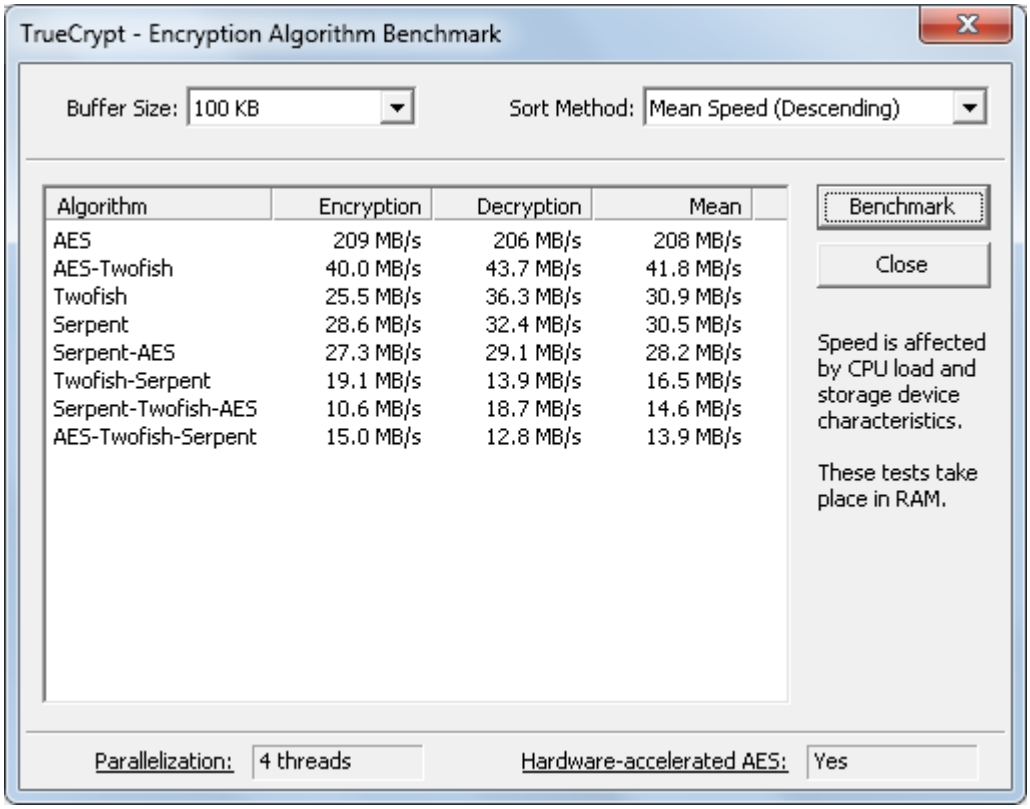


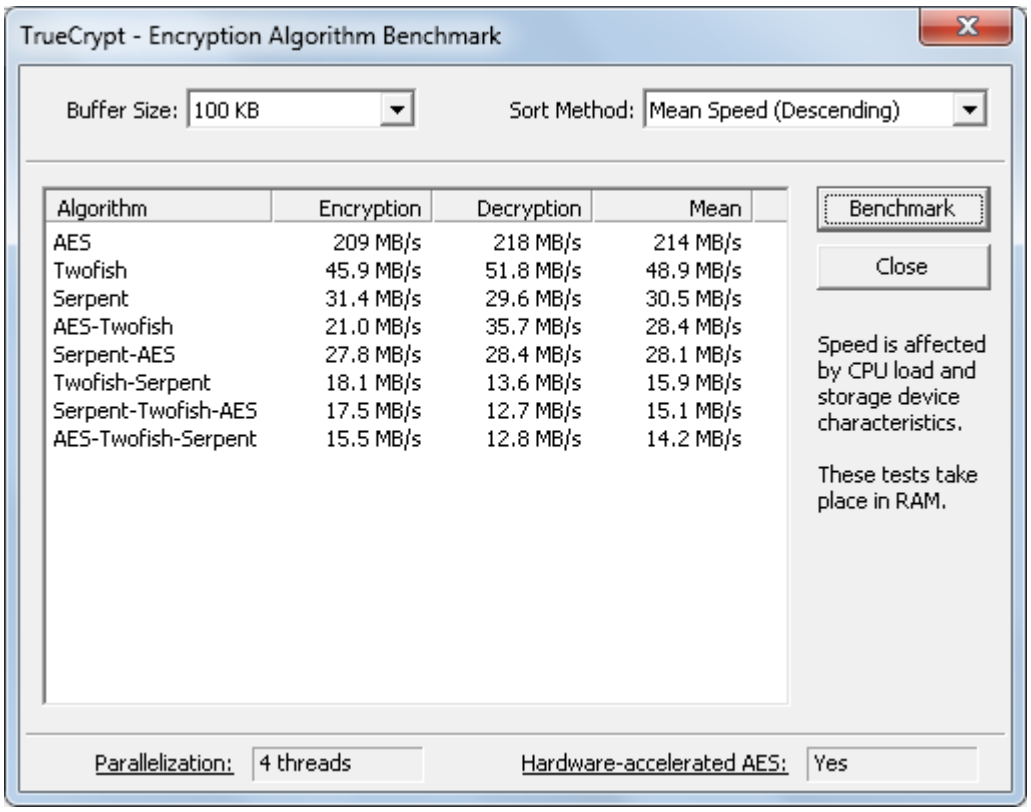



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 100 KB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 68.3 MB/s 70.3 MB/s 69.3 MB/s
Twofish 48.5 MB/s 47.9 MB/s 48.2 MB/s
AES-Twofish 28.4 MB/s 30.8 MB/s 29.6 MB/s
Serpent 20.7 MB/s 32.0 MB/s 26.4 MB/s
Serpent-AES 20.9 MB/s 22.2 MB/s 21.5 MB/s
Twofish-Serpent 18.7 MB/s 19.9 MB/s 19.3 MB/s
AES-Twofish-Serpent 14.6 MB/s 15.9 MB/s 15.3 MB/s
Serpent-Twofish-AES 14.7 MB/s 15.7 MB/s 15.2 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

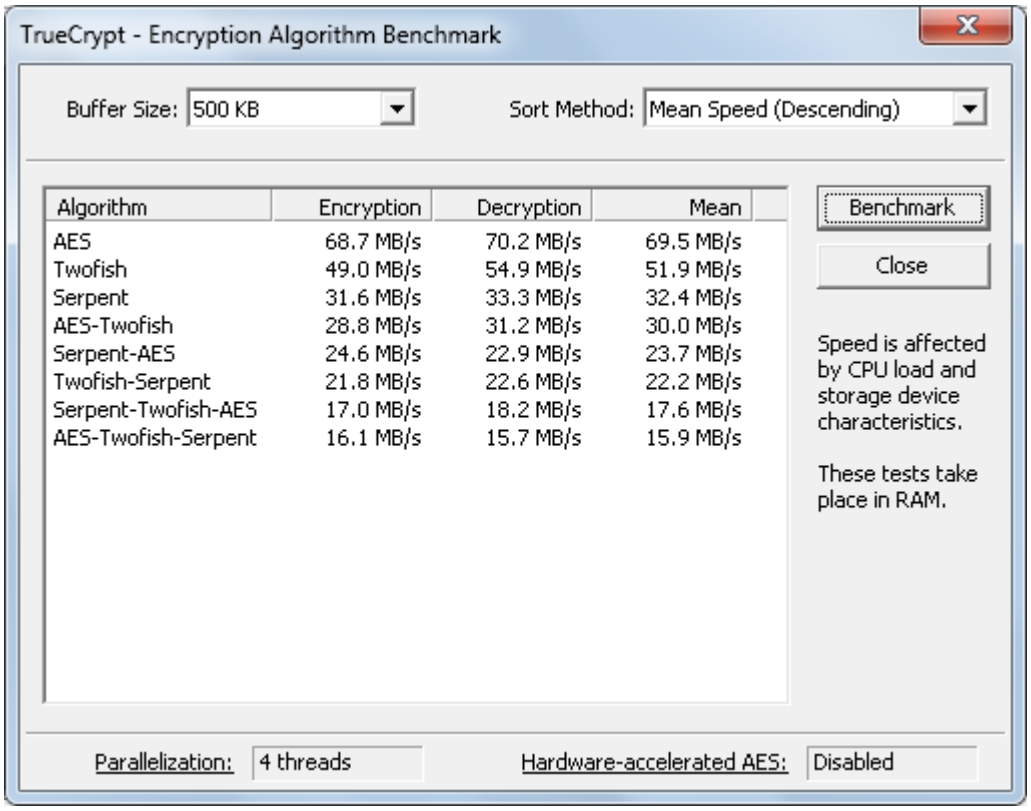
Liite 2. Suorituskykymittaus 100 Kt, aes-kiihdytys päällä

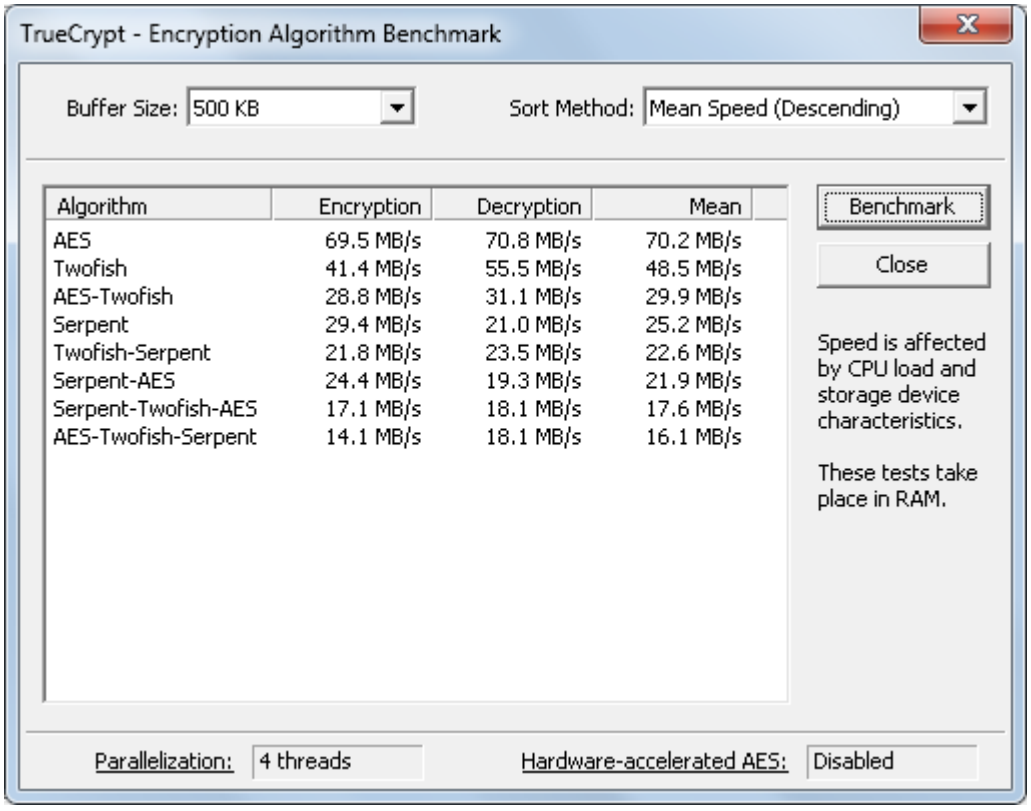


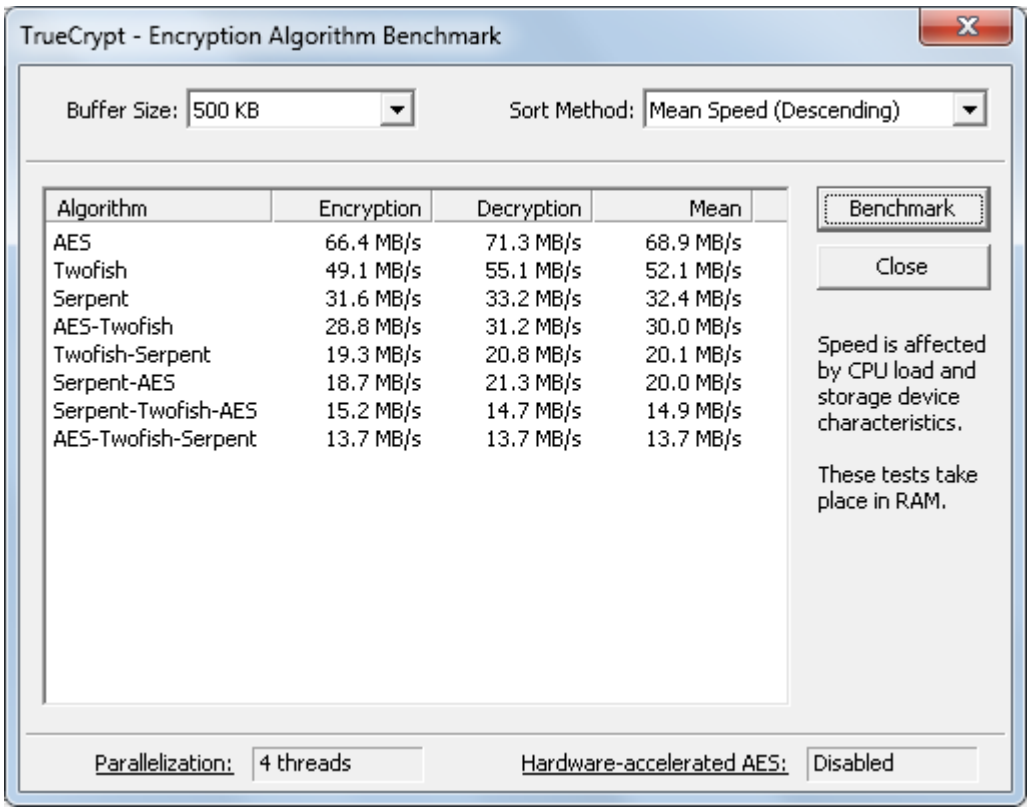



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 100 KB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 209 MB/s 218 MB/s 214 MB/s
Twofish 45.9 MB/s 51.8 MB/s 48.9 MB/s
Serpent 31.4 MB/s 29.6 MB/s 30.5 MB/s
AES-Twofish 21.0 MB/s 35.7 MB/s 28.4 MB/s
Serpent-AES 27.8 MB/s 28.4 MB/s 28.1 MB/s
Twofish-Serpent 18.1 MB/s 13.6 MB/s 15.9 MB/s
Serpent-Twofish-AES 17.5 MB/s 12.7 MB/s 15.1 MB/s
AES-Twofish-Serpent 15.5 MB/s 12.8 MB/s 14.2 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

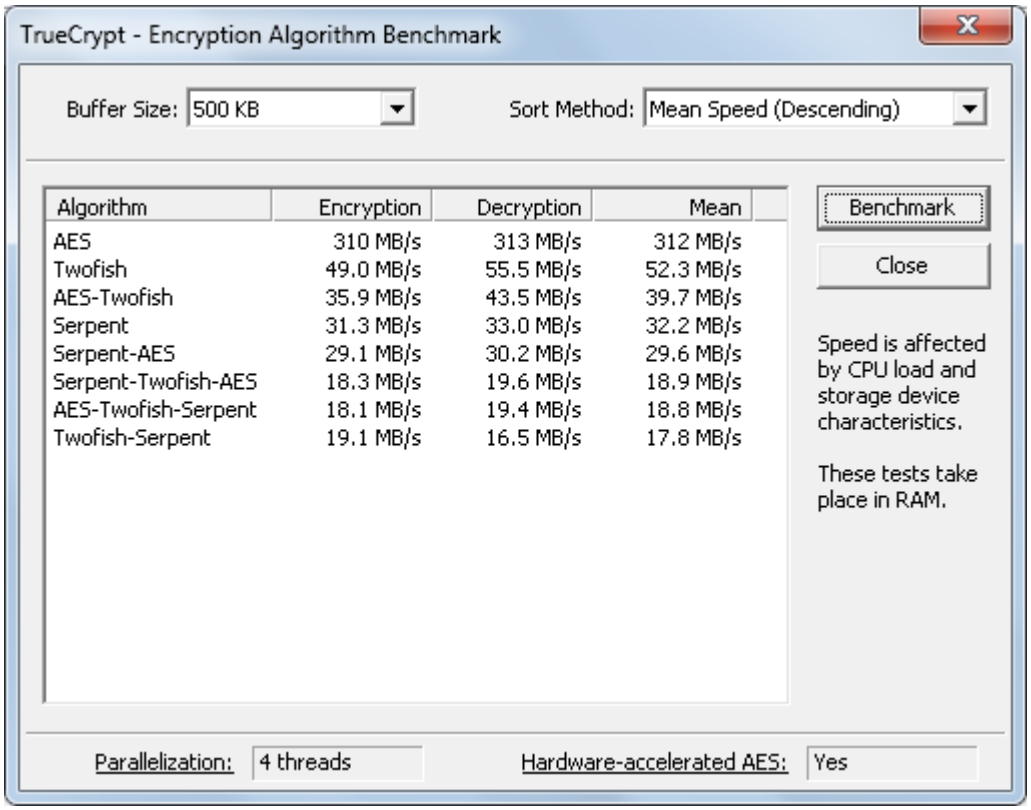
Liite 3. Suorituskykymittaus 500 Kt, aes-kiihdytys pois päältä

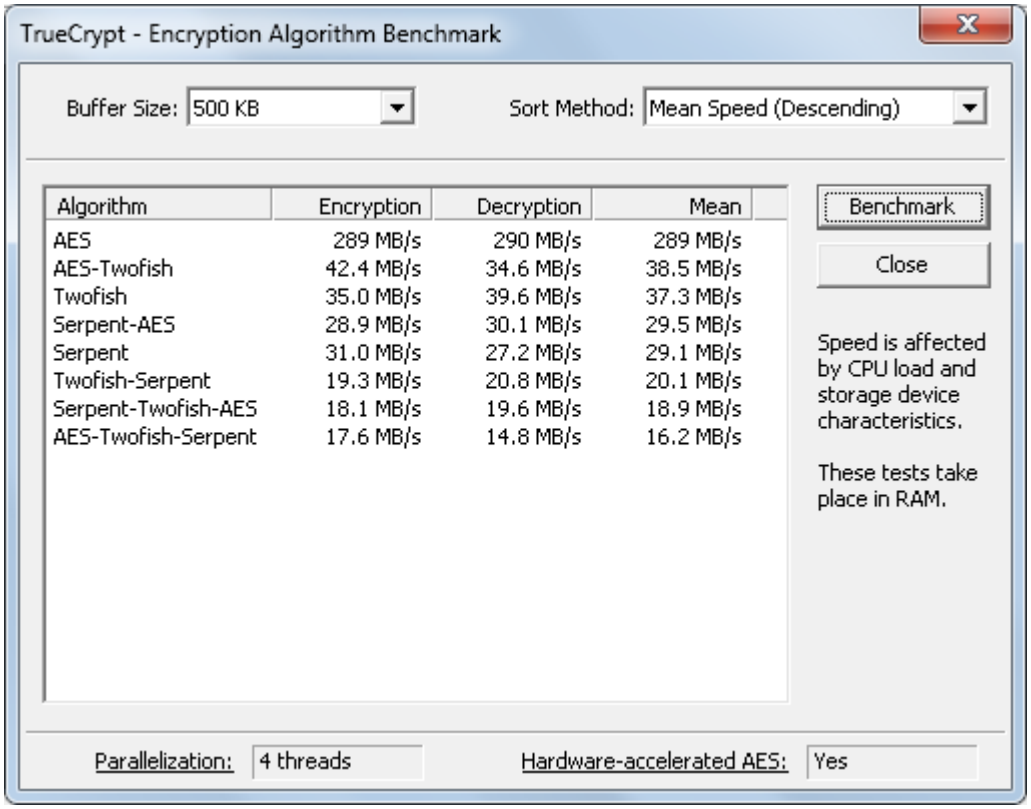


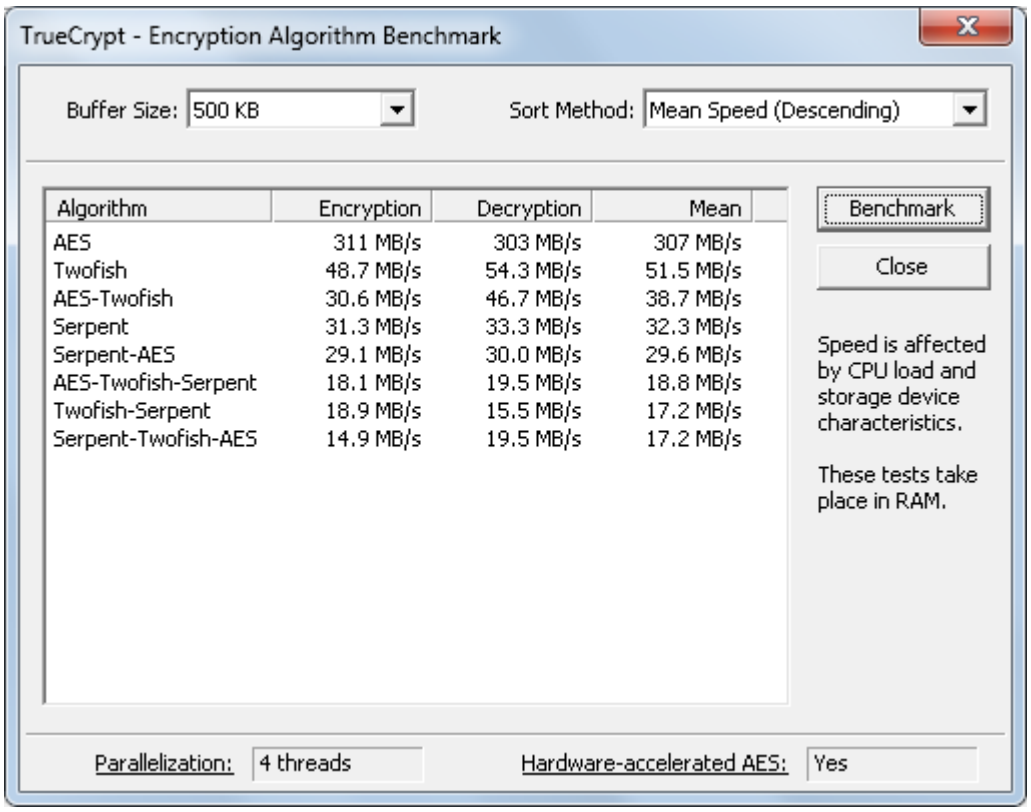



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 500 KB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 66.4 MB/s 71.3 MB/s 68.9 MB/s
Twofish 49.1 MB/s 55.1 MB/s 52.1 MB/s
Serpent 31.6 MB/s 33.2 MB/s 32.4 MB/s
AES-Twofish 28.8 MB/s 31.2 MB/s 30.0 MB/s
Twofish-Serpent 19.3 MB/s 20.8 MB/s 20.1 MB/s
Serpent-AES 18.7 MB/s 21.3 MB/s 20.0 MB/s
Serpent-Twofish-AES 15.2 MB/s 14.7 MB/s 14.9 MB/s
AES-Twofish-Serpent 13.7 MB/s 13.7 MB/s 13.7 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

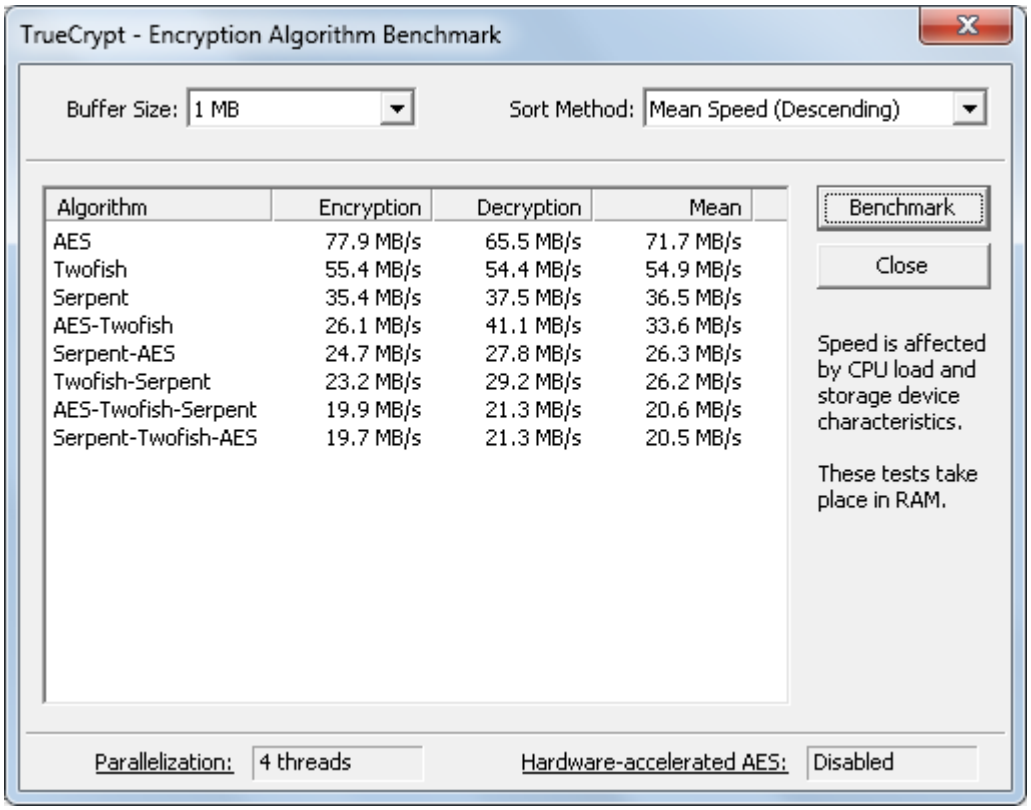
Liite 4. Suorituskykymittaus 500 Kt, aes-kiihdytys päällä

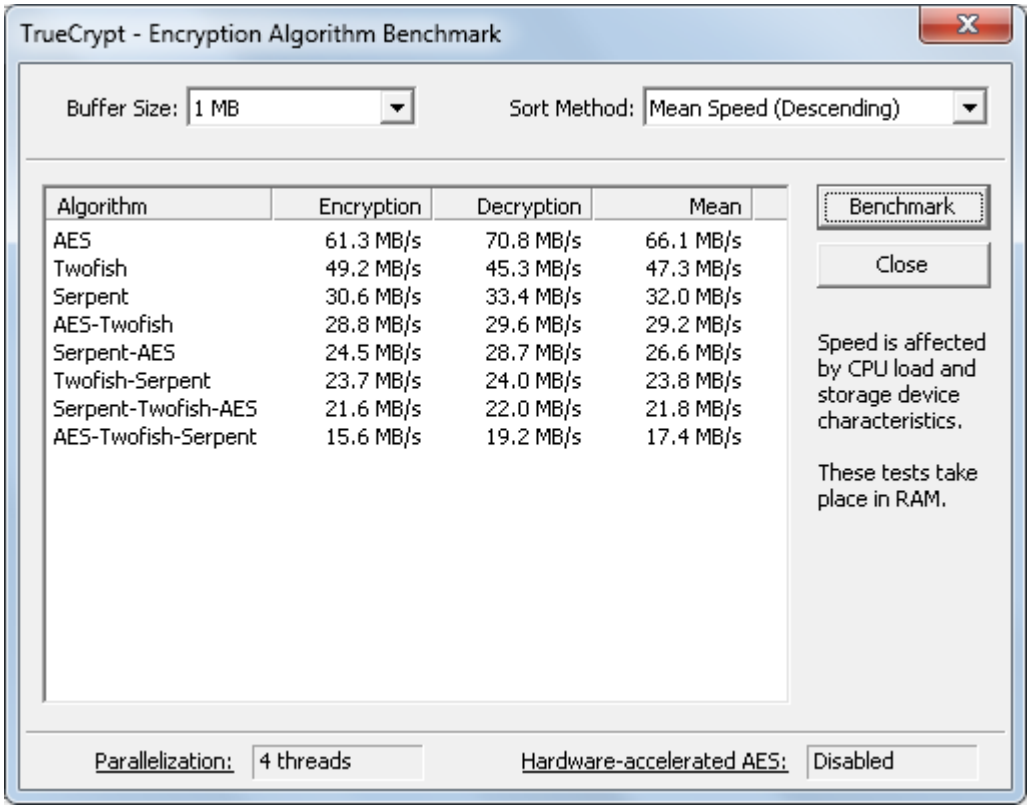


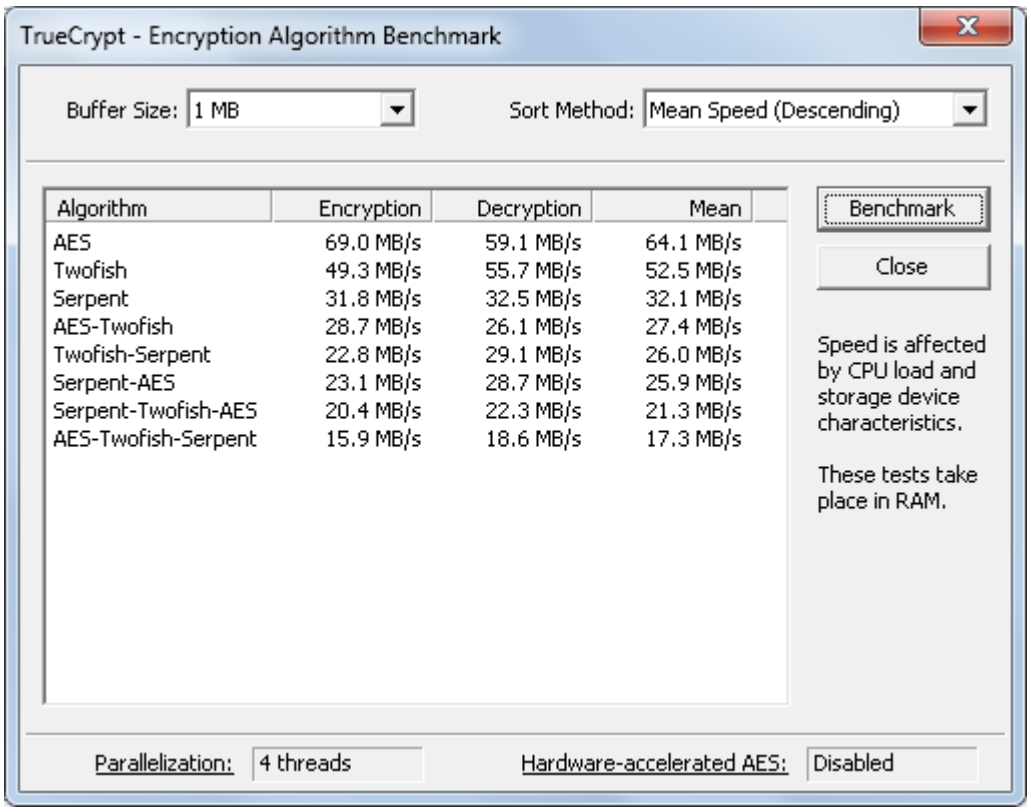



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 500 KB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 311 MB/s 303 MB/s 307 MB/s
Twofish 48.7 MB/s 54.3 MB/s 51.5 MB/s
AES-Twofish 30.6 MB/s 46.7 MB/s 38.7 MB/s
Serpent 31.3 MB/s 33.3 MB/s 32.3 MB/s
Serpent-AES 29.1 MB/s 30.0 MB/s 29.6 MB/s
AES-Twofish-Serpent 18.1 MB/s 19.5 MB/s 18.8 MB/s
Twofish-Serpent 18.9 MB/s 15.5 MB/s 17.2 MB/s
Serpent-Twofish-AES 14.9 MB/s 19.5 MB/s 17.2 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

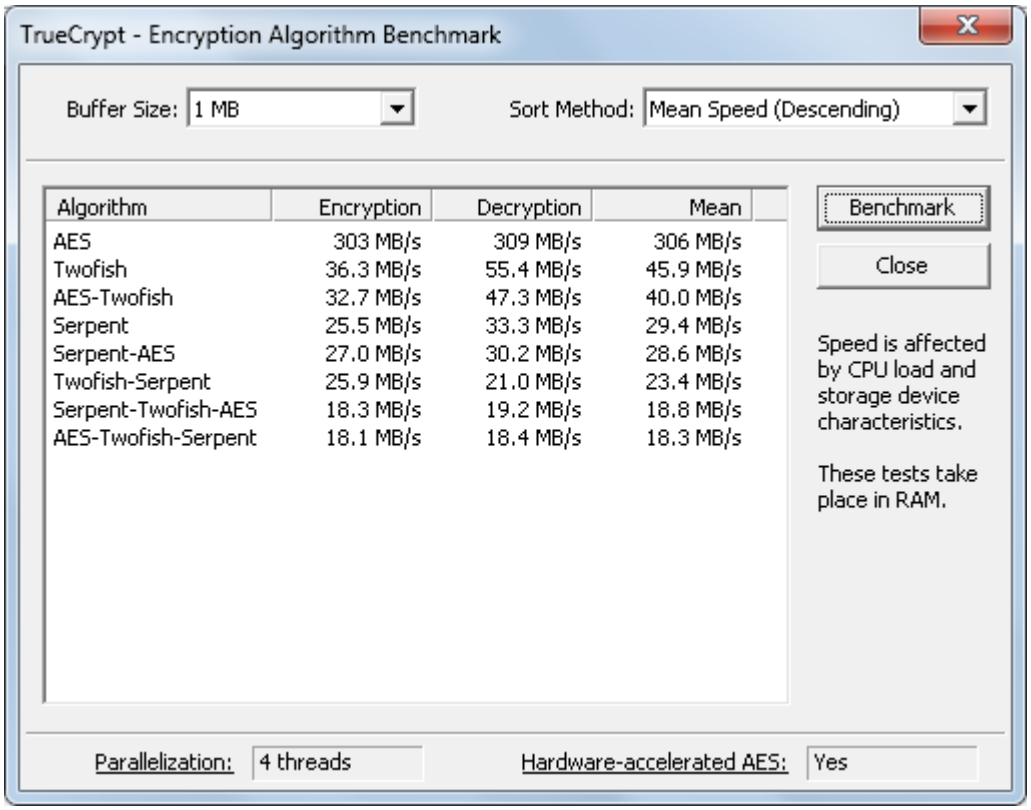
Liite 5. Suorituskykymittaus 1 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

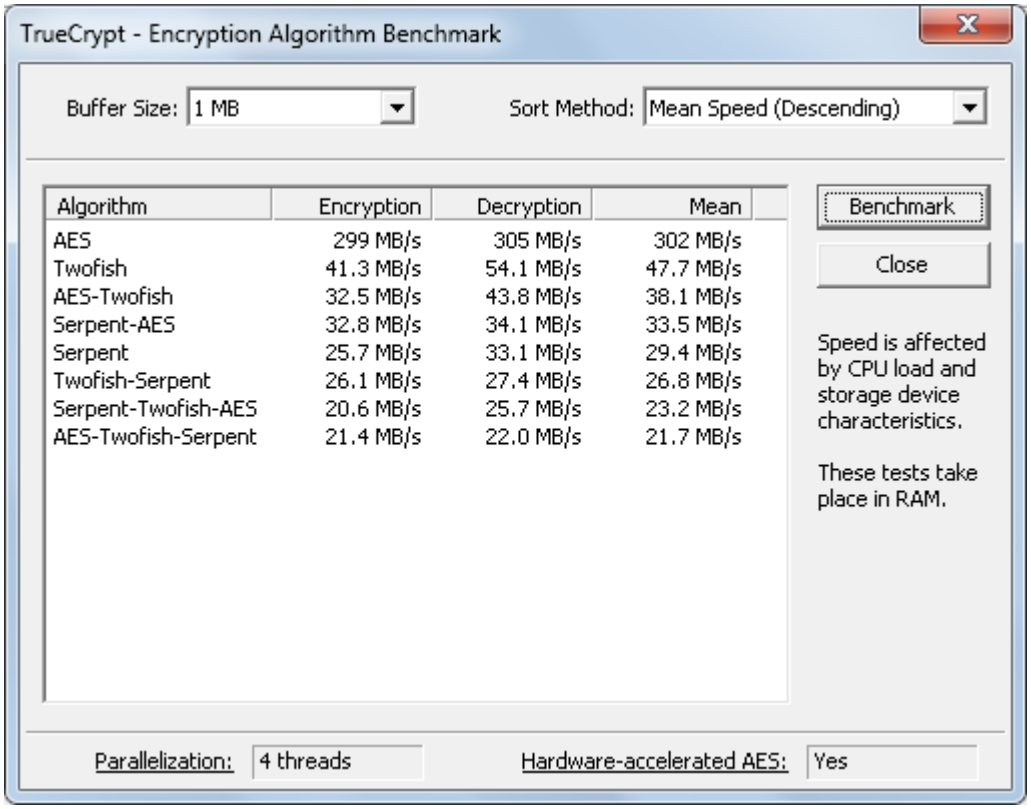


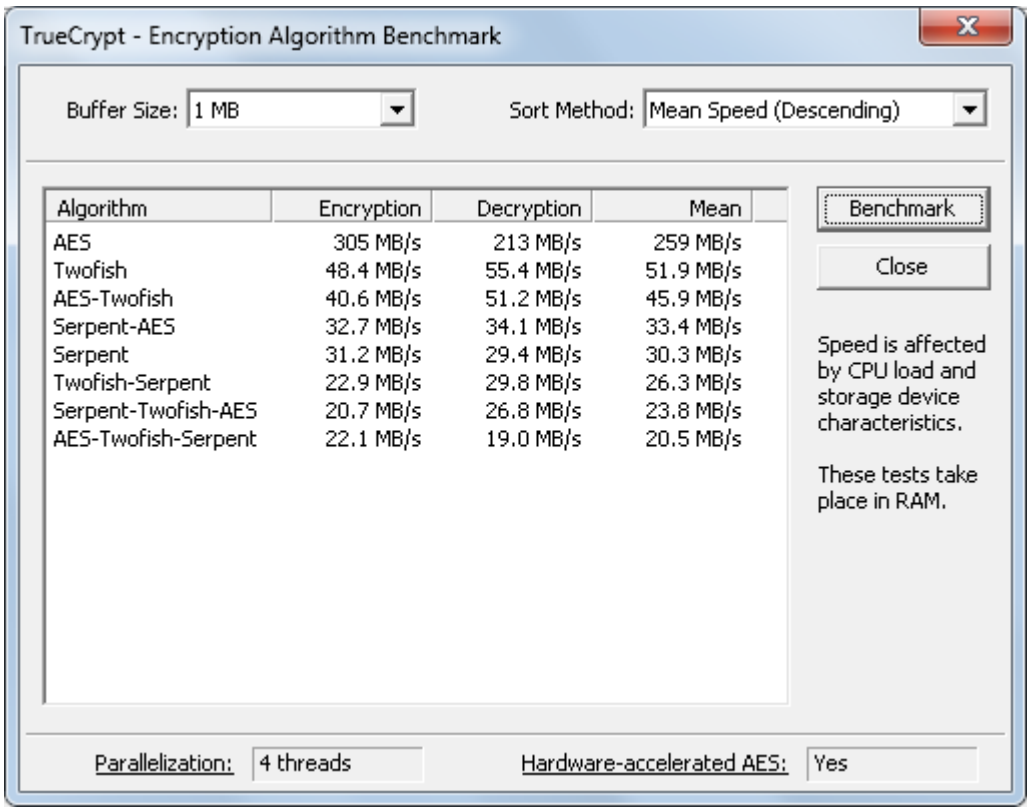



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 1 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 69.0 MB/s 59.1 MB/s 64.1 MB/s
Twofish 49.3 MB/s 55.7 MB/s 52.5 MB/s
Serpent 31.8 MB/s 32.5 MB/s 32.1 MB/s
AES-Twofish 28.7 MB/s 26.1 MB/s 27.4 MB/s
Twofish-Serpent 22.8 MB/s 29.1 MB/s 26.0 MB/s
Serpent-AES 23.1 MB/s 28.7 MB/s 25.9 MB/s
Serpent-Twofish-AES 20.4 MB/s 22.3 MB/s 21.3 MB/s
AES-Twofish-Serpent 15.9 MB/s 18.6 MB/s 17.3 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

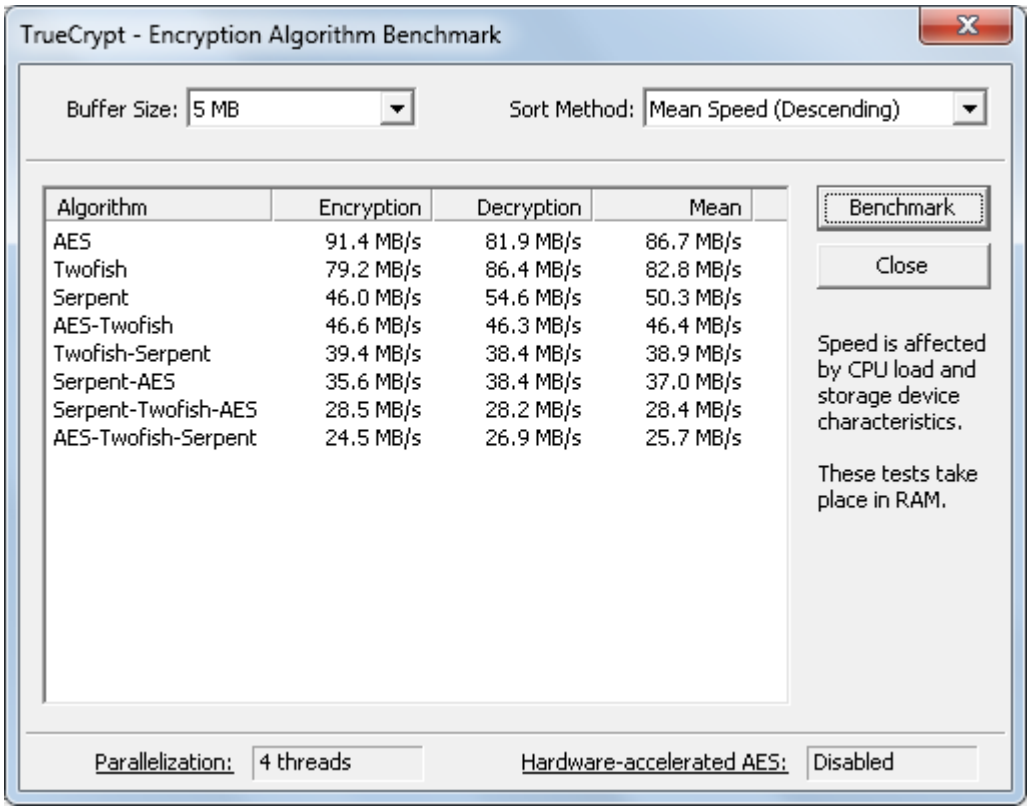
Liite 6. Suorituskykymittaus 1 Mt, aes-kiihdytys päällä

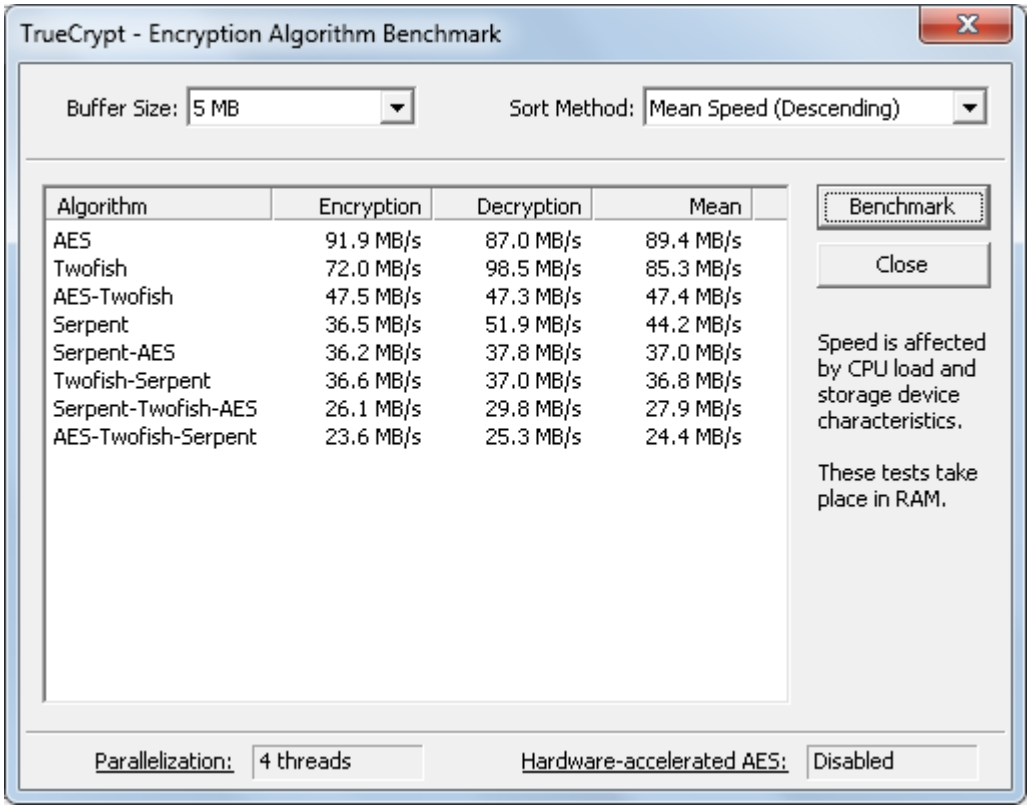


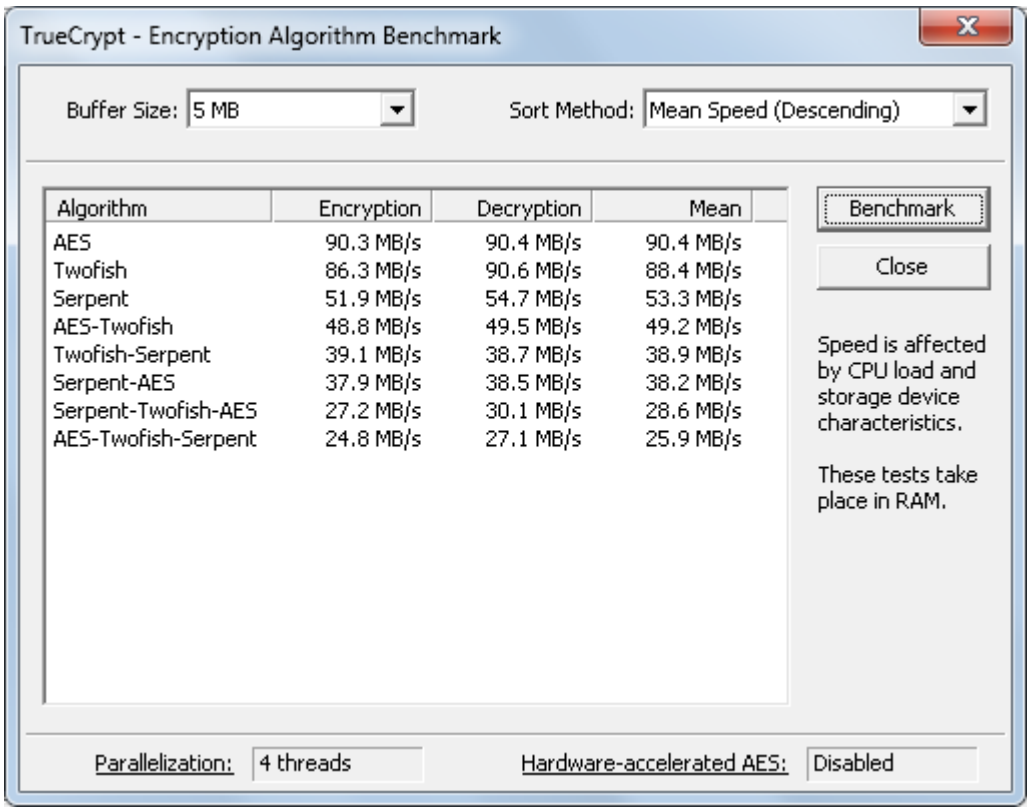



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 1 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 305 MB/s 213 MB/s 259 MB/s
Twofish 48.4 MB/s 55.4 MB/s 51.9 MB/s
AES-Twofish 40.6 MB/s 51.2 MB/s 45.9 MB/s
Serpent-AES 32.7 MB/s 34.1 MB/s 33.4 MB/s
Serpent 31.2 MB/s 29.4 MB/s 30.3 MB/s
Twofish-Serpent 22.9 MB/s 29.8 MB/s 26.3 MB/s
Serpent-Twofish-AES 20.7 MB/s 26.8 MB/s 23.8 MB/s
AES-Twofish-Serpent 22.1 MB/s 19.0 MB/s 20.5 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

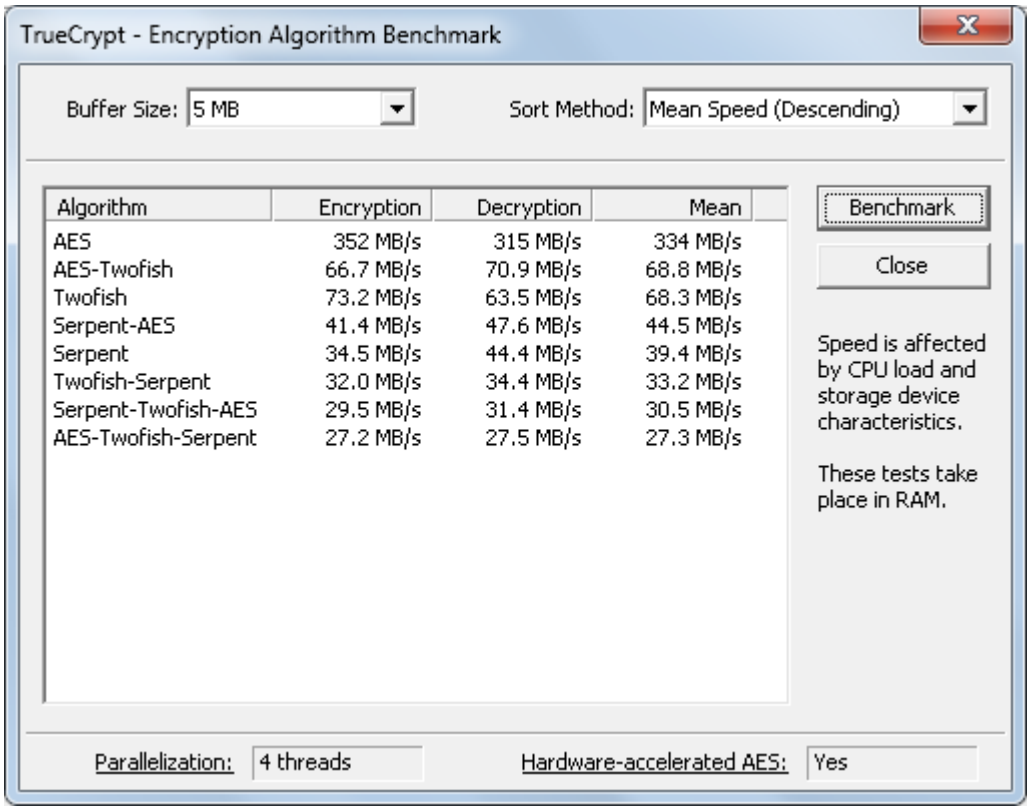
Liite 7. Suorituskykymittaus 5 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

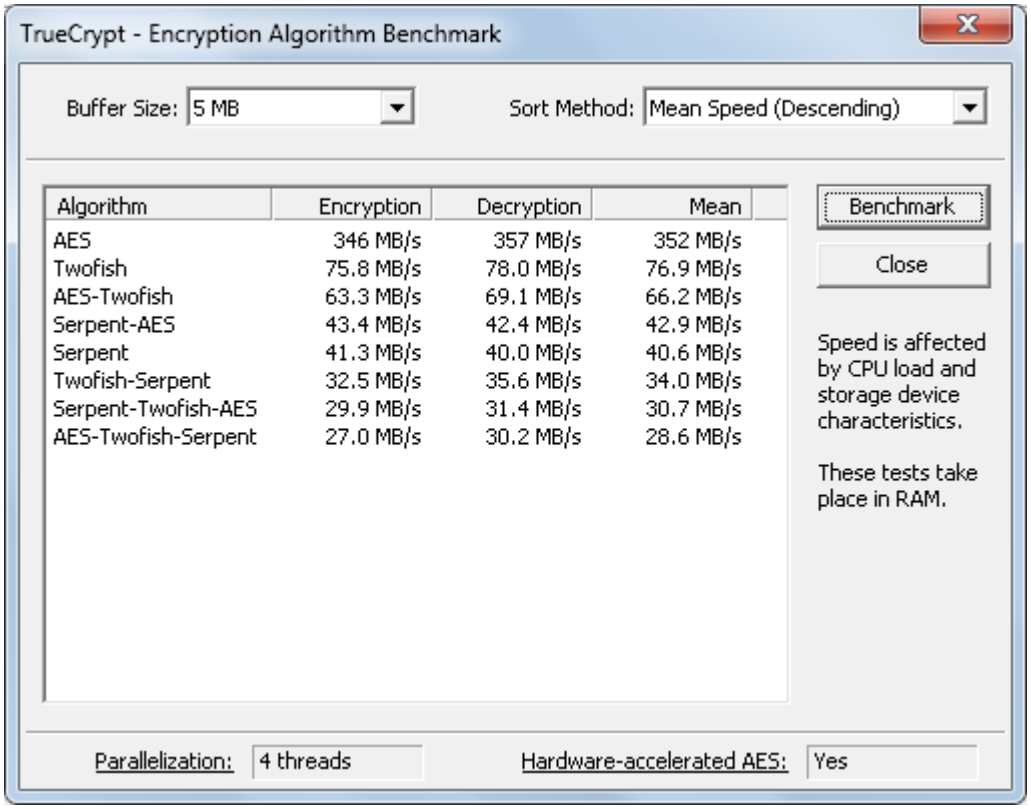


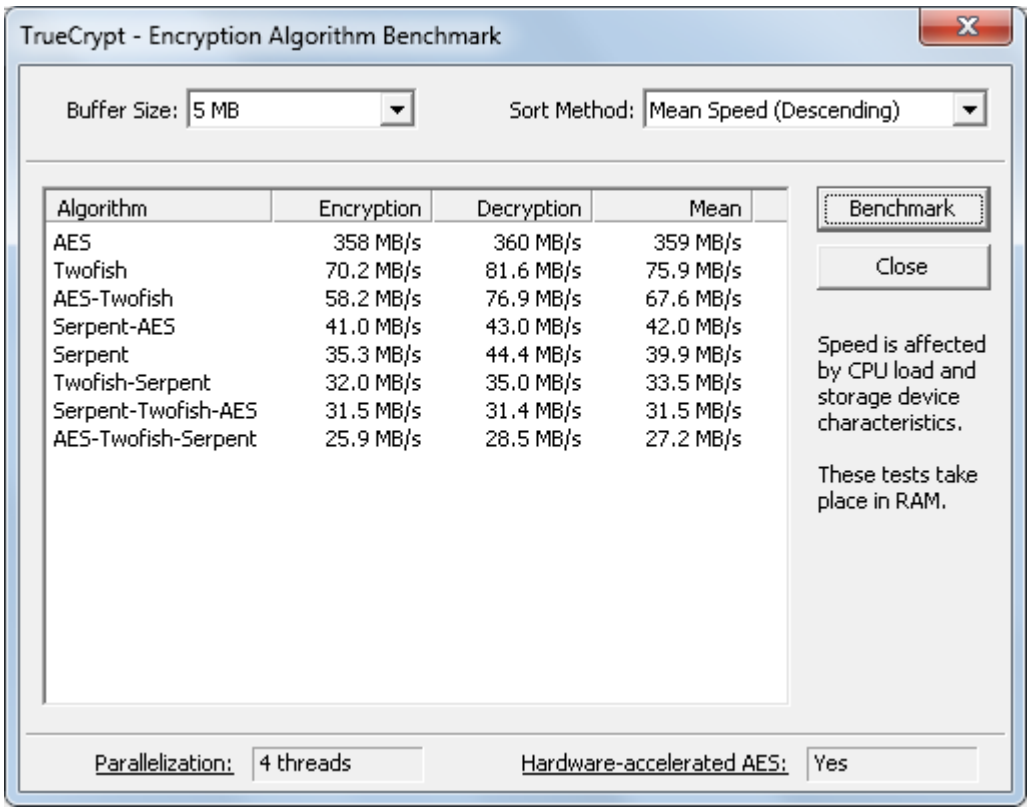



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 5 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 90.3 MB/s 90.4 MB/s 90.4 MB/s
Twofish 86.3 MB/s 90.6 MB/s 88.4 MB/s
Serpent 51.9 MB/s 54.7 MB/s 53.3 MB/s
AES-Twofish 48.8 MB/s 49.5 MB/s 49.2 MB/s
Twofish-Serpent 39.1 MB/s 38.7 MB/s 38.9 MB/s
Serpent-AES 37.9 MB/s 38.5 MB/s 38.2 MB/s
Serpent-Twofish-AES 27.2 MB/s 30.1 MB/s 28.6 MB/s
AES-Twofish-Serpent 24.8 MB/s 27.1 MB/s 25.9 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

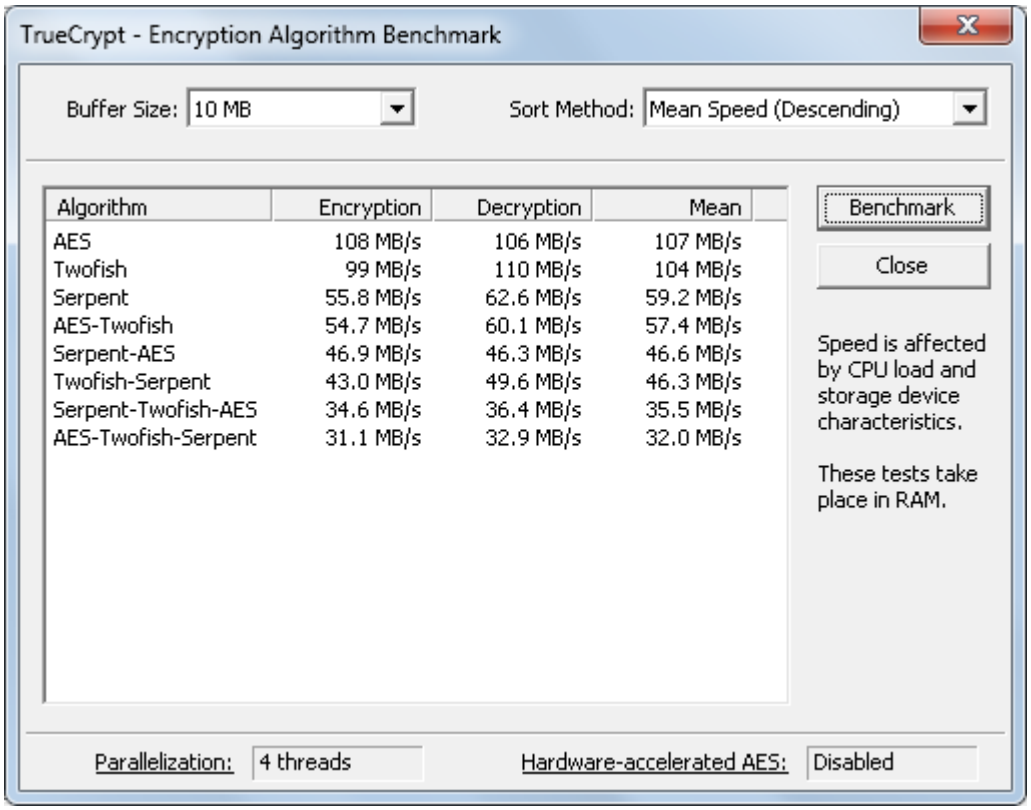
Liite 8. Suorituskykymittaus 5 Mt, aes-kiihdytys päällä

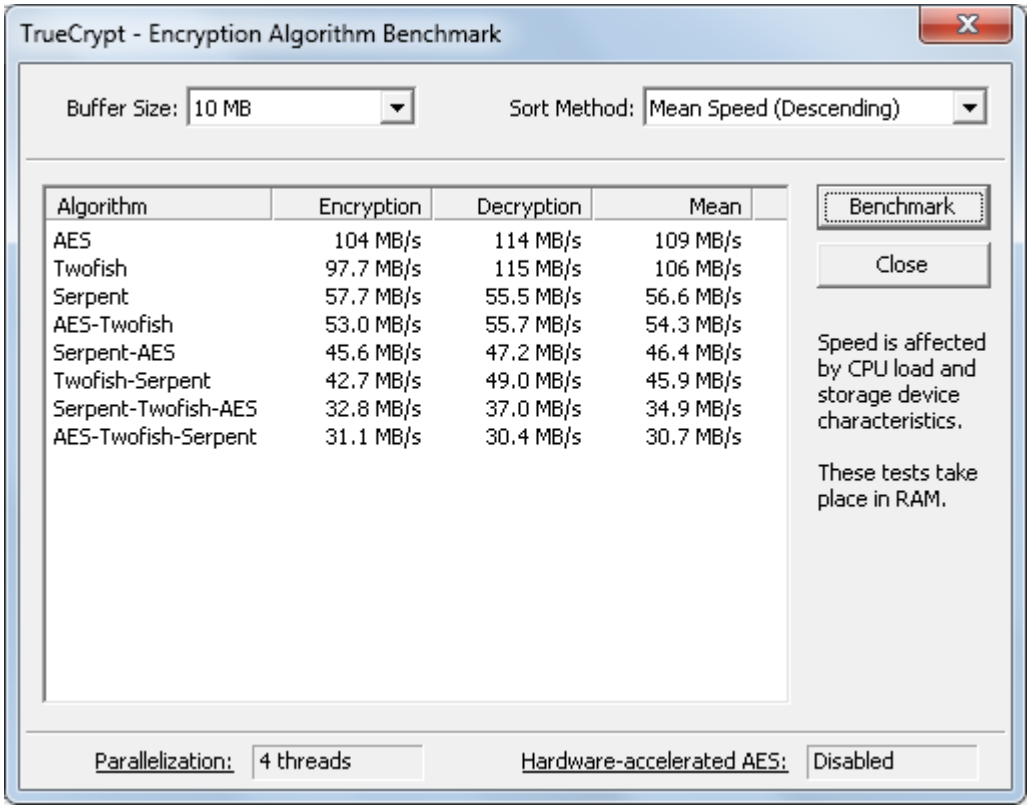


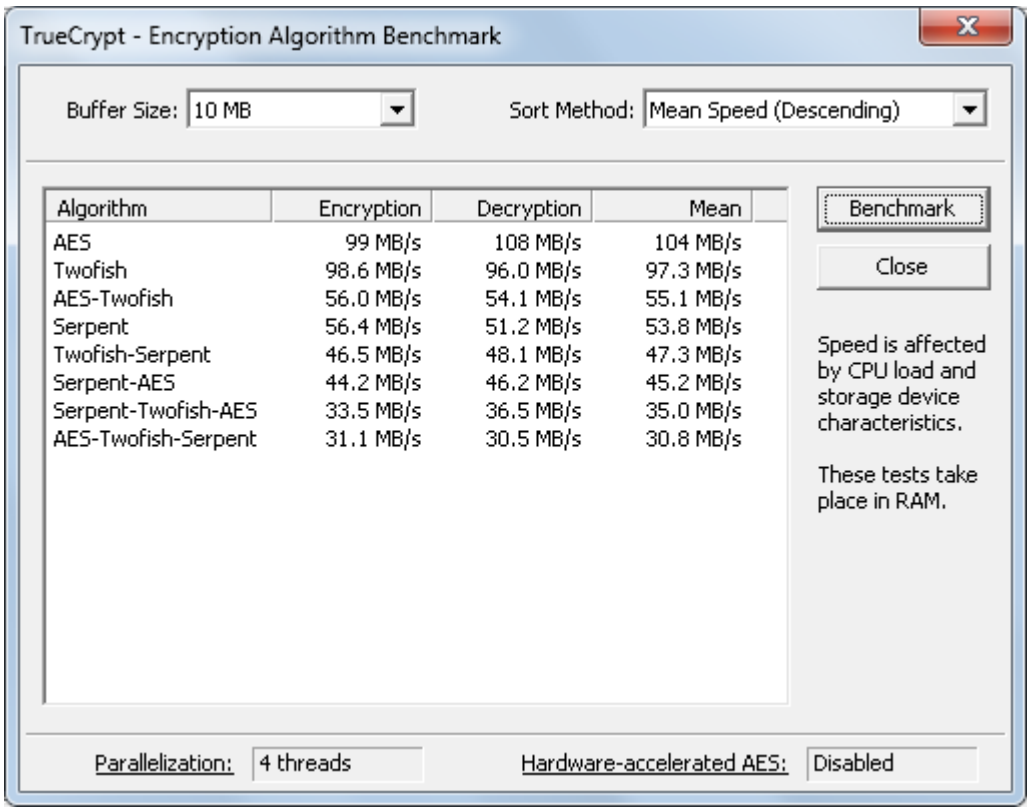



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 5 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 358 MB/s 360 MB/s 359 MB/s
Twofish 70.2 MB/s 81.6 MB/s 75.9 MB/s
AES-Twofish 58.2 MB/s 76.9 MB/s 67.6 MB/s
Serpent-AES 41.0 MB/s 43.0 MB/s 42.0 MB/s
Serpent 35.3 MB/s 44.4 MB/s 39.9 MB/s
Twofish-Serpent 32.0 MB/s 35.0 MB/s 33.5 MB/s
Serpent-Twofish-AES 31.5 MB/s 31.4 MB/s 31.5 MB/s
AES-Twofish-Serpent 25.9 MB/s 28.5 MB/s 27.2 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

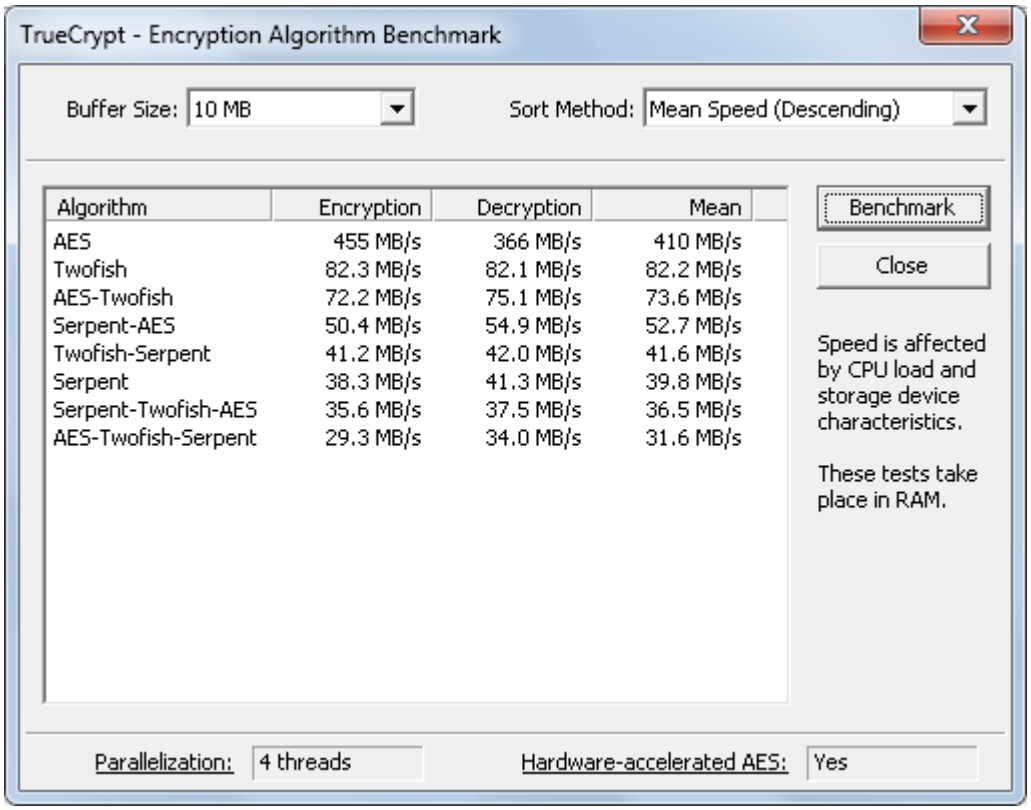
Liite 9. Suorituskykymittaus 10 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

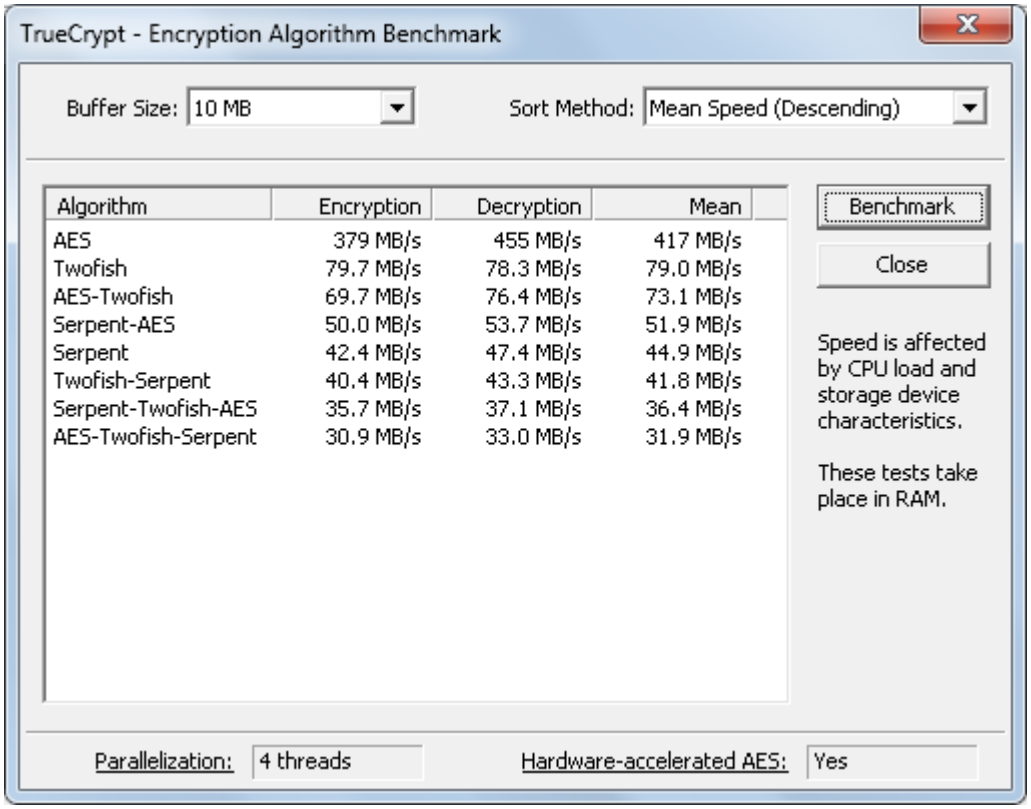


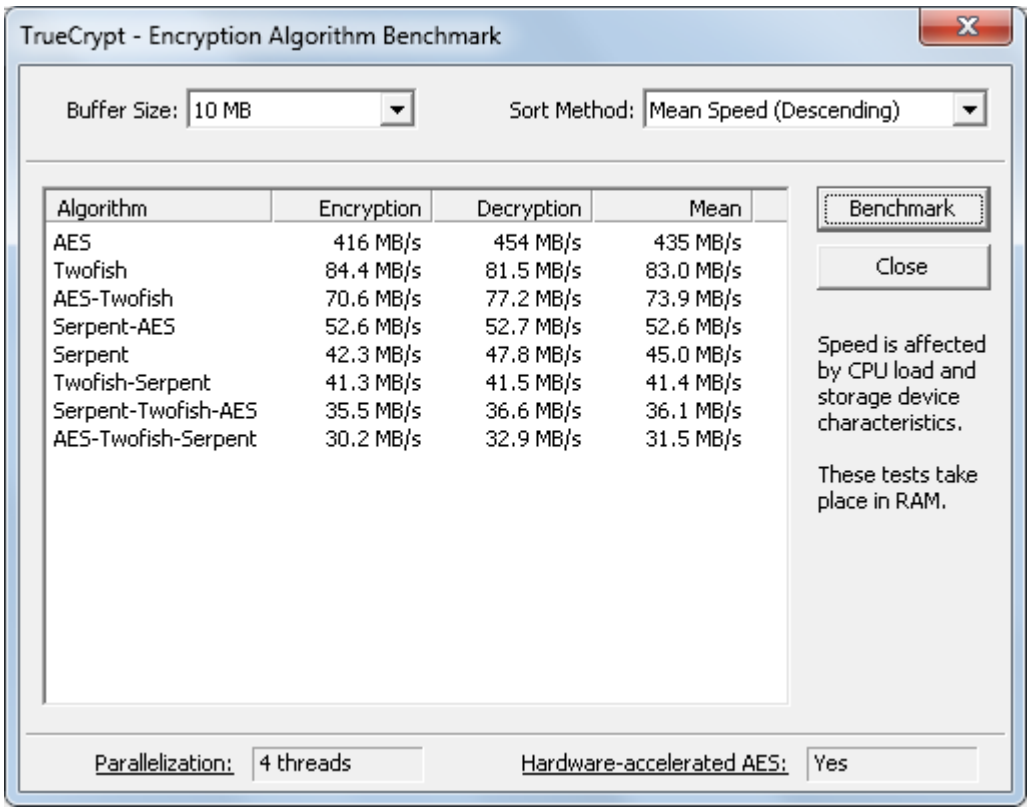



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 10 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 99 MB/s 108 MB/s 104 MB/s
Twofish 98.6 MB/s 96.0 MB/s 97.3 MB/s
AES-Twofish 56.0 MB/s 54.1 MB/s 55.1 MB/s
Serpent 56.4 MB/s 51.2 MB/s 53.8 MB/s
Twofish-Serpent 46.5 MB/s 48.1 MB/s 47.3 MB/s
Serpent-AES 44.2 MB/s 46.2 MB/s 45.2 MB/s
Serpent-Twofish-AES 33.5 MB/s 36.5 MB/s 35.0 MB/s
AES-Twofish-Serpent 31.1 MB/s 30.5 MB/s 30.8 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

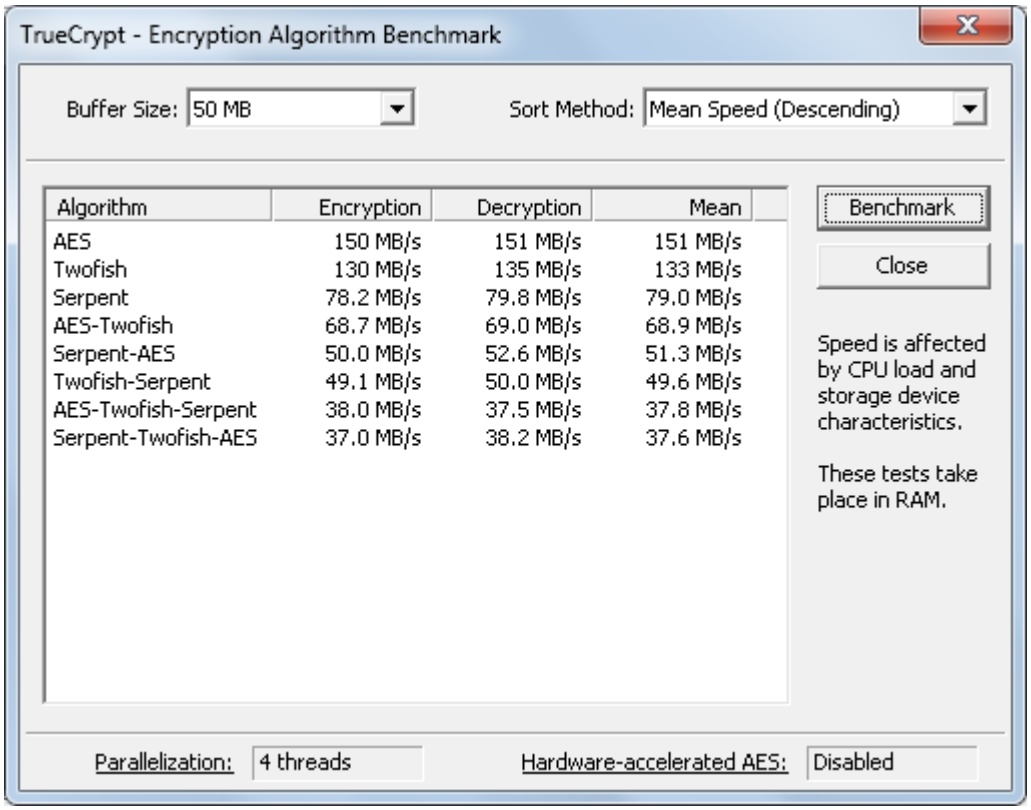
Liite 10. Suorituskykymittaus 10 Mt, aes-kiihdytys päällä

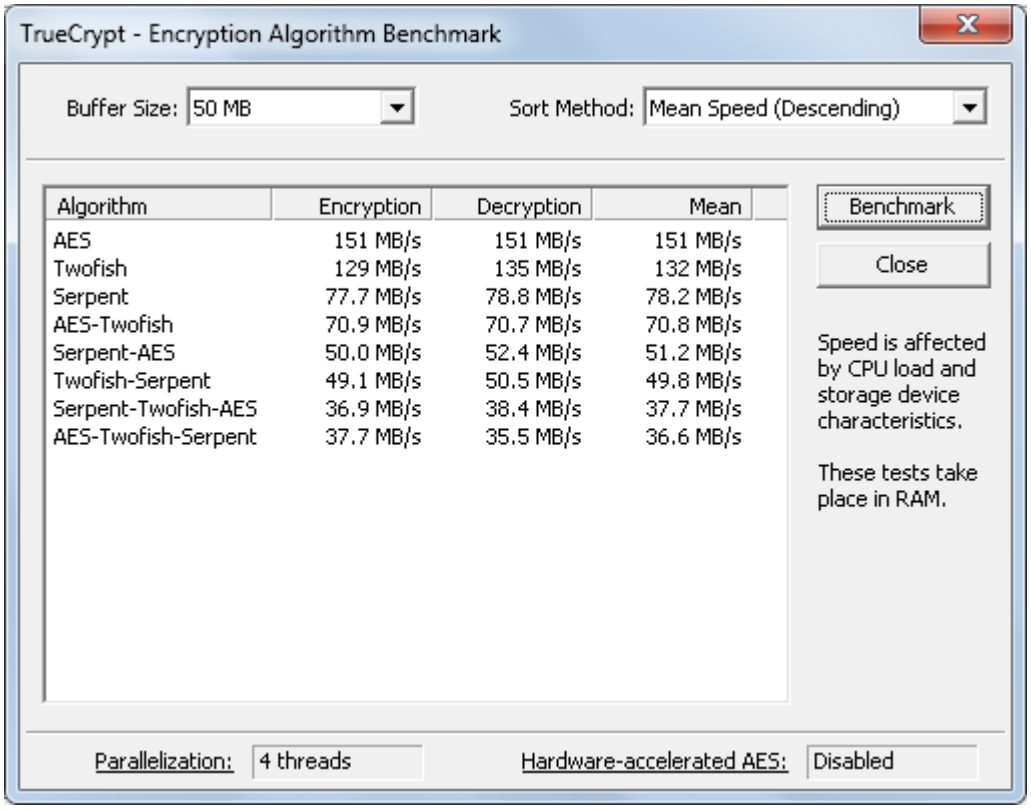


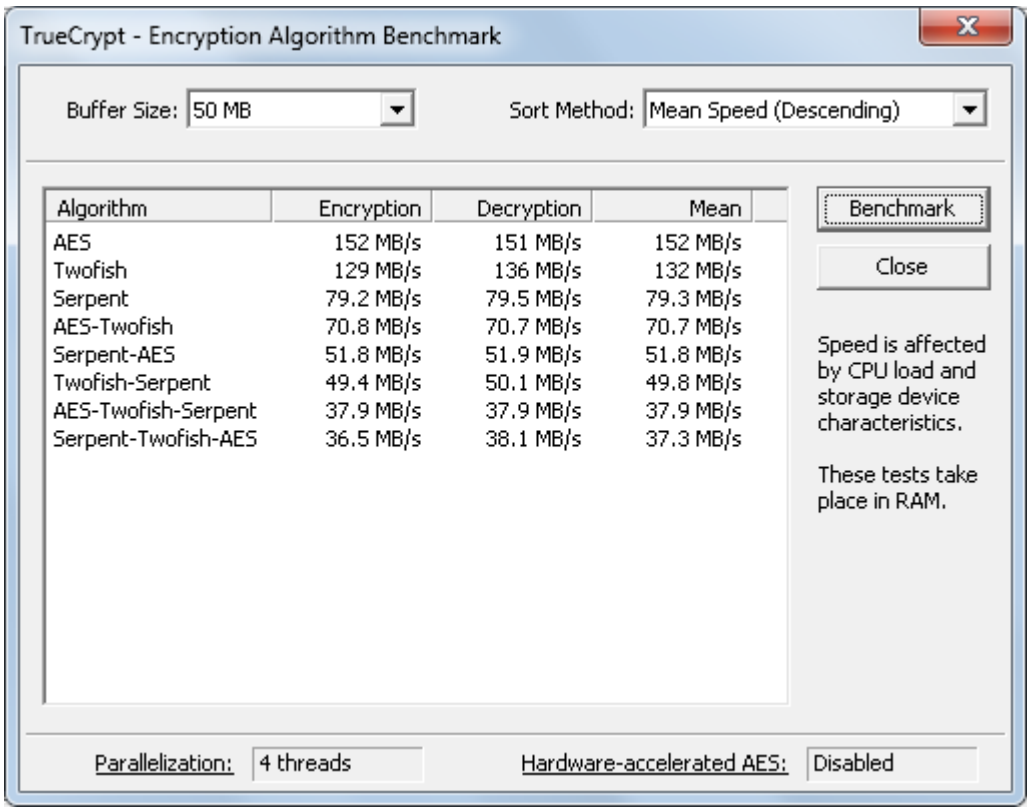



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 10 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 416 MB/s 454 MB/s 435 MB/s
Twofish 84.4 MB/s 81.5 MB/s 83.0 MB/s
AES-Twofish 70.6 MB/s 77.2 MB/s 73.9 MB/s
Serpent-AES 52.6 MB/s 52.7 MB/s 52.6 MB/s
Serpent 42.3 MB/s 47.8 MB/s 45.0 MB/s
Twofish-Serpent 41.3 MB/s 41.5 MB/s 41.4 MB/s
Serpent-Twofish-AES 35.5 MB/s 36.6 MB/s 36.1 MB/s
AES-Twofish-Serpent 30.2 MB/s 32.9 MB/s 31.5 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

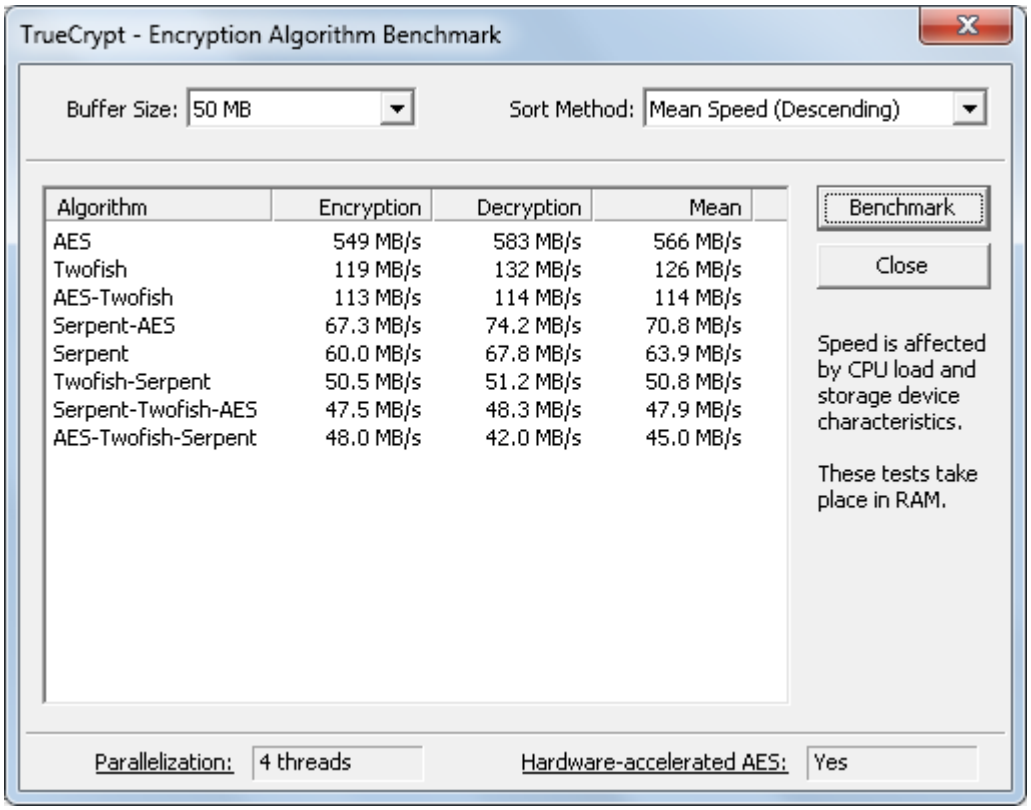
Liite 11. Suorituskykymittaus 50 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

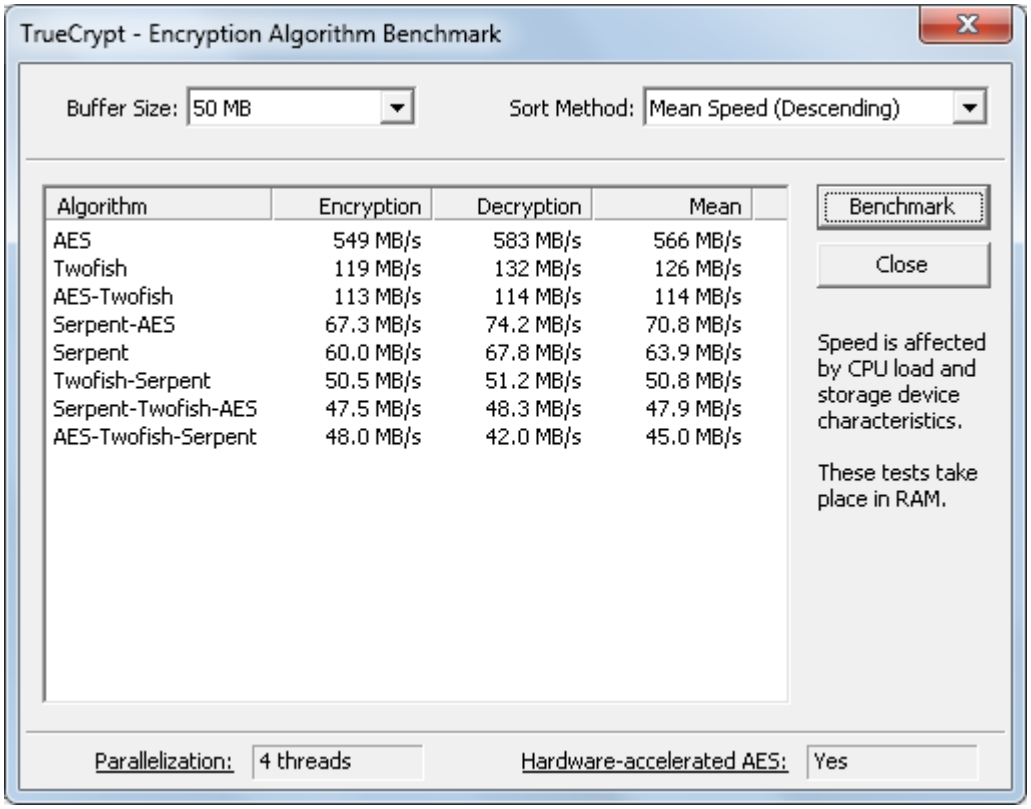


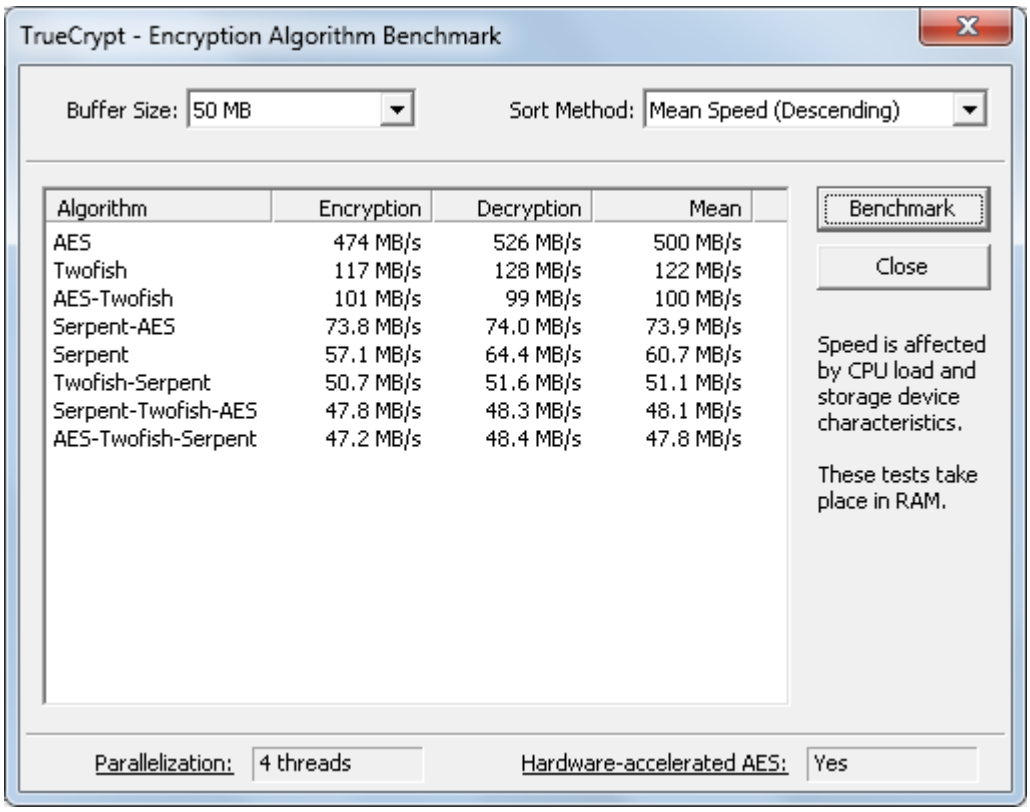



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 50 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 152 MB/s 151 MB/s 152 MB/s
Twofish 129 MB/s 136 MB/s 132 MB/s
Serpent 79.2 MB/s 79.5 MB/s 79.3 MB/s
AES-Twofish 70.8 MB/s 70.7 MB/s 70.7 MB/s
Serpent-AES 51.8 MB/s 51.9 MB/s 51.8 MB/s
Twofish-Serpent 49.4 MB/s 50.1 MB/s 49.8 MB/s
AES-Twofish-Serpent 37.9 MB/s 37.9 MB/s 37.9 MB/s
Serpent-Twofish-AES 36.5 MB/s 38.1 MB/s 37.3 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

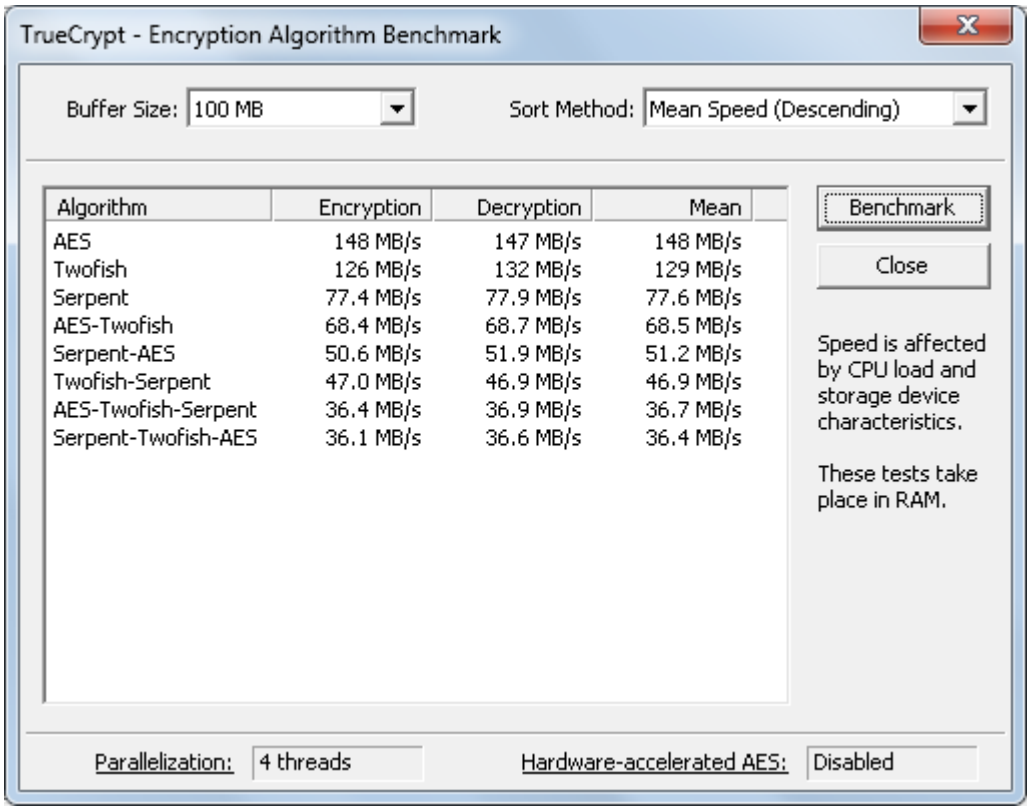
Liite 12. Suorituskykymittaus 50 Mt, aes-kiihdytys päällä

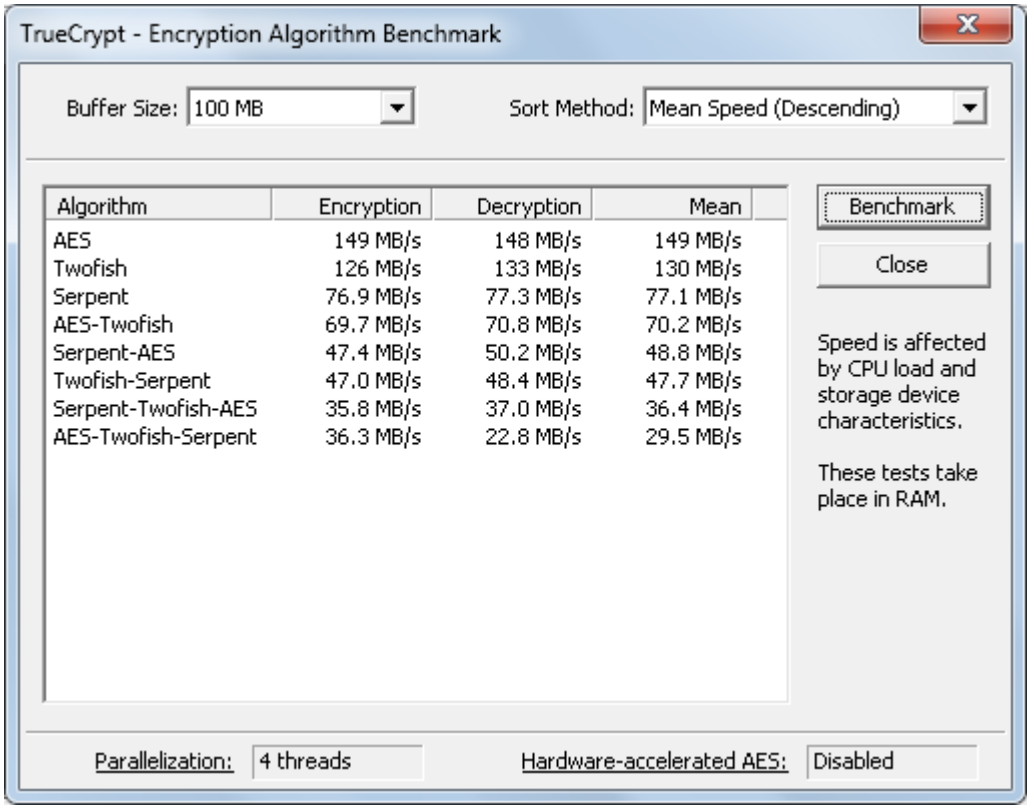


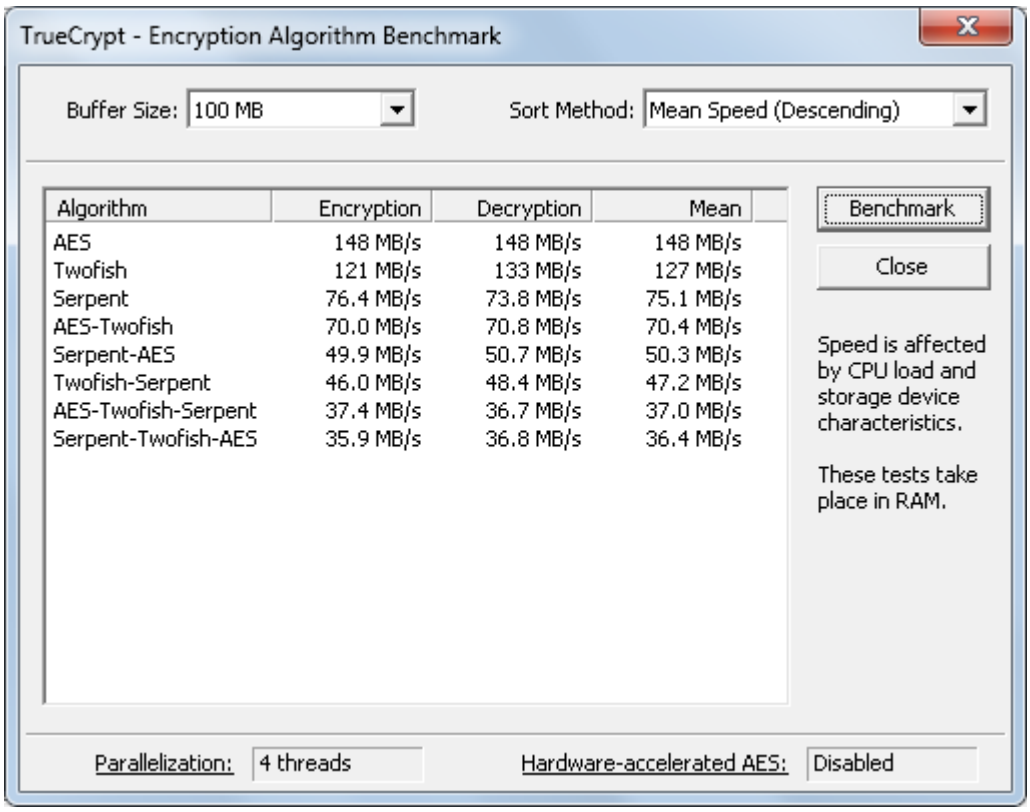



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 50 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 474 MB/s 526 MB/s 500 MB/s
Twofish 117 MB/s 128 MB/s 122 MB/s
AES-Twofish 101 MB/s 99 MB/s 100 MB/s
Serpent-AES 73.8 MB/s 74.0 MB/s 73.9 MB/s
Serpent 57.1 MB/s 64.4 MB/s 60.7 MB/s
Twofish-Serpent 50.7 MB/s 51.6 MB/s 51.1 MB/s
Serpent-Twofish-AES 47.8 MB/s 48.3 MB/s 48.1 MB/s
AES-Twofish-Serpent 47.2 MB/s 48.4 MB/s 47.8 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

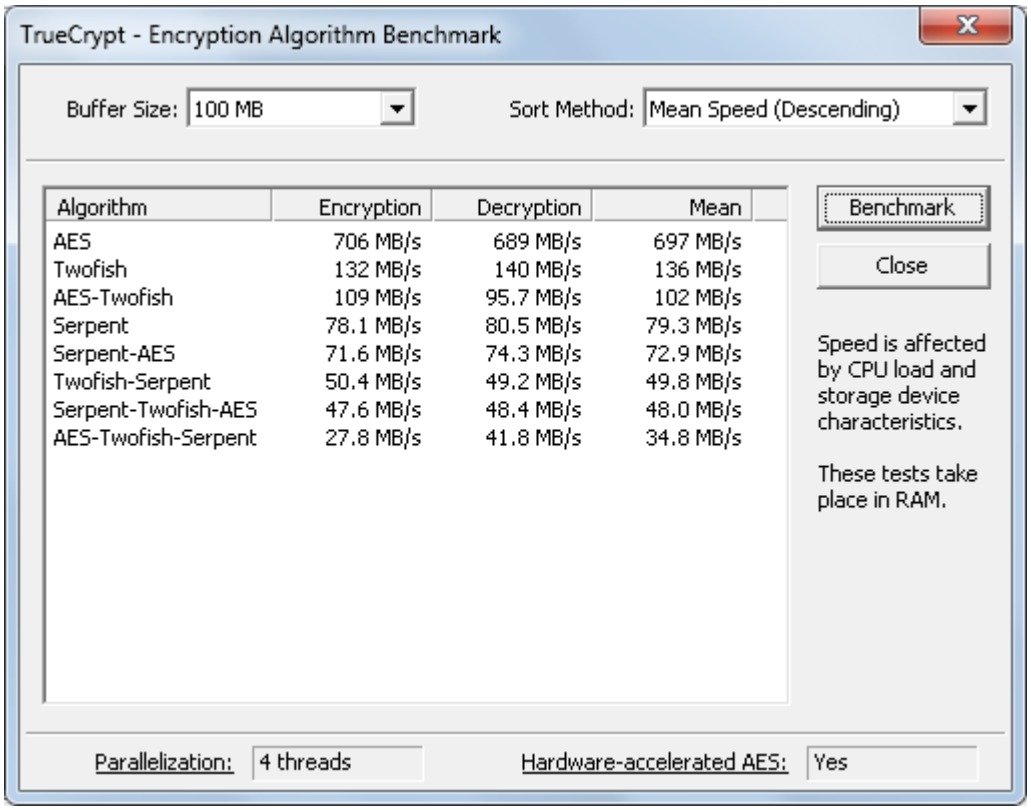
Liite 13. Suorituskykymittaus 100 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

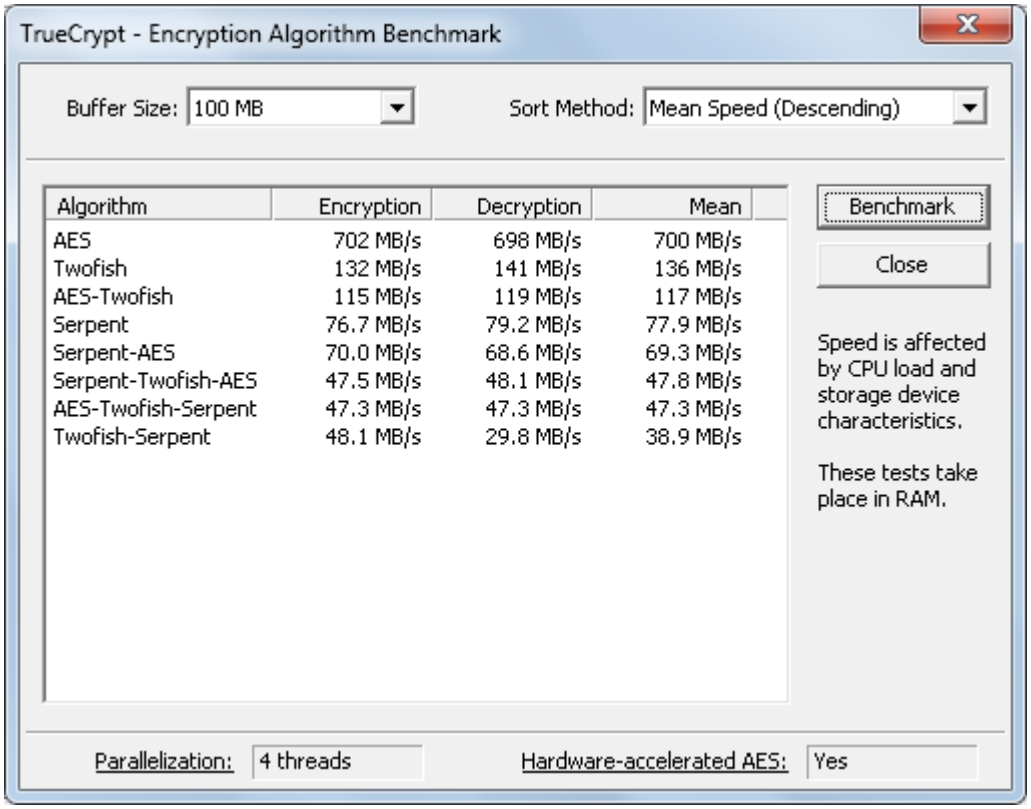


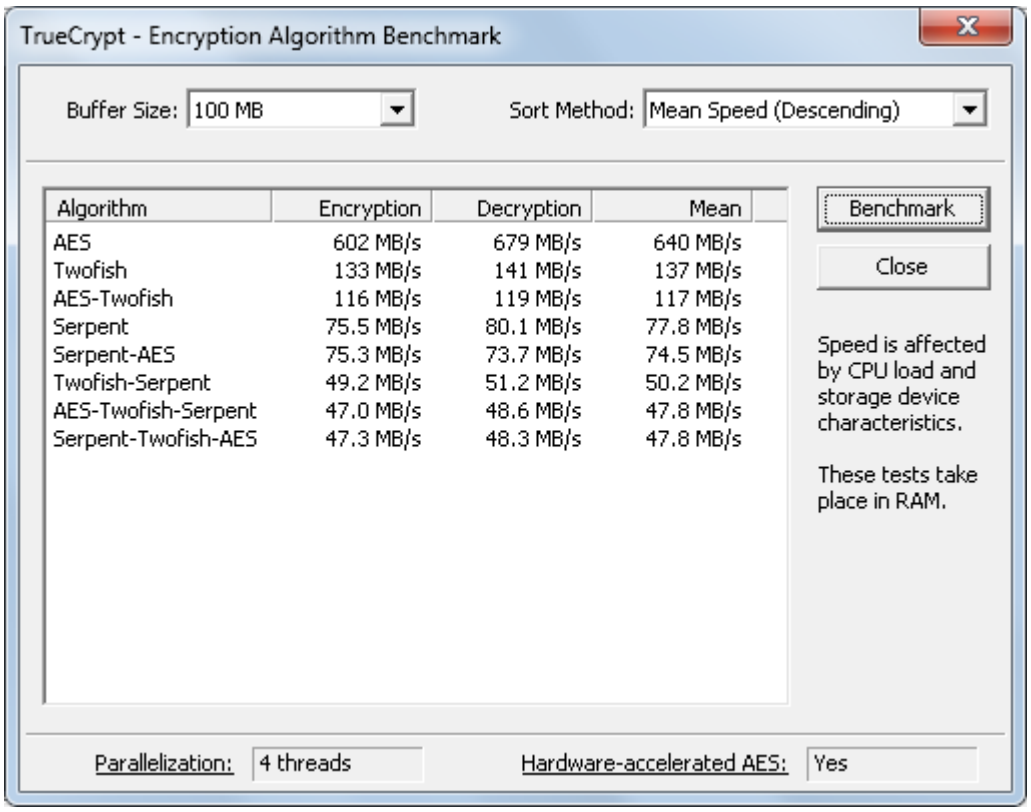



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 100 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 148 MB/s 148 MB/s 148 MB/s
Twofish 121 MB/s 133 MB/s 127 MB/s
Serpent 76.4 MB/s 73.8 MB/s 75.1 MB/s
AES-Twofish 70.0 MB/s 70.8 MB/s 70.4 MB/s
Serpent-AES 49.9 MB/s 50.7 MB/s 50.3 MB/s
Twofish-Serpent 46.0 MB/s 48.4 MB/s 47.2 MB/s
AES-Twofish-Serpent 37.4 MB/s 36.7 MB/s 37.0 MB/s
Serpent-Twofish-AES 35.9 MB/s 36.8 MB/s 36.4 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

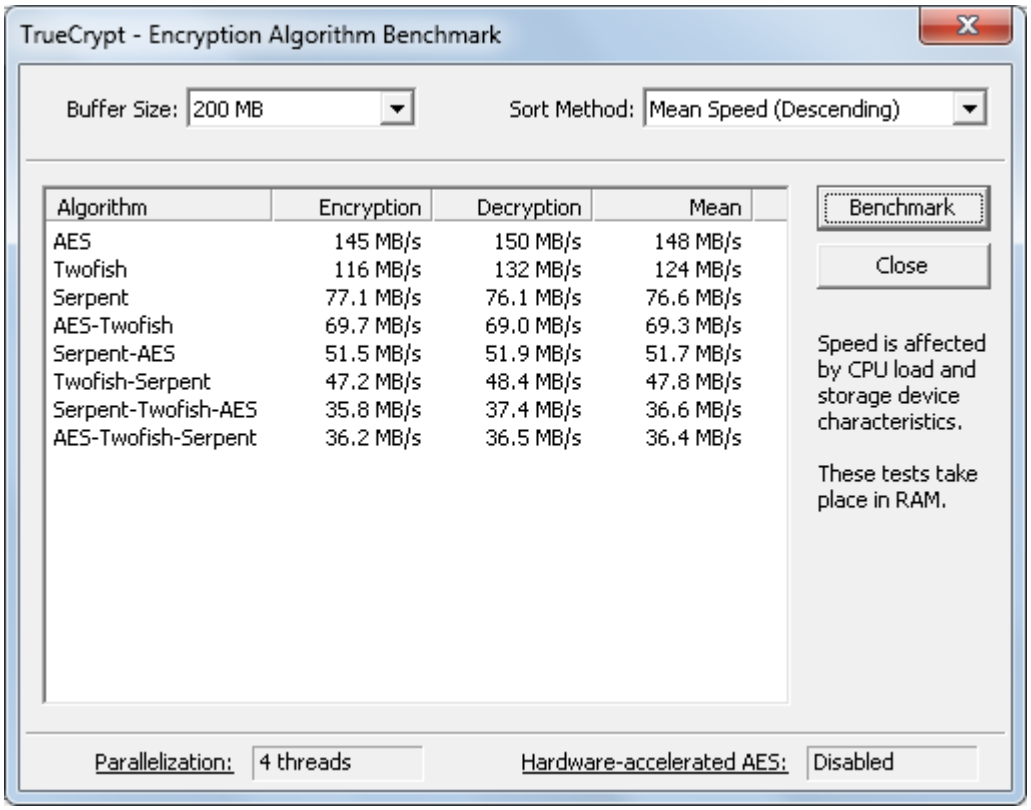
Liite 14. Suorituskykymittaus 100 Mt, aes-kiihdytys päällä

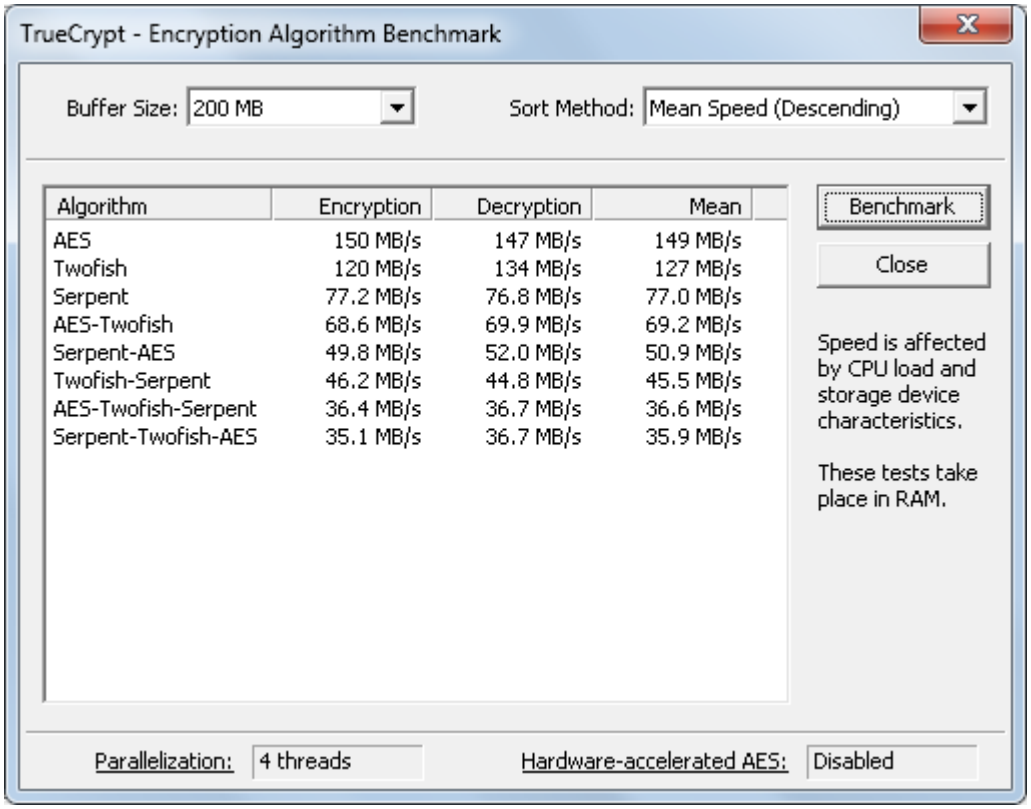


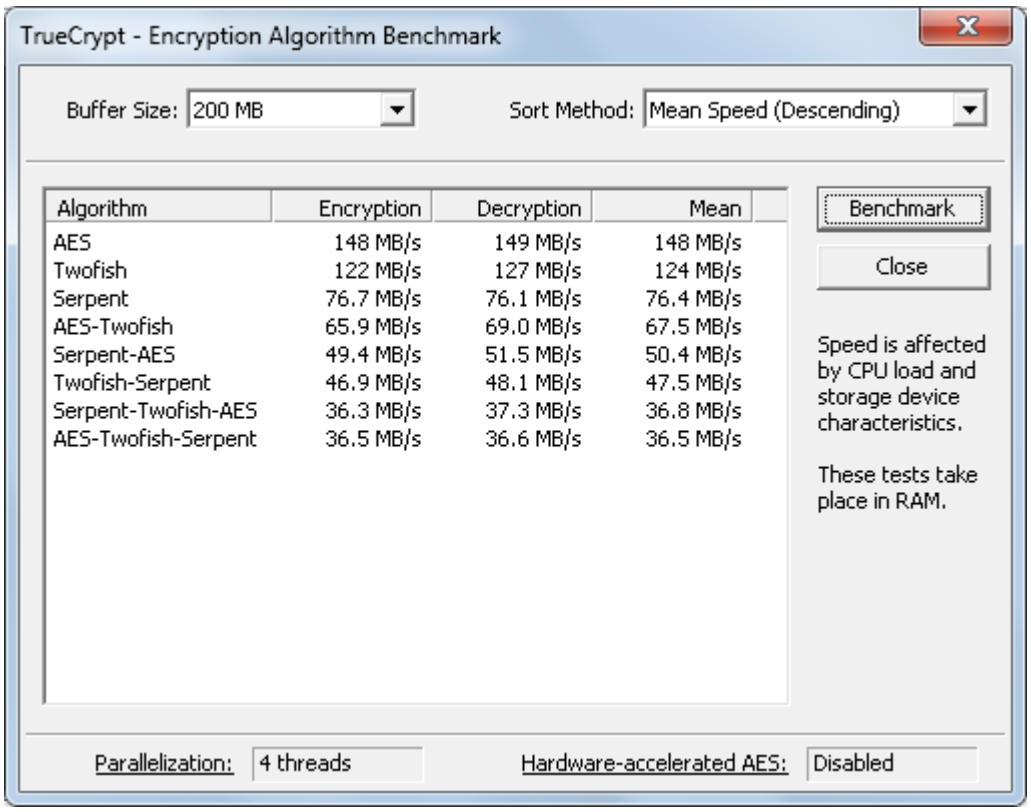



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 100 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 602 MB/s 679 MB/s 640 MB/s
Twofish 133 MB/s 141 MB/s 137 MB/s
AES-Twofish 116 MB/s 119 MB/s 117 MB/s
Serpent 75.5 MB/s 80.1 MB/s 77.8 MB/s
Serpent-AES 75.3 MB/s 73.7 MB/s 74.5 MB/s
Twofish-Serpent 49.2 MB/s 51.2 MB/s 50.2 MB/s
AES-Twofish-Serpent 47.0 MB/s 48.6 MB/s 47.8 MB/s
Serpent-Twofish-AES 47.3 MB/s 48.3 MB/s 47.8 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

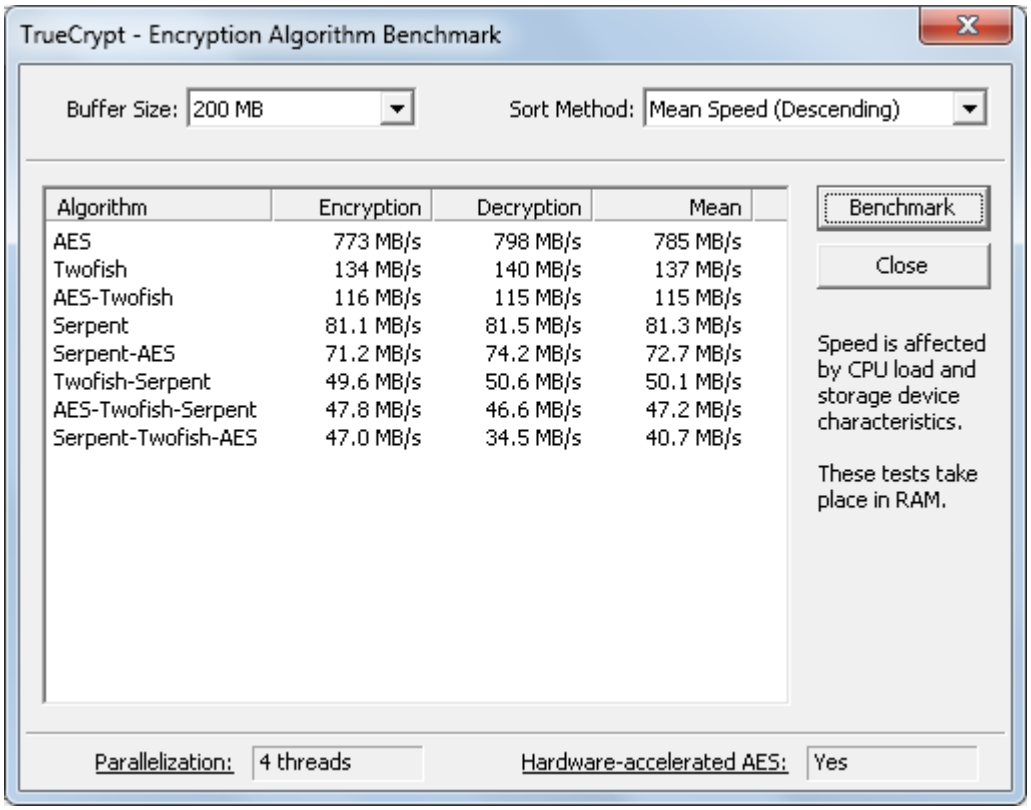
Liite 15. Suorituskykymittaus 200 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

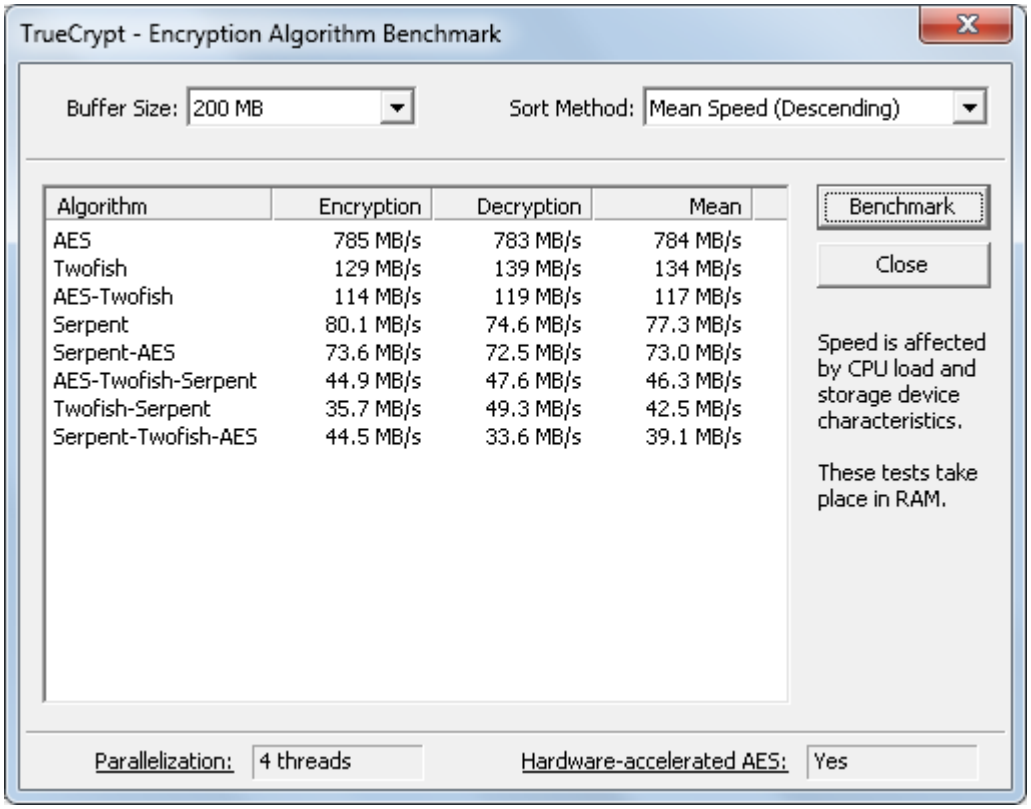


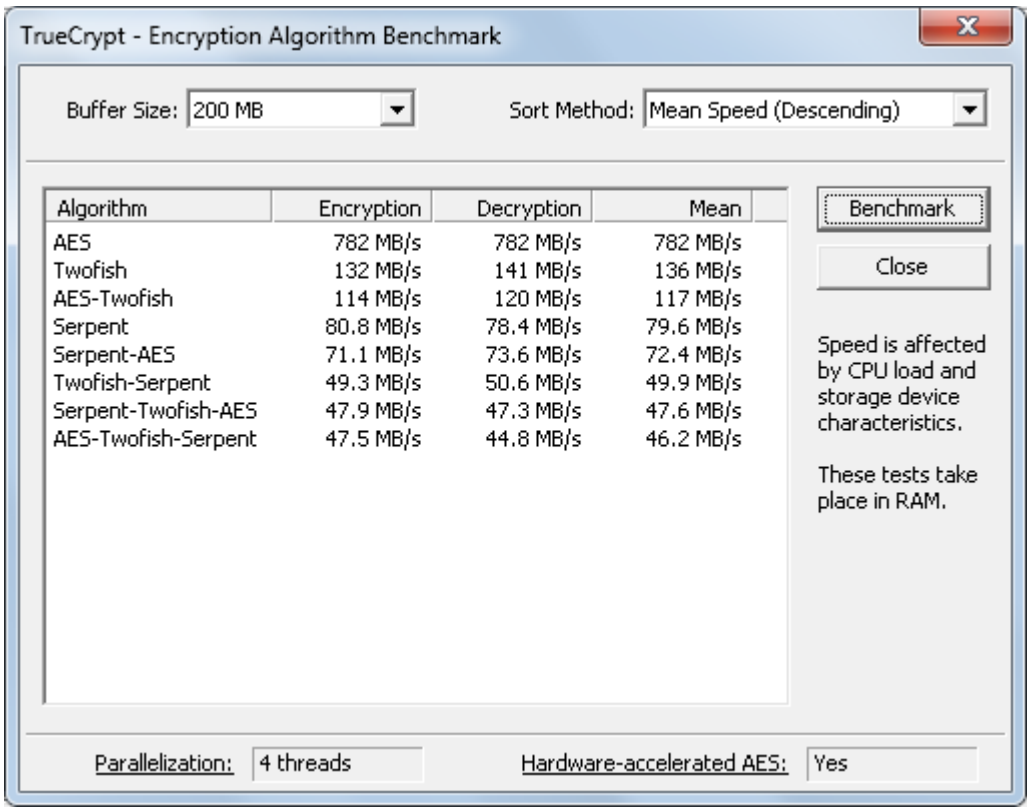



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 200 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 148 MB/s 149 MB/s 148 MB/s
Twofish 122 MB/s 127 MB/s 124 MB/s
Serpent 76.7 MB/s 76.1 MB/s 76.4 MB/s
AES-Twofish 65.9 MB/s 69.0 MB/s 67.5 MB/s
Serpent-AES 49.4 MB/s 51.5 MB/s 50.4 MB/s
Twofish-Serpent 46.9 MB/s 48.1 MB/s 47.5 MB/s
Serpent-Twofish-AES 36.3 MB/s 37.3 MB/s 36.8 MB/s
AES-Twofish-Serpent 36.5 MB/s 36.6 MB/s 36.5 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

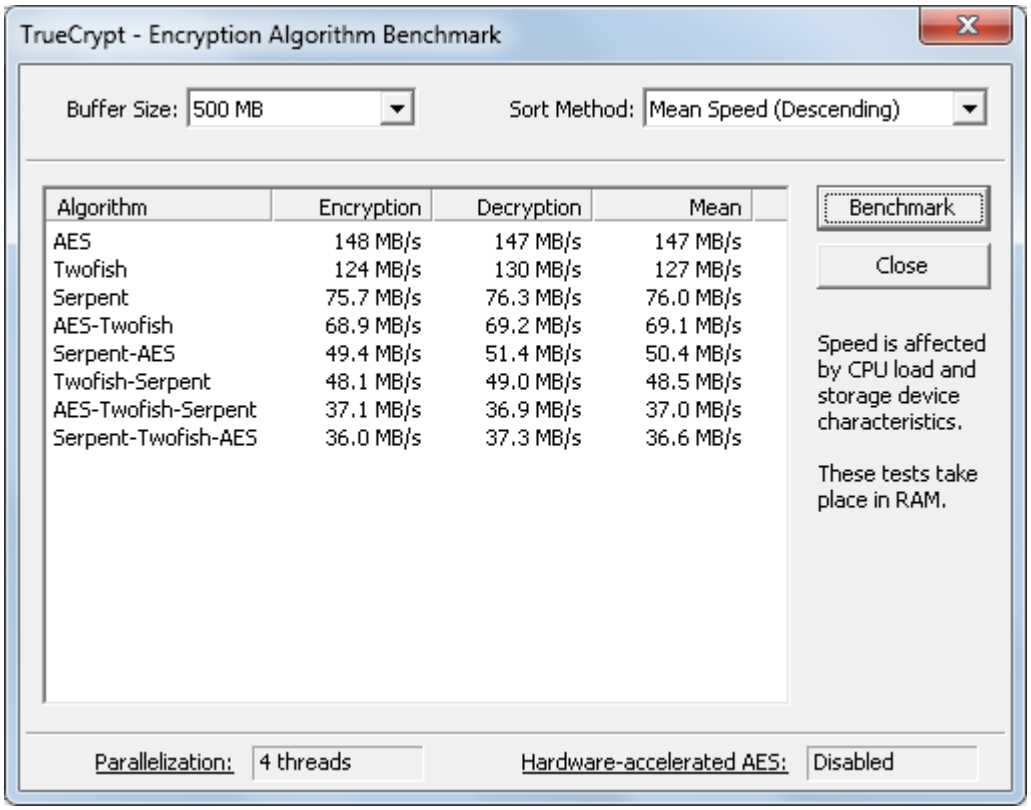
Liite 16. Suorituskykymittaus 200 Mt, aes-kiihdytys päällä

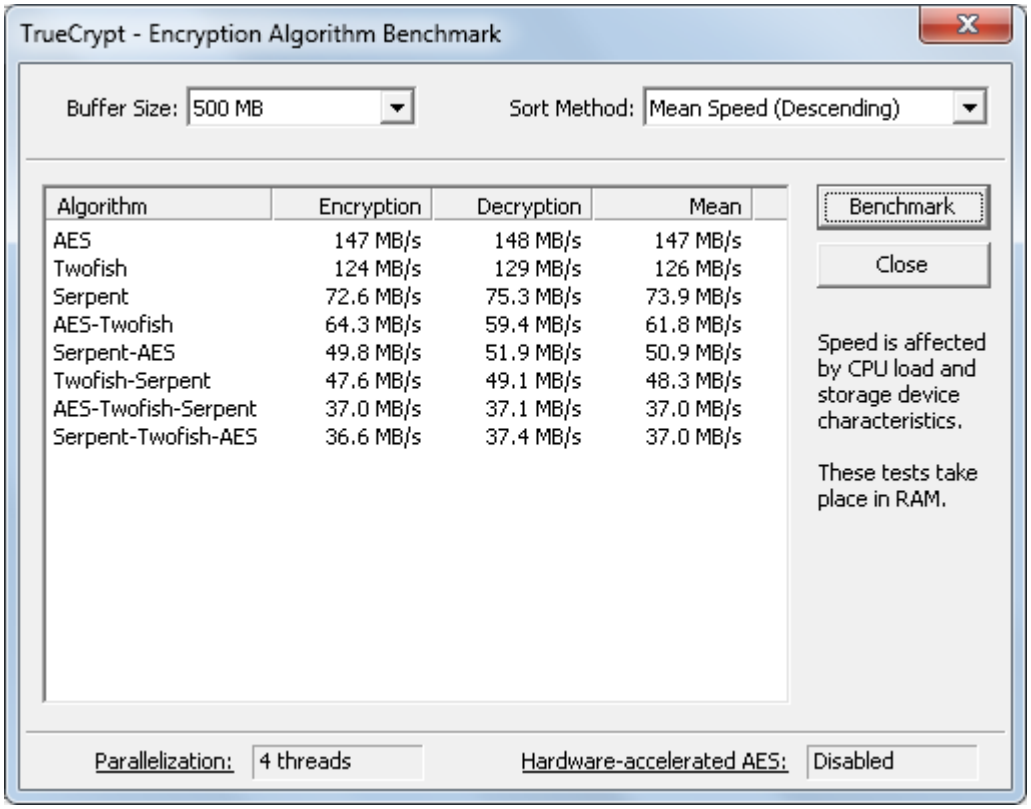


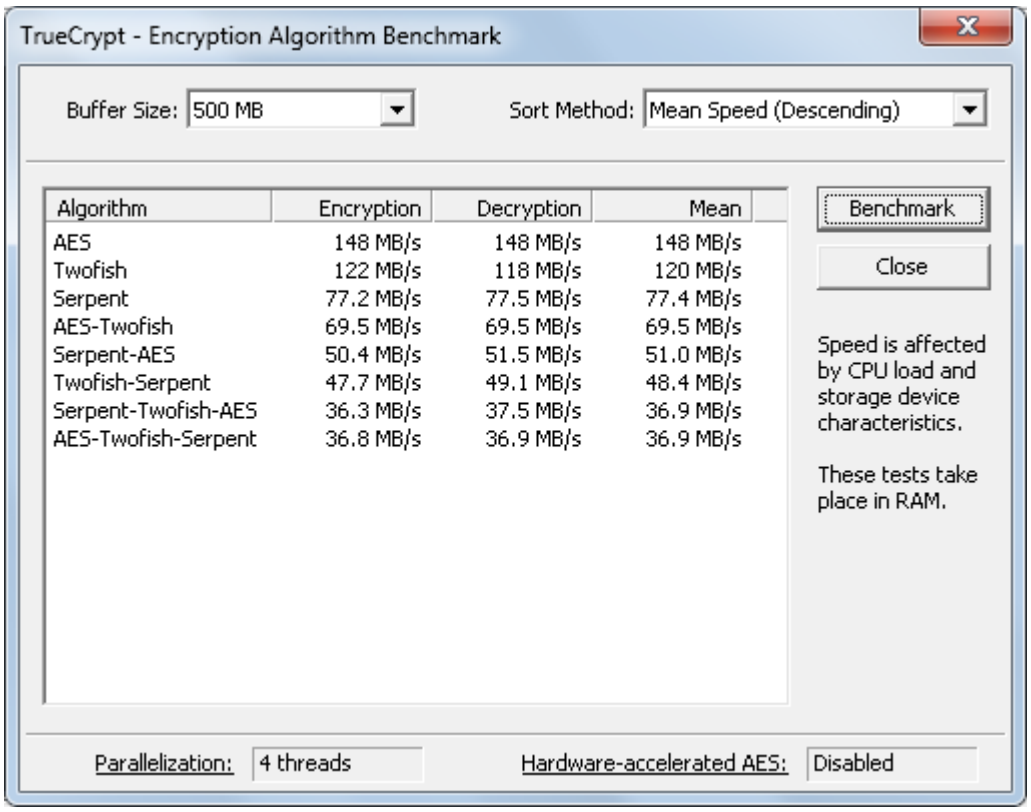



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 200 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 782 MB/s 782 MB/s 782 MB/s
Twofish 132 MB/s 141 MB/s 136 MB/s
AES-Twofish 114 MB/s 120 MB/s 117 MB/s
Serpent 80.8 MB/s 78.4 MB/s 79.6 MB/s
Serpent-AES 71.1 MB/s 73.6 MB/s 72.4 MB/s
Twofish-Serpent 49.3 MB/s 50.6 MB/s 49.9 MB/s
Serpent-Twofish-AES 47.9 MB/s 47.3 MB/s 47.6 MB/s
AES-Twofish-Serpent 47.5 MB/s 44.8 MB/s 46.2 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

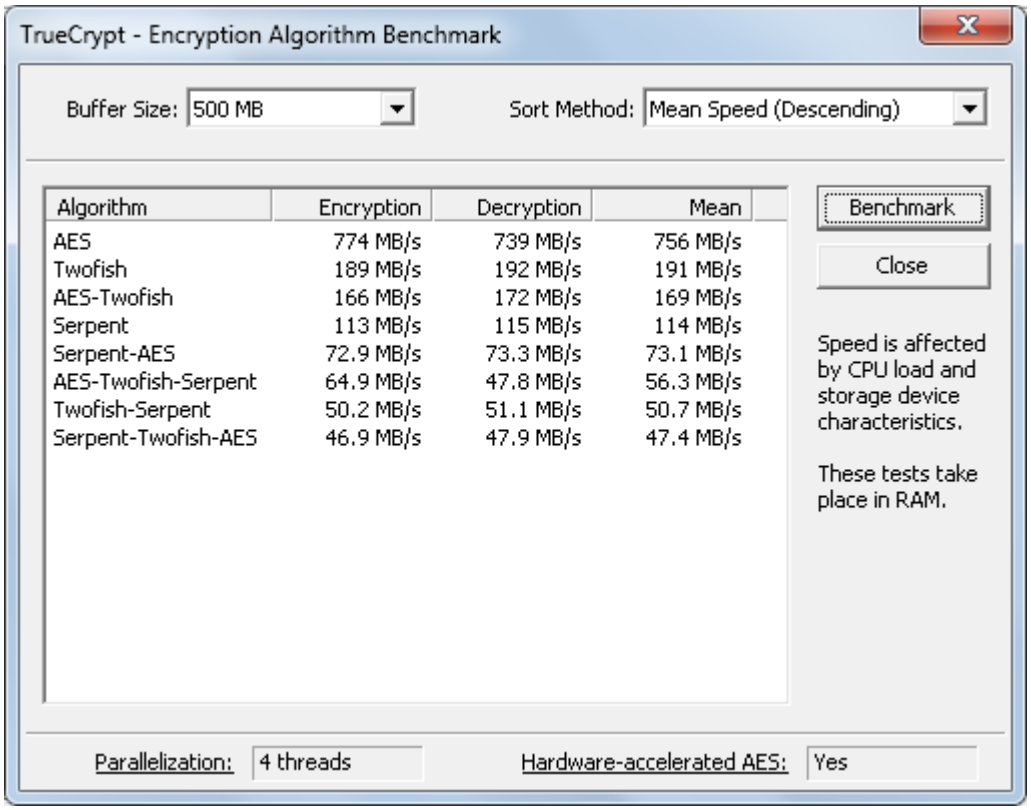
Liite 17. Suorituskykymittaus 500 Mt, aes-kiihdytys pois päältä

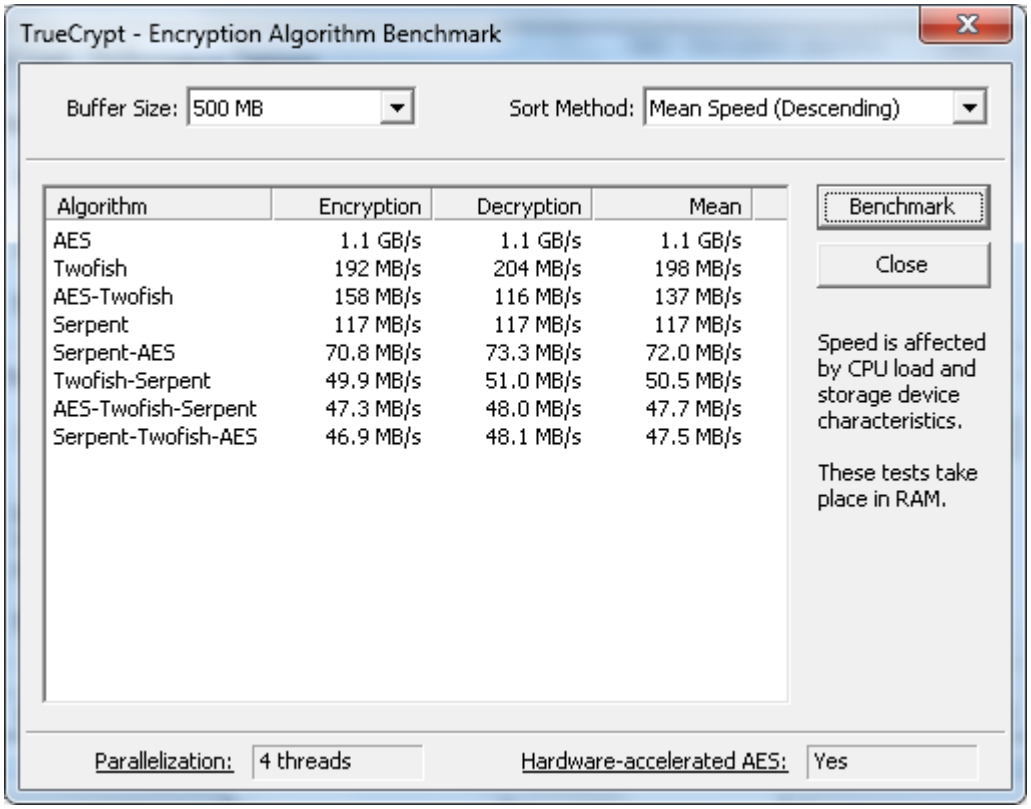


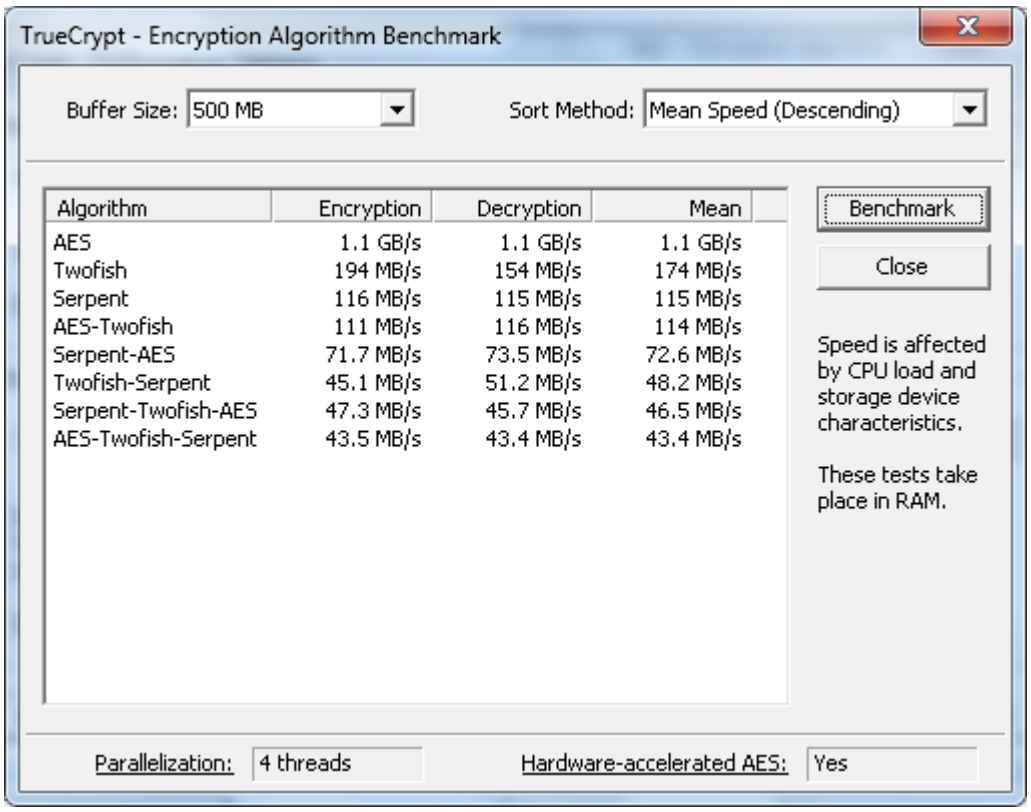



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 500 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 148 MB/s 148 MB/s 148 MB/s
Twofish 122 MB/s 118 MB/s 120 MB/s
Serpent 77.2 MB/s 77.5 MB/s 77.4 MB/s
AES-Twofish 69.5 MB/s 69.5 MB/s 69.5 MB/s
Serpent-AES 50.4 MB/s 51.5 MB/s 51.0 MB/s
Twofish-Serpent 47.7 MB/s 49.1 MB/s 48.4 MB/s
Serpent-Twofish-AES 36.3 MB/s 37.5 MB/s 36.9 MB/s
AES-Twofish-Serpent 36.8 MB/s 36.9 MB/s 36.9 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

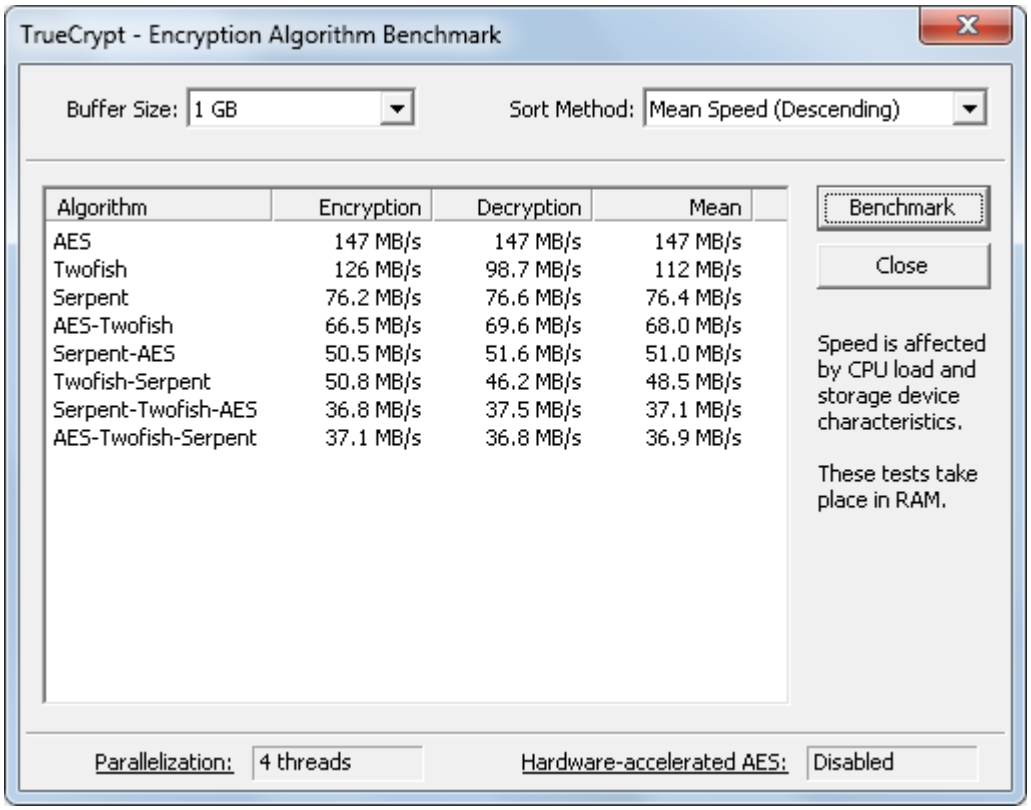
Liite 18. Suorituskykymittaus 500 Mt, aes-kiihdytys päällä

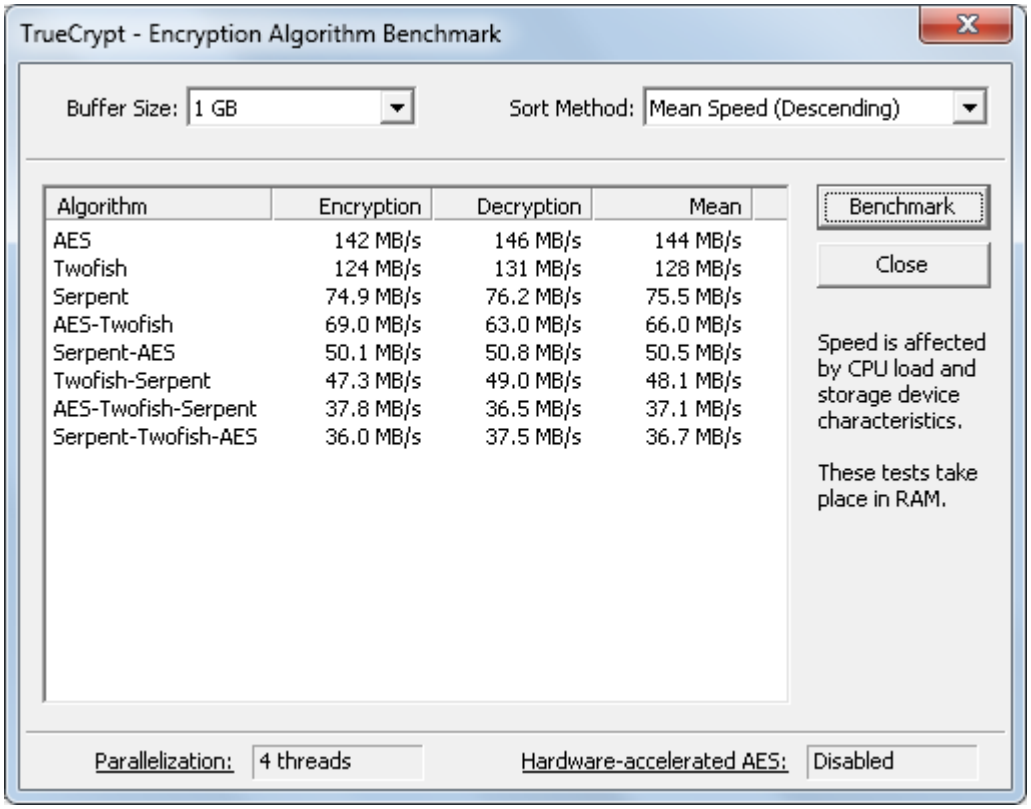


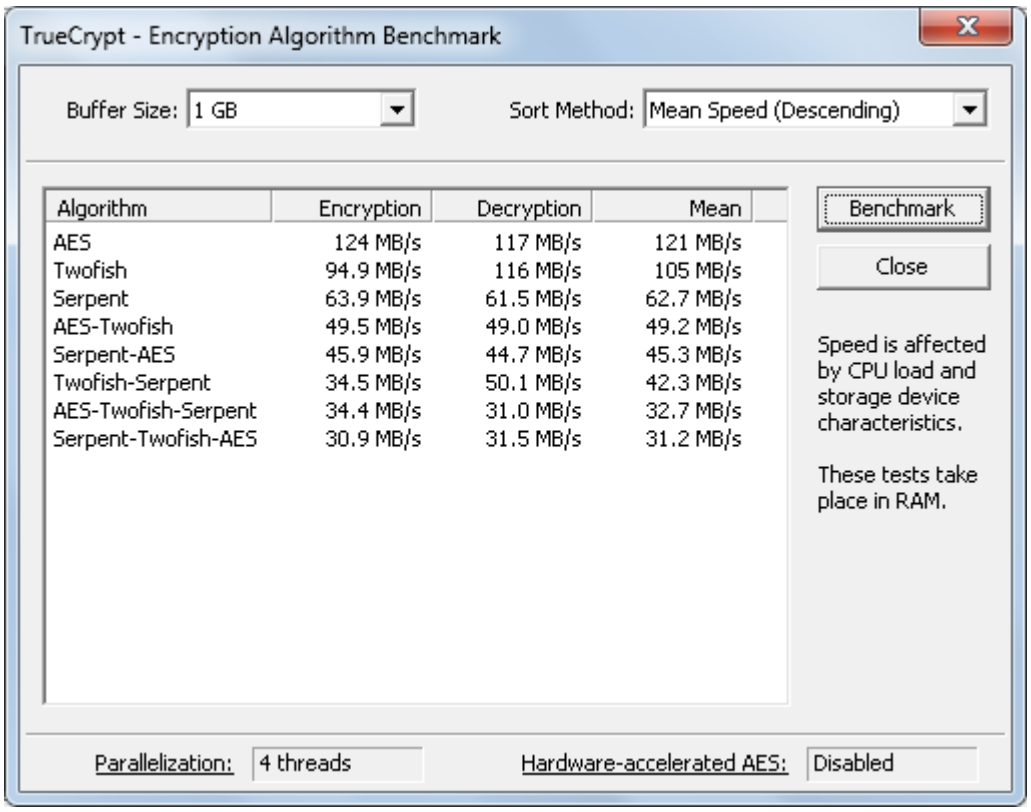



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 500 MB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 1.1 GB/s 1.1 GB/s 1.1 GB/s
Twofish 194 MB/s 154 MB/s 174 MB/s
Serpent 116 MB/s 115 MB/s 115 MB/s
AES-Twofish 111 MB/s 116 MB/s 114 MB/s
Serpent-AES 71.7 MB/s 73.5 MB/s 72.6 MB/s
Twofish-Serpent 45.1 MB/s 51.2 MB/s 48.2 MB/s
Serpent-Twofish-AES 47.3 MB/s 45.7 MB/s 46.5 MB/s
AES-Twofish-Serpent 43.5 MB/s 43.4 MB/s 43.4 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes

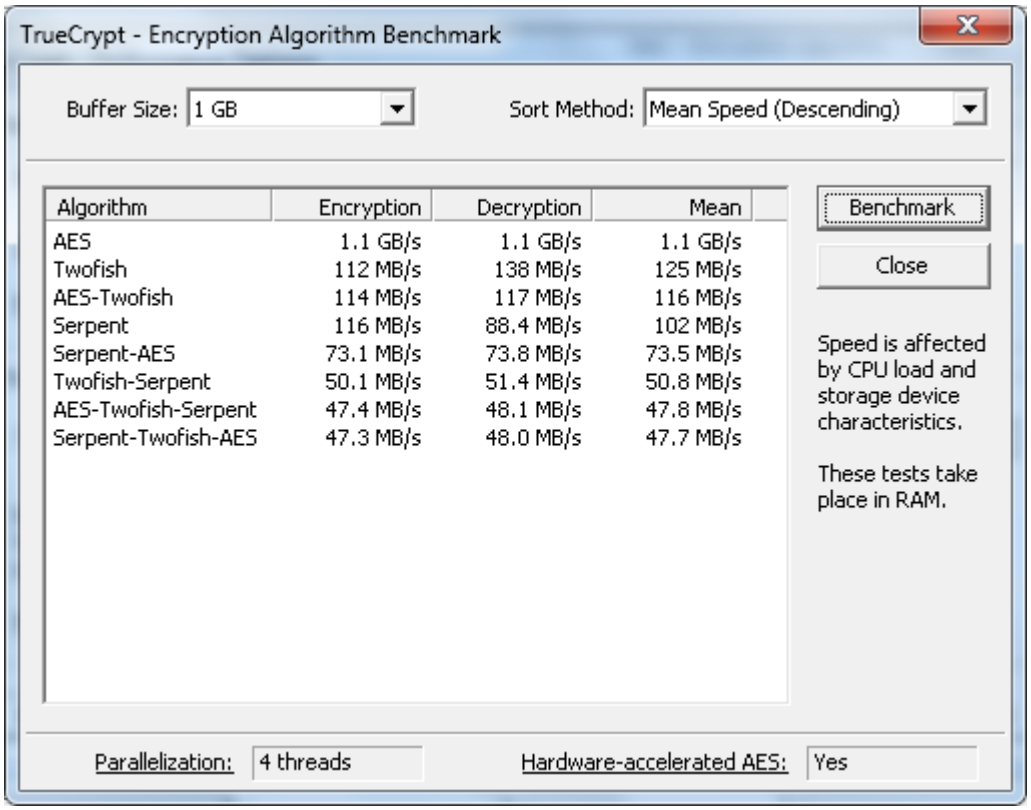
Liite 19. Suorituskykymittaus 1 Gt, aes-kiihdytys pois päältä

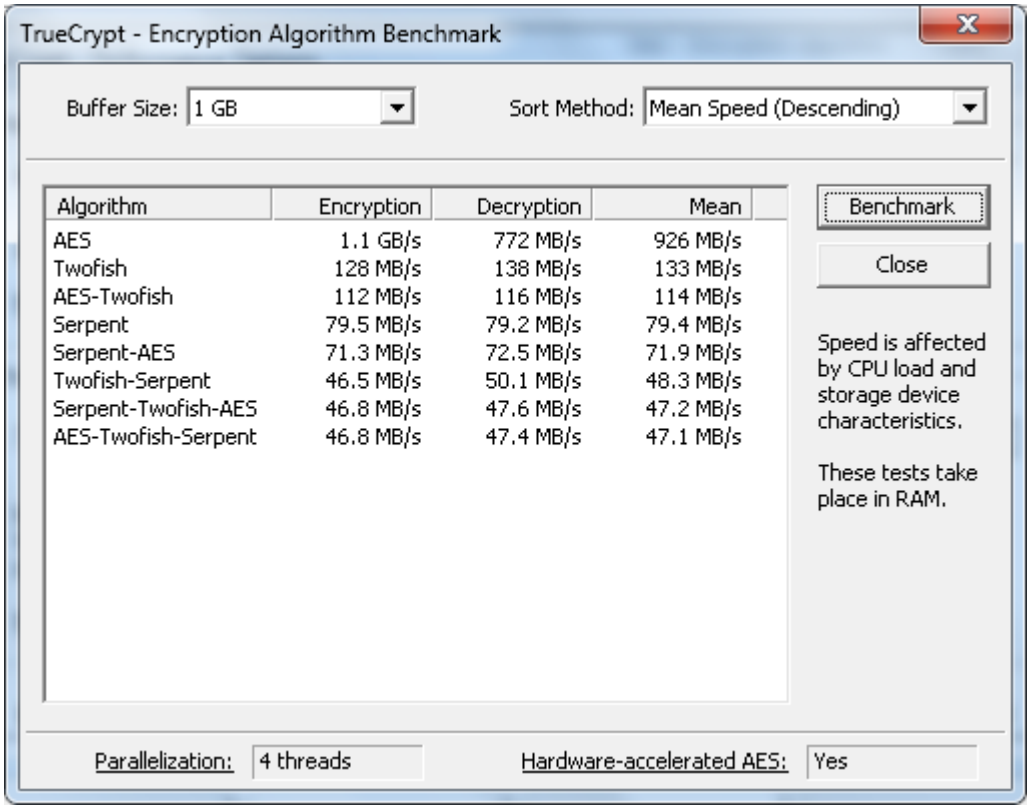


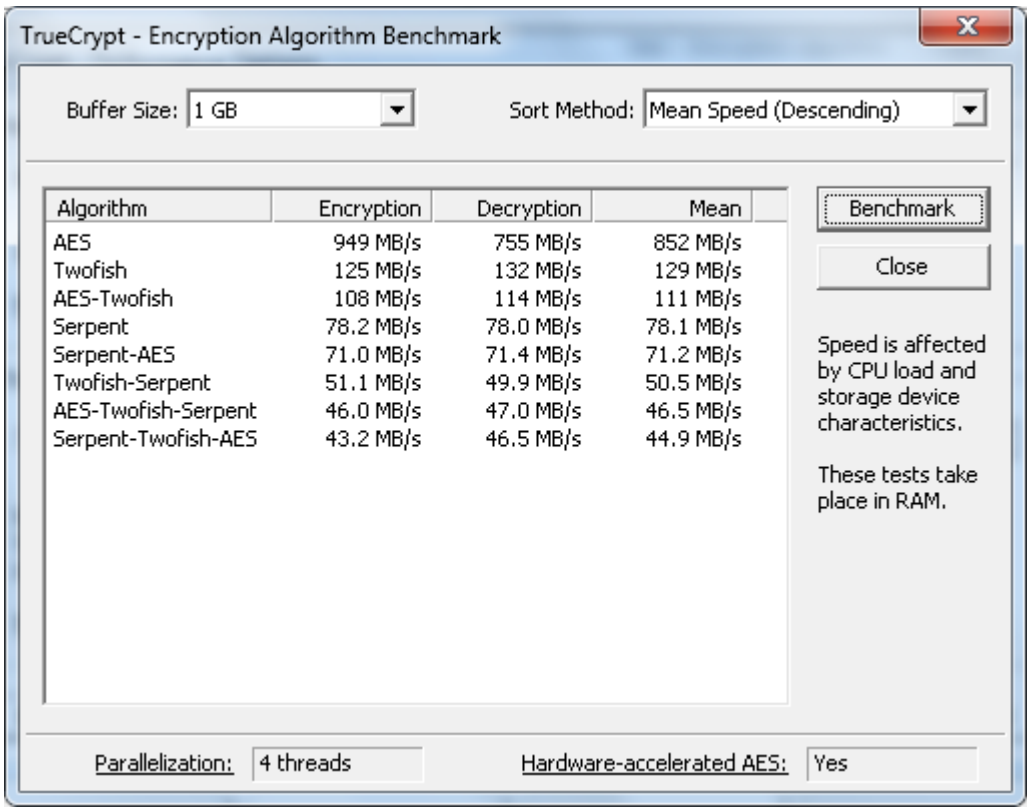



TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 1 GB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 124 MB/s 117 MB/s 121 MB/s
Twofish 94.9 MB/s 116 MB/s 105 MB/s
Serpent 63.9 MB/s 61.5 MB/s 62.7 MB/s
AES-Twofish 49.5 MB/s 49.0 MB/s 49.2 MB/s
Serpent-AES 45.9 MB/s 44.7 MB/s 45.3 MB/s
Twofish-Serpent 34.5 MB/s 50.1 MB/s 42.3 MB/s
AES-Twofish-Serpent 34.4 MB/s 31.0 MB/s 32.7 MB/s
Serpent-Twofish-AES 30.9 MB/s 31.5 MB/s 31.2 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Disabled

Liite 20. Suorituskykymittaus 1 Gt, aes-kiihdytys päällä






TrueCrypt - Encryption Algorithm Benchmark
Buffer Size: 1 GB
Sort Method: Mean Speed (Descending)
Algorithm Encryption Decryption Mean
AES 949 MB/s 755 MB/s 852 MB/s
Twofish 125 MB/s 132 MB/s 129 MB/s
AES-Twofish 108 MB/s 114 MB/s 111 MB/s
Serpent 78.2 MB/s 78.0 MB/s 78.1 MB/s
Serpent-AES 71.0 MB/s 71.4 MB/s 71.2 MB/s
Twofish-Serpent 51.1 MB/s 49.9 MB/s 50.5 MB/s
AES-Twofish-Serpent 46.0 MB/s 47.0 MB/s 46.5 MB/s
Serpent-Twofish-AES 43.2 MB/s 46.5 MB/s 44.9 MB/s
Benchmark
Close
Speed is affected by CPU load and storage device characteristics.
These tests take place in RAM.
Parallelization: 4 threads
Hardware-accelerated AES: Yes