



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Kryptovalutor – energiförbrukning och miljöeffekter

Downloaded from: <https://research.chalmers.se>, 2026-04-04 19:55 UTC

Citation for the original published paper (version of record):

Agrell, E. (2023). Kryptovalutor – energiförbrukning och miljöeffekter. En samhällsvetenskaplig introduktion till bitcoin och kryptovalutor

N.B. When citing this work, cite the original published paper.

Kryptovalutor – energiförbrukning och miljöeffekter

Erik Agrell

Institutionen för elektroteknik
Chalmers tekniska högskola

Detta kapitel fokuserar på bitcoins elförbrukning och även, i ett bredare perspektiv, annan miljöpåverkan. Efter en kort inledning i avsnitt 4.1 redovisas i avsnitt 4.2 några försök att uppskatta hur stor elförbrukningen egentligen är, och vilka källor till osäkerhet som finns i sådana uppskattningar. Motsvarande uppskattning av klimatskadliga utsläpp redovisas i avsnitt 4.3. Siffrorna sätts i perspektiv med några jämförelser i avsnitt 4.4. Utvecklingen över tid illustreras i avsnitt 4.5 och därmed kopplingen till bitcoinpriset. Miljöfrågan breddas till ett livscykelperspektiv i avsnitt 4.6, där produktion och skrotning av den specialtillverkade elektronik som används i bitcoinfabrikerna diskuteras. I avsnitt 4.7 ställs sedan den naturliga frågan: Vad finns det för alternativ? Kapitlet avslutas med några övergripande reflektioner i avsnitt 4.8.

4.1 Inledning

Som beskrivits i kapitel 3, bygger bitcoin och liknande kryptovalutor på en distribuerad konsensusmekanism som kallas *proof-of-work* (“bevis på arbete”). Mekanismen liknas ofta vid ett lotteri, där alla som vill delta utför samma beräkningar ett stort antal gånger med olika indata. Den som hittar rätt indata, enligt vissa förutbestämda kriterier, vinner lotteriet och får lägga nästa block till blockkedjan. Kriterierna, som publicerades av pseudonymen Satoshi Nakamoto i hans berömda vitbok [Nakamoto 2008], är utformade så att det går att testa om givna indata uppfyller dem med en snabb och enkel beräkning, men det är algoritmiskt omöjligt att förutse vilka indata som är de riktiga. Den enda kända strategin är att gissa ett stort antal slumpstal och använda dessa som indata. Även om en enda sådan beräkning kan göras med försumbar elförbrukning, så utförs numera ett astronomiskt antal beräkningar varje dag, som sammanlagt konsumerar så mycket elektricitet att det förtjänar ett eget kapitel i denna bok. Det påstås ibland

att bitcoinfabrikerna utför komplicerade beräkningar, men det är inte sant. De utför relativt enkla beräkningar, som upprepas väldigt många gånger.

Sammanfattningsvis uppskattas det globala bitcoinnätverkets elförbrukning till ca 100 TWh, medan klimatutsläppen motsvarar ca 50 miljoner ton koldioxid per år. Dessa siffror innebär en miljöbelastning som är jämförbar med den som ett land som Sverige åstadkommer. Andra kryptovalutor bidrar med ytterligare elförbrukning och utsläpp, men dessa bidrag är små jämfört med bitcoins, vilket utvecklas närmare i avsnitt 4.2. Därför fokuserar detta kapitel huvudsakligen på bitcoin.

En fundamental frågeställning är om bitcoinsystemet är värt sin stora miljöpåverkan. Överväger de finansiella och sociala fördelar, som belyses i andra kapitel, nackdelarna för miljön? Denna fråga har givit upphov till en starkt polariserad debatt, där uppfattningarna varierar från ett starkt ja till ett lika starkt nej.

4.2 Elförbrukning

Att uppskatta elförbrukningen hos ett så komplext system som bitcoin är komplicerat och behäftat med en hel del osäkerhet. Man vet nästan exakt hur många beräkningar som utförs vid varje tidpunkt, eftersom det genom sannolikhetskalkylens lagar krävs ett visst antal misslyckade beräkningar för varje vinst i lotteriet, alltså för varje nytt block i kedjan, men det finns inget enkelt sätt att kvantifiera hur mycket elenergi som går åt för varje beräkning.

Svårigheterna beror på flera faktorer, framför allt ett stort mått av hysch-hysch och företagshemligheter. Bitcoinindustrin¹ redovisar i allmänhet inte vilken utrustning som installerats, hur intensivt den används, storleken på förluster i kylning och energiomvandling eller vilken energimix som köps in. I många fall vet man inte ens var fabrikerna ligger. I brist på förstahandsuppgifter lägger forskare ett pussel med bitar från elektronik, ekonomi, datavetenskap, energiteknik och statistik. Att elförbrukningen varierar snabbt över tid gör uppskattningarna ännu osäkrare.

Innan vi fördjupar oss i siffror, kan det finnas skäl att sammanfatta några grundläggande energibegrepp. Energi är effekt per tidsenhet. Effekt mäts i watt (W) och energi i watt-timmar (Wh). Om man exempelvis låter en värmefläkt på 1000 W stå på i en timme så förbrukas 1000 Wh eller 1 kWh. På ett år förbrukar en normalstor villa ca 20 000 kWh. En TWh är en miljard kWh. 100 TWh motsvarar elförbrukningen hos 5 miljoner villor. Fler jämförelser kommer i avsnitt 4.4.

¹ Industrin har liknats vid utvinning av ädla metaller och kallas därför ibland "brytning" eller "mining".

I brist på säkra uppgifter är det lämpligt att inte enbart lita på en enda källa. I detta avsnitt sammanfattas resultaten från fyra källor, som alla har försökt uppskatta elförbrukningen med varierande metoder.

En ofta citerad källa är *Cambridge Center for Alternative Finance* (CCAF), som är ett forskningscentrum inom University of Cambridge [CCAF web]. De publicerar kontinuerligt sitt Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, som uppskattar hur stor elektrisk effekt som dagligen förbrukas i världens samlade bitcoinfabriker. Exempelvis anger indexet den 23 november 2022 en effekt på 10.34 GW, eller annorlunda uttryckt 90.60 TWh per år, om samma effekt skulle förbrukas konstant under ett år. När bitcoinpriset stod högre i november 2021 stod indexet i 117 TWh/år.

Osäkerheten i uppskattningen illustreras av undre och övre gränser, som den 23 november 2022 ger ett intervall från 48.67 till 133.00 TWh/år, där indexet alltså ligger ungefär i mitten. Den undre gränsen är den mängd el som skulle förbrukas om alla fabriker använde den mest energieffektiva elektronik som finns tillgänglig på marknaden, vilket är ett alltför optimistiskt antagande. Den övre gränsen bygger på en lönsamhetsanalys: Ingen skulle producera bitcoin om inte den förväntade vinsten vore högre än elräkningen, vilket innebär att alltför gammal och energikrävande elektronik stängs av.

En annan ofta citerad källa är *Digiconomist*, som drivs av forskaren Alex de Vries i Nederländerna [Digiconomist web]. Dess index ligger den 23 november 2022 på 110.52 TWh/år, en minskning från 191 TWh/år i november 2021. Uppskattningen bygger på en lönsamhetsanalys av samma slag som den övre gränsen för CCAFs index. Skillnaden mellan de båda estimaten ligger i något olika antaganden om fabrikernas utgifter utöver elektronikens elförbrukning.

Både CCAF och Digiconomist hänvisar till akademisk forskning och vetenskapligt granskade artiklar. Ett helt annat perspektiv ges av *Bitcoin Mining Council* (BMC), en intressorganisation för bitcoinföretag, som representerar 45.4 % av det globala bitcoinnätverket [BMC 2022, s 3]. De publicerar varje kvartal en rapport med siffror för bl.a. bitcoinnätverkets energiförbrukning. Detta är intressant, eftersom de till skillnad från oberoende forskare har tillgång till förstahandsinformation från sina medlemmar, bitcoinföretagen. Trots att det borde ligga i deras intresse att ge en positiv bild av sin verksamhet, så redovisar BMC den högsta energiförbrukningen i sammanställningen: 266 TWh/år [BMC 2022, s 6], en ökning från 220 TWh/år i december 2021. Det är anmärkningsvärt att den av BMC uppgivna energiförbrukningen ligger väsentligt över CCAFs övre gräns.

Internationella energirådet (International Energy Agency, IEA) är ett organ inom den internationella samarbetsorganisationen OECD som publicerar statistik och analyser inom energiområdet. De anger att samtliga kryptovalutor konsumerade 100–140 TWh under 2021, med hänvisning till CCAF och två andra källor [IEA

2022b]. Härav utgör bitcoin den klart största andelen. Bitcoin uppskattades 2020 stå för 2/3 av kryptovalutornas totala elförbrukning [Gallersdörfer20]. Sedan dess har andelen ökat, eftersom ether, den näst största kryptovalutan, inte längre produceras med proof-of-work (se avsnitt 4.7). BMC uppger i oktober 2022 att bitcoin står för 99 % av kryptovalutornas totala elförbrukning [BMC 2022, s 15].

Sammanfattningsvis varierar uppskattningarna från 89 till 266 TWh/år, vilket ändå är ett relativt litet intervall givet frågeställningens stora komplexitet. Man kan med stor säkerhet säga att bitcoinnätverkets globala elförbrukning ligger någonstans i det intervallet. Låt oss för den fortsatta diskussionen säga att bitcoins elförbrukning, lågt räknat, är 100 TWh per år. Det är ingen exakt siffra, men i rätt storleksordning.

4.3 Klimatavtryck

Elproduktion medför klimatskadliga utsläpp, och utsläppens storlek beror i hög grad på vilka energikällor som används. Inom EU har Sverige den klimatvänligaste elproduktionen med utsläpp av växthusgaser motsvarande endast 9 gram koldioxid per producerad kWh, medan Estland släpper ut mest koldioxid med 946 g/kWh [EEA web]. Genomsnittet i EU är 275 g/kWh [EEA web], vilket ligger väsentligt under det globala genomsnittet på 459 g/kWh [IEA 2022c, tab 5.1] Betyder det att man bör placera så många bitcoinfabriker som möjligt i Sverige, så är problemet löst? Tyvärr inte, eftersom ländernas elnät är sammankopplade. Sverige exporterar stora mängder el varje år (år 2021 var det 33.909 TWh [SCB web]), men för varje TWh grön el som förbrukas i Sverige, får vi en TWh mindre att exportera. Det får till följd att de länder som skulle ha importerat el från Sverige behöver täcka upp med el från andra, mindre klimatvänliga, källor.

Av liknande skäl gör det endast begränsad nytta i ett globalt klimatperspektiv att vissa företag – inklusive bitcoinfabriker – skriver avtal med leverantörer av förnybar el. Sådana avtal framhålls ofta i företagens årsrapporter och marknadsföring, men på kort sikt blir det en *undanträngningseffekt* som innebär att någon annan elkonsument, kanske någon som inte uppmärksammas lika mycket av media och allmänhet, förbrukar desto mer el från smutsiga källor. Så länge som den globala produktionen av grön el inte räcker för att möta efterfrågan, måste underskottet täckas upp med mindre klimatvänlig elproduktion, oavsett hur den gröna elen fördelas mellan konsumenterna. Något överskott på grön el finns inte och kommer inte att finnas inom en överskådlig framtid. Tvärt om, efterfrågan ökar snabbare än tillgången som en följd av samhällets elektrifiering och speciellt övergången till fossilfria processer i basindustri och transporter. Det finns ju även politiska drivkrafter, i Sverige liksom i många andra länder, för att minska beroendet av att importera fossila bränslen.

På längre sikt medför en ökad efterfrågan på grön el större lönsamhet i att producera och sälja sådan el och uppmuntrar därmed till utbyggnad. Detta framförs ibland som ett argument för att bitcoin på sikt kan påverka energimarknaden i en miljövänligare riktning, medan andra menar att samhällets elektrifiering redan ger energimarknaden tillräckliga incitament för grön utbyggnad och att det vore negativt för miljön om ny grön elproduktion tas i anspråk av bitcoinproducenter. Det är i alla fall inte så enkelt att en elintensiv verksamhet ger noll nettoutsläpp från den dag man skriver kontrakt på grön el. Globalt minskade klimatutsläpp uppnås genom att dels minska den totala elförbrukningen och dels öka andelen grön el i produktionen, inte genom att omfördela gröna resurser mellan olika konsumenter.

Man kan uppskatta klimatavtrycket från bitcoinnätverket på två principiellt olika sätt. Om man å ena sidan antar att all elkonsumention via undanträngningseffekten bidrar till lika mycket utsläpp oavsett geografisk placering och elavtal, så ger en enkel beräkning utgående från ovan nämnda siffror $100 \text{ TWh} \cdot 459 \text{ g/kWh} = 45.9$ miljoner ton (Mt) koldioxid, vilket är mer än hela Sveriges klimatavtryck, som 2021 uppskattades till 38.9 Mt [Crippa 2022, s 215]. Om man å andra sidan försummar undanträngningseffekten och antar att den gröna el som försörjer vissa bitcoinfabriker inte skulle kunna användas till någon annan verksamhet, så behöver elförbrukningen multipliceras med någon annan faktor, som beror på bitcoinfabrikernas elförsörjning. Liksom för elförbrukningen i föregående avsnitt saknas fullständiga data från bitcoinindustrin, men uppskattningar har gjorts. Enligt denna princip uppskattade de Vries och hans kollegor klimatavtrycket i mars 2022 till 65.4 Mt [de Vries 2022], vilket minskade något till 62.20 Mt i november 2022 [Digiconomist web]. CCAF uppskattar utsläppen till 42.2 Mt [CCAF web], medan branschorganisationen BMC uppger 40 Mt i oktober 2022 [BMC 2022, s 7]. BMC hävdar att bitcoinproduktionen drivs av 59.4 % hållbar förnybar el, medan de Vries i augusti 2021 uppskattade andelen förnybar el till 25.1 % [de Vries 2022].²

Alla dessa analyser, både med och utan undanträngningseffekten, pekar åt ungefär samma håll. Intervallet 40–65.4 Mt är anmärkningsvärt litet, givet de olika beräkningsmetoderna och frånvaron av säkra indata. Låt oss som en avrundad siffra för den fortsatta diskussionen välja 50 Mt koldioxid per år.

4.4 Jämförelser

För att sätta bitcoins uppskattade elförbrukning på ca 100 TWh i perspektiv vill man gärna jämföra med andra betalningslösningar. Tyvärr råder det ännu större osäkerhet i uppskattningen av traditionella betalningsmetoders energiförbrukning än för bitcoin. Exempelvis redovisade det största kreditkortsföretaget Visa en

² Skillnaden beror delvis på att BMC inkluderar kärnkraft i sina hållbarhetssiffror [BMC 2022, s 17].

energiförbrukning av 0.206 TWh under 2019 för 138.3 miljarder transaktioner [Visa 2020], vilket ger en energiförbrukning på 1.5 Wh per transaktion. Motsvarande siffra för bitcoins 250 miljoner transaktioner mellan slutanvändare³ [IVF 2022] blir 400 kWh per transaktion, vilket ungefärligen motsvarar att ha ugnen på 200 °C i en månad. I en rapport från Deutsche Bank anges betydligt högre energiförbrukning för korttransaktioner och lägre för bitcoin, 6.49 Wh respektive 118 kWh per transaktion [Deutsche Bank 2021]. Även med dessa försiktigare siffror förbrukar en bitcointransaktion mer än 10 000 gånger mer energi än en korttransaktion.

En annan jämförelse ges av att de fem IT-jättarna Google, Facebook, Microsoft, Amazon och Apple i sina stora datacentra förbrukar sammanlagt ca 45 TWh per år [Hook 2021]. Det är till stor del dessa företags datacentra som förser Internet med innehåll och beräkningsintensiva tjänster. Hela Sveriges elförbrukning, inklusive hushåll, industri, eldrivna transporter och allt annat, låg 2021 på 131 TWh [SCB web], medan jordens samlade elproduktion var 28 334 TWh [IEA 2022c, tab 6.1].

Det är viktigt att hålla isär el och energi. Bara en liten andel av jordens energiproduktion utgörs av el. Bitcoinproduktionen drivs av el och bör därför jämföras med annan elintensiv verksamhet. Ibland ser man jämförelser mellan bitcoins elförbrukning och förbrukning av andra energislag, men sådana jämförelser bör tas med en nypa salt eftersom bitcoin inte kan produceras från värme eller fossila bränslen utan att dessa först omvandlas till el i ett kraftverk. Exempelvis uppger BMC att bitcoin bara konsumerar 0.16 % av världens energiproduktion, vilket kallas försumbart [BMC 2022, s 4], men inte att samma elförbrukning (266 TWh enligt BMCs uppskattning) motsvarar 0.94 % av världens elproduktion. El är som bekant en begränsad resurs, och speciellt stor är konkurrensen om grön el, vilket nämndes i avsnitt 4.2 och utvecklas vidare i avsnitt 4.5.

På liknande sätt kan några jämförelser vara på sin plats för att få en känsla för hur mycket 50 Mt koldioxidutsläpp är. Det är lika mycket som om 387 000 personer skulle flyga mellan Stockholm och New York varje dag ett helt år [ICAO web]⁴. Att hela Sveriges koldioxidutsläpp 2021 var ca 38.9 Mt har redan nämnts [Crippa 2022, s 215]. Det beräknas att elektriska bilar, bussar och lastbilar i hela världen sparade in 40 Mt jämfört med fossila transporter under 2021 [IEA 2022a, s 133], vilket mer än upphävs av utsläppen från bitcoin.

³ Ofta kombineras flera transaktioner mellan slutanvändare och registreras som en enda transaktion i blockkedjan. Denna osäkerhet i vad som räknas som en "transaktion" gör att uppgifter om energi per transaktion från olika källor inte alltid är jämförbara.

⁴ Vi bortser här från den s.k. höghöjdseffekten, som innebär att utsläpp på hög höjd har större klimatpåverkan än motsvarande utsläpp på marknivå.

Datum	Antal beräkningar per 10 minuter
jan 2010	6 000 000 000
jan 2013	10 000 000 000 000 000
jan 2016	500 000 000 000 000 000 000
jan 2019	30 000 000 000 000 000 000 000
jan 2022	100 000 000 000 000 000 000 000

Tabell 4.1. Antalet beräkningar som görs globalt för att producera bitcoin har ökat ungefär 20 biljoner gånger på 12 år.

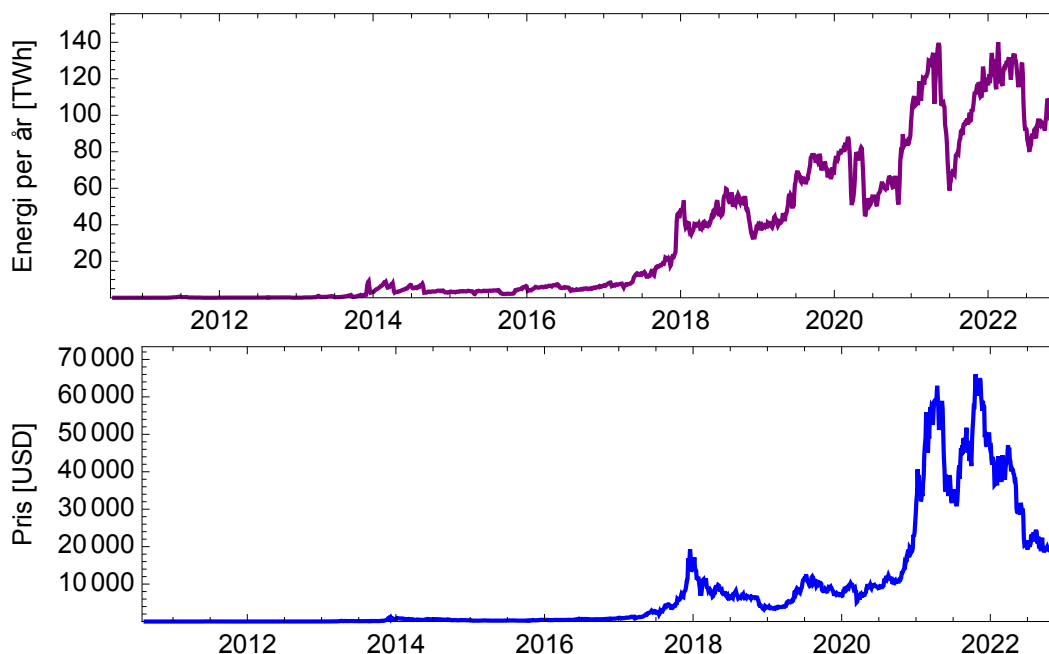
Man kan också lägga ett ekonomiskt perspektiv på utsläppen. På den europeiska marknaden handlas utsläppsrätter i december 2022 för 85.22 euro per ton koldioxid [Statista web]. Om bitcoinindustrin skulle köpa europeiska utsläppsrätter, vilket den i allmänhet inte gör, skulle det innebära en årlig kostnad på ca 50 miljarder svenska kronor. Denna hypotetiska kostnad kan sättas i relation till att dess samlade intäkter i form av vinster i bitcoinlotteriet under 2022 uppgick till ca 90 miljarder svenska kronor⁵. Forskare vid University of New Mexico analyserade s.k. sociala kostnader för bitcoinindustrins koldioxidutsläpp, som beräknas till 100 USA-dollar per ton, och kom fram till att dessa kostnader uppgick till 35 % av marknadsvärdet eller nio gånger mer än motsvarande sociala kostnader för guldbrytning [Jones 2022].

4.5 Trender och utveckling 2009–2022

Bitcoin började som ett hobbyprojekt. Den som hade en dator eller spelkonsol, som inte användes till något viktigare för tillfället, kunde ansluta den till bitcoinnätverket och köra beräkningar för att producera bitcoin och därmed delta i lotteriet. Insatserna var små och vinsterna små. Var tionde minut plingade det till hos en deltagare någonstans i världen och hen hade vunnit 50 nya bitcoin, vilket i augusti 2010 motsvarade ungefär 26 svenska kronor, plus äran att få lägga ett block till kedjan.

I takt med att bitcoin ökade i värde, blev det lönsammare att delta. Fler och fler datorer kopplades upp, och när generella datorer inte var snabba nog, övergick allt fler deltagare till att använda grafikprocessorer, vilkas förmåga att utföra många enkla beräkningar parallellt med olika indata visade sig vara väl lämpade för bitcoinberäkningar. För att ytterligare öka snabbheten och därmed chansen att

⁵ Beräkningen utgår från 6.25 bitcoin i vinst var 10e minut och ett bitcoinpris på 280 000 kronor i genomsnitt under 2022.



Figur 4.1. Elförbrukningen för den globala bitcoinproduktionen och priset för en bitcoin har båda ökat ungefär 200 000 gånger sedan augusti 2010.

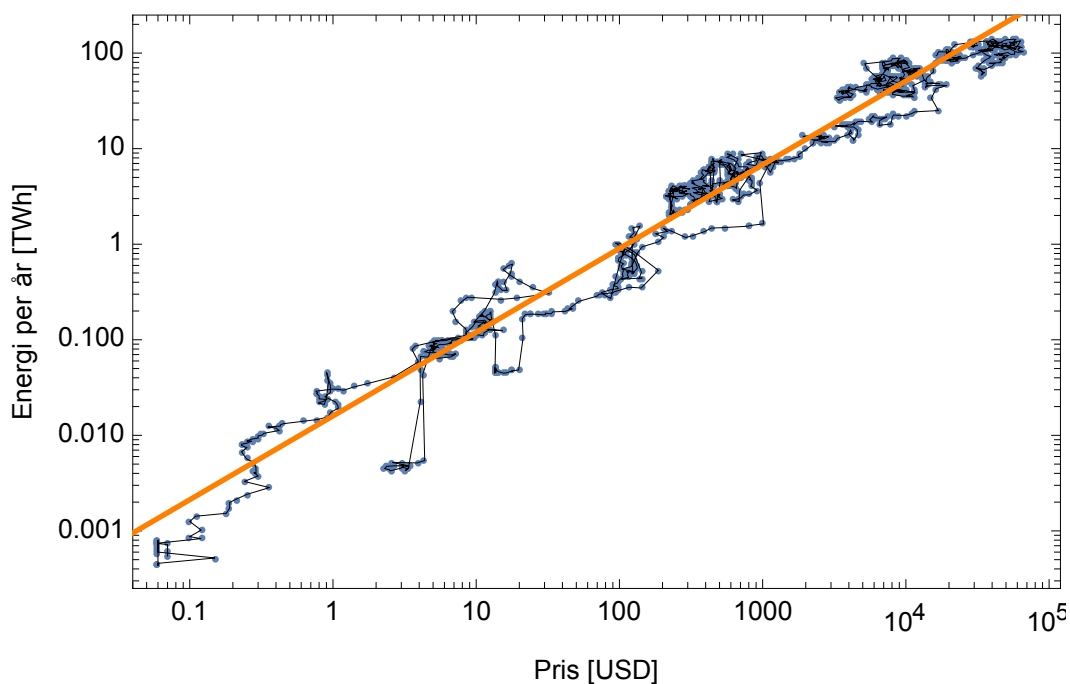
vinna, utvecklades speciella elektronikkretsar just för bitcoin, så kallade *applikations-specifika integrerade kretsar* (application-specific integrated circuit, ASIC).

I tabell 4.1 visas hur antalet bitcoinberäkningar per tidsenhet ("hash rate") har ökat med tiden [Blockchain web]. I runda tal görs 20 biljoner gånger fler beräkningar nu än för tolv år sedan, och de görs inte längre i källaren hos privatpersoner utan i stora hangarliknande anläggningar, som ibland kallas bitcoinfabriker eller bitcoin-gruvor⁶ och kan innehålla miljontals ASICs [Peck 2017].

Nakamoto tycks ha förutsett att fler och snabbare datorer skulle anslutas över tid. För att inte lotteriet skulle utfalla med vinst orimligt ofta och därigenom krascha hela systemet, så byggdes en automatisk reglering av svårigheten in. Nu liksom i början utfaller vinst och ett nytt block skapas i genomsnitt var tionde minut. Om det skulle bli oftare, vilket indikerar att fler beräkningar görs någonstans i världen, så blir kriterierna som skall uppfyllas av en giltig gissning automatiskt snävare, och om tvärtom vinst skulle utfalla mer sällan, så blir det lättare att gissa rätt. Tabell 4.1 visar därför inte bara antalet beräkningar per tiominutersperiod utan kan även tolkas som antalet nitlotter för varje vinstlott.

I figur 4.1 visas hur elförbrukningen, enligt CCAFs beräkningsmodell, har utvecklats sedan augusti 2010 [CCAF web]. Nätverket förbrukar nu globalt ungefär

⁶ Att kalla dem datahallar eller datacentra är dock tveksamt, eftersom ASICs inte är datorer.



Figur 4.2. Sambandet mellan bitcoinpriset och nätverkets globala elförbrukning.

200 000 gånger mer el än 2010. Att ökningen inte är 20 biljoner, som i tabell 4.1, beror på att utrustningen blivit mer specialiserad och energieffektiv. Nettoeffekten av energieffektivisering är dock svår att kvantifiera. I andra branscher leder energieffektivisering på sikt till lägre energiförbrukning, men någon sådan trend syns inte i kryptobranschen på grund av den automatiska svårighetsregleringen. Energieffektivisering ökar lönsamheten, vilket leder till nya investeringar i beräkningsresurser. Av ökade beräkningsresurser följer sedan en ökad svårighetgrad. Vinsten i energieffektivare elektronik motverkas alltså av att det behövs mer elektronik för att avgöra vem som får producera nästa bitcoinblock.

Investeringarna i stora bitcoinfabriker och deras specialiserade elektronik har blivit möjlig tack vare att bitcoin har ökat så mycket i värde fram till hösten 2021, vilket också visas i figur 4.1 (se även figur 5.1). Priset ökade ungefär lika mycket som energiförbrukningen under den period som figuren visar. Vinsten till den som vinner lotteriet och skapar nästa block i kedjan har visserligen minskat från 50 till 6.25 bitcoin, men i traditionell valuta har den samtidigt ökat från 26 till 1 080 000 kronor.

Det syns ett tydligt samband mellan kurvorna i figur 4.1. För att beskriva sambandet matematiskt kan man kombinera dem i samma graf. Ett sådant samband illustreras i figur 4.2, där varje punkt representerar en viss tidpunkt i figur 4.1. Bitcoinpriset visas på den horisontella axeln och den uppskattade elförbrukningen på den vertikala. Båda skalorna har gjorts logaritmiska för att sambandet skall framträda.

Vi ser att punkterna faller nära en rät linje. Om vi anpassar den räta linjens ekvation till datapunkterna med *linjär regression*, så erhålls ekvationen

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{p}{p_0} \right)^{0.9},$$

där E är elenergin, p är bitcoinpriset och E_0 och p_0 är startvärden för respektive storhet vid samma tidpunkt.⁷ Sambandet kan tolkas som att elförbrukningen ökar med 0.9 % för varje procents ökning av bitcoinpriset, och tvärt om. Det är alltså bra för miljön när bitcoinpriset sjunker.

4.6 Ett livscykelperspektiv

Elektroniska kretsar påverkar miljön inte bara under drift, genom sin elförbrukning, utan även i början och slutet av sin livscykel. Kretsarna behöver bytas ut regelbundet, inte för att de upphör att fungera utan för att det kommer ut nya generationer på marknaden som är allt mer energieffektiva och därmed billigare i drift. Bara den mest avancerade elektroniken står sig i konkurrensen. Enligt BMC har det kommit ut ungefär en ny modell på marknaden om året, varje gång med väsentligt förbättrad energieffektivitet [BMC 2022, s 13].

Elektronisk utrustning belastar miljön både när den tillverkas och när den skrotas. Vid tillverkningen används sällsynta eller miljöfarliga ämnen och vid skrotningen riskerar dessa ämnen att komma ut i naturen. Endast 17.4 % av världens elskrot går till dokumenterad återvinning; resten försvinner utanför myndigheters kontroll. En stor del exporteras till utvecklingsländer, där det hamnar på soptippar eller återvinns i informella anläggningar, till stor skada för miljön och människors hälsa [Unitar 2020].

Om det är svårt att uppskatta elförbrukningen, så är det ännu svårare att uppskatta miljöbelastningen från elektronikens livscykel. Den enda studie som undersökt frågan publicerades av de Vries och Stoll 2021 [de Vries 2021], i en artikel som har fått mycket medial uppmärksamhet men också kritik från kryptobranschen. I artikeln uppskattas den ekonomiska livslängden hos bitcoinelektronik till endast 1.29 år. Därefter skrotas utrustningen, eftersom dess ASICs (se avsnitt 4.5) är så specialiserade att de inte kan användas till något annat, inte ens produktion av andra typer av kryptovalutor. Mängden bitcoinelektronik som skrotas varje år uppskattades till 30 700 ton.

Det finns endast några få tillverkare i världen med resurser att tillverka den snabbaste typen av elektronik. Detta bidrar till *halvledarbrist*, alltså långa väntetider

⁷ Ekvationen blir densamma oavsett tidpunkt och oavsett vilken enhet man använder för energi och pris.

vid inköp av produkter som innehåller avancerade integrerade kretsar (chips). Exempel på produkter som drabbas är datorer, telefoner, grafikkort och fordons-elektronik. Halvledarbristen påverkar därmed stora delar av samhället inklusive den elektrifiering som behövs för hållbara transporter och industri. Bitcoinindustrin bidrar till halvledarbristen genom att upp till en fjärdedel av de ledande halvledartillverkarnas kapacitet utnyttjas för bitcoinelektronik, enligt en grov uppskattning [de Vries 2021].

4.7 Alternativ till proof-of-work

Proof-of-work är, som beskrivits i kapitel 3 och avsnitt 4.1, en *konsensusmekanism*, alltså en distribuerad algoritm för att bestämma vem som får lägga nästa block till kedjan. Det är den första och mest kända algoritmen av sitt slag, som var banbrytande när Nakamoto introducerade den 2008 [Nakamoto 2008].

Sedan dess har det föreslagits flera alternativ, varav den främsta konkurrenten kallas *proof-of-stake*. Förenklat innebär den att de som vill vara med och lägga block till kedjan investerar sina egna kryptotillgångar som säkerhet, i stället för beräkningskraft som i proof-of-work. Förutom att proof-of-stake bara konsumerar en bråkdel av den elenergi som krävs för proof-of-work är också miljöbelastningen från produktion och skrotning av elektronik försumbar, eftersom inga stora mängder elektronik behövs [Wendl 2023].

Den näst största kryptovalutan sett till marknadsvärde kallas *ether* och dess blockkedja *Ethereum*. I september 2022 gjorde Ethereum vad ingen annan blockkedja gjort tidigare, nämligen bytte från proof-of-work till proof-of-stake [CCRI 2022, Ethereum web], genom en komplicerad process som föregicks av flera års förberedelser. Som anledning angavs bland annat energiförbrukningen, som har uppskattats till 0.05 % [Ethereum web] eller 0.01 % [CCRI 2022] av vad den var före omställningen.

De flesta nyskapade kryptovalutor de senaste åren bygger på proof-of-stake. Av de sex största kryptovalutorerna som listas i tabell 3.1 kategoriseras endast en, bitcoin, som renodlad proof-of-work, medan tre bygger på proof-of-stake och två uppges ha blandad status.

Den stora frågan är om proof-of-stake är lika säkert som proof-of-work. Digital säkerhet är ett extremt komplicerat ämne och uppfattningarna går isär. Företrädare för bitcoinbranschen talar om elförbrukningen som ”a feature, not a bug” [BMC web]. Proof-of-work-systemets säkerhet är nämligen kopplad till mängden elenergi som förbrukas för att skapa nya block och därigenom validera transaktioner. Ju större mängd total energi som går åt, desto svårare blir det för en enskild aktör att bidra med en majoritet av energin och därmed kunna ta kontroll över systemet.

Elförbrukningen blir därmed ett sätt att försäkra systemets decentralisering genom att koppla det digitala till resurser i den fysiska världen.

På andra sidan i debatten finns forskare och institutioner som hävdar att proof-of-stake är minst lika säkert, till en bråkdel av elförbrukningen. Man menar att om det fanns några säkerhetsrisker så skulle de ha upptäckts vid det här laget, när minst 350 kryptovalutor använder proof-of-stake [de Vries 2021] och representerar i januari 2023 ett marknadsvärde på ungefär halva Sveriges bruttonationalprodukt (se tabell 3.1). Vidare finns inga garantier för säkerheten hos bitcoin i framtiden, när utgivningen av ny valuta som vinst i lotteriet gradvis fasas ut [Auer 2019]. Ethereum angav förbättrad säkerhet som en bidragande anledning till sin omställning [Ethereum web]. Finansinspektionen och Naturvårdsverket anser att ”samma tjänster som bitcoin erbjuder kan erbjudas med nyare och effektivare blockkedjetekniker” och föreslår att ett förbud mot proof-of-work utreds på EU-nivå [FI web].

Om man släpper kravet på att en digital valuta skall vara distribuerad, så finns det andra alternativ till proof-of-work och proof-of-stake. Digitala valutor som ges ut och garanteras av en centralbank eller myndighet behöver ingen konsensusmekanism och har därför, liksom proof-of-stake, försumbar miljöbelastning jämfört med proof-of-work [DB 2021, IVF 2022]. Exempel på sådana digitala valutor är e-kronan, som Sveriges Riksbank har utrett länge utan att komma till beslut [SR 2022], och bKash, som har fått stort genomslag i Bangladesh ekonomi.

4.8 Avslutande reflektioner

Låt oss avslutningsvis återvända till frågan som formulerades i inledningen: Överväger de finansiella och sociala fördelarna med bitcoin och andra proof-of-work-baserade kryptovalutor nackdelarna för miljön? Några svar på frågan sammanfattas, i lätt tillspetsad form, i tabell 4.2.

Att nätverket förbrukar mycket elektricitet är oomtvistat, medan meningarna går vitt isär om nyttan. Den ena sidan menar att elförbrukningen är orimligt stor och påtagligt försvårar en omställning mot ett hållbart samhälle. Man menar också att det finns andra sätt att på ett fullgott sätt validera transaktioner på en blockkedja, som endast drar en bråkdel av den energimängd som bitcoinnätverket kräver. Den andra sidan hävdar att en hög elförbrukningen är det bästa – eller enda – sättet att garantera säkerheten hos ett distribuerat finansiellt system.

Idag används bitcoin relativt lite. Endast 6 % av Sveriges befolkning handlade med kryptovaluta under 2022 och en mycket liten andel av transaktionerna utgör betalning för faktiska varor och tjänster; de flesta transaktioner uppstår som en biprodukt av protokollet och deltagarnas anonymitet, eller används för investering

För bitcoin	Mot bitcoin
Bitcoin konsumerar bara 0.16 % av den globala energiproduktionen	Att bitcoin konsumerar 0.94 % av den globala elproduktionen är mer relevant
Bitcoinelektroniken blir allt energieffektivare	Energien som all bitcoinelektronik behöver ökar trots effektivisering
Klassiska finansiella system, som konsumerar väldigt mycket energi, kan ersättas med bitcoin	Finansiella system håller redan på att transformeras och energiförbrukningen minskar, men de klassiska strukturerna kan inte avskaffas helt
Bitcoinfabriker kan drivas av grön el med utsläpp nära noll	Grön el till bitcoin innebär mindre grön el till annan verksamhet
Bitcoinindustrin kommer att uppmuntra investeringar i grön elproduktion	Den gröna elproduktion som bitcoinindustrin uppmuntrar till kommer den att förbruka själv
Bitcoin kommer att användas överallt och förändra samhället i grunden	Bitcoin används idag relativt lite, och huvudsyftet är spekulering, inte betalning
Bitcoin möjliggör betalningar utan mellanhänder i områden utan välfungerande bankväsende och myndigheter	Bitcoin förenklar penningtvätt, utpressning, skatteflykt och undvikande av internationella sanktioner
Andra konsensusmekanismer är inte lika säkra som proof-of-work	Proof-of-stake är lika säkert och även proof-of-work har säkerhetsrisker
Alla centralstyrda valutor medför risk för missbruk av opålitliga makthavare	Digitala valutor som garanteras av en myndighet undviker energikrävande konsensusmekanismer

Tabell 4.2. Debatten om bitcoin och dess miljöpåverkan är starkt polariserad. Här är några kontroversiella påståenden från båda sidor i debatten, förenklade av utrymmesskäl. De flesta påståenden utvecklas i kapitlet.

och spekulering (se källhänvisningar i kapitel 1). Om bitcoin skulle förbjudas eller upphöra att fungera av någon annan anledning, skulle alltså de flesta människor inte märka någon skillnad.

Men kryptovalutorna och andra digitala valutor drivs av långsiktiga visioner om ett bättre samhälle och ett modernare finansiellt system. Här finns potential till stora energibesparingar, eftersom dagens finansiella infrastruktur med centralbanker, bankkontor, kreditkort, kontanter o.s.v. också förbrukar mycket energi. Vi har redan sett hur bankkontor och kontanter får allt mindre betydelse och ersätts av digitala lösningar, och alla inser att transformationen kommer att fortsätta, men i vilken riktning? Samhället står inför viktiga vägval, och där måste miljöaspekter vägas in tillsammans med de tvärvetenskapliga aspekter som belyses i bokens övriga kapitel. Det gäller att välja en långsiktigt hållbar teknologi innan man skalar upp den till nivåer utan återvändo.

Referenser

- [Auer 2019] Raphael Auer, "Beyond the doomsday economics of 'proof-of-work' in cryptocurrencies", BIS Working Papers, nr 765, jan 2019, <https://www.bis.org/publ/work765.htm>, besökt 2022-12-23
- [Blockchain web] Blockchain.com, "Total hash rate (TH/s)", <https://www.blockchain.com/charts/hash-rate>, besökt 2022-12-30
- [BMC 2022] Bitcoin Mining Council, "Global Bitcoin mining data review Q3 2022", okt 2022, <https://bitcoinminingcouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/2022.10.13-BMC-Presentation-Q3-22-Presentation.pdf>, besökt 2022-11-23
- [BMC web] Bitcoin Mining Council, "Bitcoin Mining Council (BMC): FAQs", <https://bitcoinminingcouncil.com>, besökt 2022-11-27
- [CCAF web] Cambridge Centre for Alternative Finance, "Cambridge Bitcoin electricity consumption index (CBECI)", <https://ccaf.io/cbeci>, besökt 2022-11-23 och 2022-12-30
- [CCRI 2022] Crypto Carbon Ratings Institute, "The Merge: Implications on the electricity consumption and carbon footprint of the ethereum network", sep 2022, <https://carbon-ratings.com/eth-report-2022>, besökt 2022-11-25
- [Crippa 2022] M. Crippa m.fl., "CO2 emissions of all world countries", European Commission JRC/IEA/PBL Report EUR 31182 EN, 2022, <https://doi.org/doi:10.2760/730164>
- [DB 2021] Deutsche Bank Research, "The future of payments: series 2, part II. When digital currencies become mainstream", feb 2021, https://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN-PROD/PROD000000000516270/The_Future_of_Payments%3A_Series_2_-_Part_II_When_d.PDF, besökt 2022-12-27
- [de Vries 2021] Alex de Vries och Christian Stoll, "Bitcoin's growing e-waste problem", *Resources, Conservation & Recycling*, vol 175, artikel 105901, dec 2021, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>
- [de Vries 2022] Alex de Vries, Ulrich Gallersdörfer, Lena Klaußen och Christian Stoll, "Revisiting Bitcoin's carbon footprint", *Joule*, vol 6, nr 3, s 498–502, mar 2022, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.005>

- [Digiconomist web] Digiconomist, "Bitcoin energy consumption index", <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>, besökt 2022-11-23
- [EEA web] European Environment Agency, "Greenhouse gas emission intensity of electricity generation", https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-12/#tab-chart_2, besökt 2022-11-27
- [Ethereum web] Carl Beekhuizen, "Ethereum's energy usage will soon decrease by ~99.95%", maj 2021, <https://blog.ethereum.org/2021/05/18/country-power-no-more>, besökt 2022-11-27; "The Merge", <https://ethereum.org/en/upgrades/merge>, dec 2022, besökt 2022-12-29
- [FI web] Finansinspektionen, "Energikrävande utvinning av kryptotillgångar", okt 2022, <https://www.fi.se/sv/hallbarhet/fi-och-hallbarhet/energikravande-utvinning-av-kryptotillgangar>, besökt 2022-12-29
- [Gallersdörfer 2022] Ulrich Gallersdörfer, Lena Klaaßen och Christian Stoll, "Energy consumption of cryptocurrencies beyond Bitcoin", *Joule*, vol 4, nr 9, s 843–1846, sep 2020, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.013>
- [Hook 2021] Leslie Hook och Dave Lee, "How tech went big on green energy", *Financial Times*, 2021-02-10, <https://www.ft.com/content/0c69d4a4-2626-418d-813c-7337b8d5110d>, besökt 2022-11-27
- [ICAO web] International Civil Aviation Organization, "ICAO carbon emissions calculator", <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset>, besökt 2022-11-27
- [IEA 2022a] International Energy Agency, "Global EV outlook 2022", maj 2022, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>, besökt 2022-11-27
- [IEA 2022b], International Energy Agency, "Data centres and data transmission networks", sep 2022, <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>, besökt 2022-11-27
- [IEA 2022c] International Energy Agency, "World energy outlook 2022", okt 2022, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>, besökt 2022-11-24
- [IVF 2022] Internationella valutafonden, "Digital currencies and energy consumptions", jun 2022, <https://www.imf.org/en/Publications/fintech-notes/Issues/2022/06/07/Digital-Currencies-and-Energy-Consumption-517866>, besökt 2022-11-27
- [Jones 2022] Benjamin A. Jones, Andrew L. Goodkind och Robert P. Berrens, "Economic estimation of Bitcoin mining's climate damages demonstrates closer resemblance to digital crude than digital gold", *Scientific Reports*, vol 12, artikel 14512, sep 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18686-8>
- [Nakamoto 2008] Satoshi Nakamoto, Bitcoin: "A peer-to-peer electronic cash system", 2008, <https://www.bitcoin.com/satoshi-archive>
- [Peck 2017] Morgen E. Peck, "Why the biggest Bitcoin mines are in China," *IEEE Spectrum*, okt 2017, <https://spectrum.ieee.org/bitcoin-mining>, besökt 2023-12-28
- [SCB web] Statistikmyndigheten, "Årlig energistatistik (el, gas och fjärrvärme)", <http://www.scb.se/en0105>, besökt 2022-11-27
- [SR 2022] Sveriges Riksbank, "E-krona", 2022, <https://www.riksbank.se/en-gb/payments-cash/e-krona>, besökt 2022-12-29

- [Statista web] Statista, "Weekly European Union emission trading system (EU-ETS) carbon pricing in 2022", <https://www.statista.com/statistics/1322214/carbon-prices-european-union-emission-trading-scheme>, besökt 2022-12-27
- [Unitar 2020] Unitar, "The Global E-waste Monitor 2020", 2020, <https://ewastemonitor.info/gem-2020>, besökt 2022-12-29
- [Visa 2020] Visa, "Corporate responsibility & sustainability report", <https://usa.visa.com/dam/VCOM/download/corporate-responsibility/visa-2019-corporate-responsibility-report.pdf>, besökt 2022-12-27
- [Wendl 2023] Moritz Wendl, My Hanh Doan och Remmer Sassen, "The environmental impact of cryptocurrencies using proof of work and proof of stake consensus algorithms: A systematic review", *Journal of Environmental Management*, vol 326, del A, artikel 116530, jan 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116530>