

VISIIRI.

Vihreän siirtymän ICT-ekosysteemi



Euroopan unionin
osarahoittama



Elinvoimakeskus

ILMASTO- JA YMPÄRISTÖ- YSTÄVÄLLISEN ICT:N PERUSTEET

*Ymmärrys,
ajattelutapa
ja käytännön
soveltaminen*



Alkusanat

Digitalisaatio on muuttanut tapaamme tehdä töitä, kommunikoida ja kuluttaa palveluja. Palvelut ovat pilvessä, tieto liikkuu verkossa ja työ tehdään sovelluksissa. Kaikki tuntuu aineettomalta. Fyysinen todellisuus on kuitenkin toinen. Jokaisen digipalvelun taustalla on energiaa kuluttava infrastruktuuri, globaalit laiteketjut ja elinkaari, joka alkaa raaka-aineiden louhinnasta ja päättyy sähköiseen jätteeseen.

ICT-alan ympäristöjalanjälki kasvaa nopeammin kuin millään muulla toimialalla, ja samaan aikaan alalla on ainutlaatuinen mahdollisuus vähentää ympäristöhaittoja kaikkialla muualla yhteiskunnassa. Tämä kaksoisrooli sekä kuormittajana että ratkaisijana tekee Green ICT:stä strategisesti tärkeän aiheen jokaiselle organisaatiolle, joka käyttää tai tuottaa digitaalisia palveluja.

Tämä oppimateriaali on tuotettu osana Visiiri – Vihreän siirtymän ICT-ekosysteemi -hanketta, joka syntyi käytännön havainnosta: tietoisuus ja toimet eivät olleet vielä kohdanneet suomalaisessa ICT-kentässä. Materiaalin tavoitteena on kuroa tätä välimatkaa umpeen tarjoamalla kokonaiskuva ICT:n ympäristövaikutuksista sekä käytännön työkaluja niiden hallintaan.

Materiaali kulkee datakeskuksista matkaviestinverkkoihin, laitteista ohjelmistoihin ja tekoälystä kestävyysajatteluun. Yhteinen lanka on sama läpi kaiken: vaikutukset ovat todellisia, kasvavia ja johdettavissa, kun niitä mitataan, omistetaan ja kehitetään systemaattisesti. Toivomme tämän materiaalin tarjoavan niin johtajille, kehittäjille kuin hankintavastaavillekin konkreettisen tarttumapinnan kestävämmän ICT:n rakentamiseen.

Visiiri-hankkeen tiimi



Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2	3.2. Energiankulutus datakeskuksissa	20
1. Johdanto.....	7	3.3. Datakeskuksen energiatehokkuuden parantaminen	20
1.1. Visiiri-hanke: mistä se syntyi ja mitä se tavoittelee	7	3.4. Energian uudelleenkäyttö.....	22
1.2. Mitä Green ICT tarkoittaa.....	8	3.5. Uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen.....	23
1.3. Green ICT ei ole vain IT:n asia.....	9	3.6. Hiilijalanjäljen seuranta ja hallinta.....	24
2. Vaikutusten kokonaiskuva	11	3.7. Vihreän datakeskuksen peruselementit ja periaatteet	25
2.1. Digitaalinen ei ole aineeton – se on vain piilossa.....	11	3.8. Parhaat käytännöt ympäristösuorituskykyisen datakeskuksen toteuttamisessa	28
2.2. Elinkaari: vaikutus ei ala käytöstä eikä lopu siihen	11	3.9. Yritysten esimerkkejä, saavutetut hyödyt ja opit.....	30
2.3. Lukuja ja rajoituksia: mitä tiedetään, mitä ei.....	12	3.10. Tulevaisuuden suuntaukset vihreissä datakeskuksissa	31
2.4. Jalanjälki ja kädenjälki: kokonaiskuva vaatii molemmat	13	4. Matkaviestinverkot.....	38
2.5. Kun vastuu on hajallaan – ja mitä siitä seuraa.....	14	4.1. Energiankulutus matkaviestinverkoissa	38
2.6. Sääntely: vapaaehtoisuudesta velvoitteeksi	15	4.2. Matkaviestinverkkojen energiatehokkuuden parantaminen	39
2.7. Mittaaminen: määritelmä ennen mittaria.....	15	4.3. Sääntelyn rooli.....	40
3. Datakeskukset.....	18	4.4. Kestävyyseraportointi	40
3.1. Mikä on datakeskus.....	18	4.5. Standardointi	41
		4.6. Johtopäätökset.....	42



5.	ICT-laitteet	45	7.1.	Ohjelmistojen energiakulutus.....	62
5.1.	Raaka-aineiden hankinta.....	46		”Et voi parantaa sitä, mitä et mittaa”	62
5.2.	Design.....	48		Mittaamisen haasteet	63
5.3.	Tuotanto	48	7.2.	Energianmittauksen metodologia.....	63
5.4.	Käyttö.....	49		Käytöskenaariot ja mittaustapaukset.....	63
5.5.	Käytöstä poisto ja kierrätys.....	50		Mittausprosessi.....	64
6.	Ohjelmistot	53		Automatisointi.....	64
6.1.	Mitä on Green Coding?	53		Mittausympäristö	65
6.2.	Frontend – Käyttöliittymät ja asiakaspuoli.....	53		Koordinointi ja orkestrointi	66
6.3.	Backend – Palvelinjärjestelmät	54		Datan analysointi ja ympäristövaikutukset.....	67
6.4.	Tekoäly (AI) ja koneoppiminen.....	54	7.3.	Mittalaitteet ja -ohjelmistot.....	68
6.5.	Kompromissit (Trade-offs)	55		Fyysiset mittarit.....	68
6.6.	Kestävä ohjelmistokehitys: Miten kestävyys voidaan huomioida koko ohjelmistokehityksen elinkaaren aikana?.....	56		Ohjelmistopohjaiset mittarit	70
	Datan rooli ympäristökestävyydessä.....	56		Laskennalliset mallit ja epäsuora mittaaminen.....	70
	Kestävyyttä läpi ohjelmiston koko elinkaaren	57	7.4.	Mittausjärjestelyn toteutus.....	71
7.	Ohjelmiston energiankulutus ja mittaaminen	62		Mittausten yleinen rakenne	72
				Skriptivetoinen mittaus.....	72



Konttipohjainen mittaus	73	8.6. Esimerkki: Ravinteen kierto luonnossa, tyyppi	91
Backend-palveluiden mittaus	73	8.7. Kestävyyssajattelu on aikaorientoitunutta.....	92
Käyttöliittymien mittaaminen ohjelmistorobotiikalla.....	74	8.8. Rajattomat pelit ja rajaton ajattelu	93
PowerGoblin: mittausjärjestelyn koordinoitavuus	74	8.9. Esimerkki peliteorian tärkeydestä: yhteismaan tragedia.....	95
Mittausdatan analysointi	75	8.10. Kestävyyssajattelu on itsenäistä ajattelua.....	95
7.5. Ohjelmistojen kestävyysvaikutukset.....	79	Kestävyyssajattelun viisi teesiä.....	96
Kestävyyssulottavuudet.....	79	9. Yhteenveto	98
Esimerkki ohjelmistojen vaikutuksista – Airbnb	80		
Ymmärryksen lisääminen SusAF -kehysten avulla.....	80		
Vaikutusten visualisointi SusAD-kuvaajan avulla.....	83		
Vinkkejä SusAF-kehysten käyttöön ymmärryksen lisäämiseksi	84		
8. Kestävyyssajattelu.....	87		
8.1. Aloita kestävyys mielessä	87		
8.2. Ajattelun syvyys ja leveys	88		
8.3. Kestävyyssajattelu on systeemistä.....	89		
8.4. Systeemiajattelun työkaluja	89		
8.5. Esimerkki: Takaisinkytkentä.....	91		

1

Johdanto



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

1. Johdanto

Digitalisaatio esitetään usein aineettomana: palvelu on pilvessä, työ tehdään sovelluksissa ja tieto liikkuu verkossa. Fyysinen todellisuus on toinen. Jokaisen digipalvelun taustalla on sähköä kuluttava laskentainfrastruktuuri, laiteketjujen materiaalivirrat ja järjestelmä, joka synnyttää jätettä laitteiden ja komponenttien vanhentuessa.

Tämä ei ole pieni ilmiö. ICT-alan ympäristöjalanjälki kasvaa nopeammin kuin millään muulla toimialalla. Energiankulutus on jalanjäljen suurin tekijä: kaikki ICT-toiminta laskennasta verkkoliikenteeseen vaatii energiaa, ja esimerkiksi älypuhelimien elinkaaren hiilijalanjäljestä jopa 80–85 % syntyy käyttövaiheen ulkopuolella.

Samaan aikaan ICT:llä on merkittävä rooli muiden toimialojen ympäristöhaittojen vähentämisessä. Alan kädenjäljen potentiaali on arvioitu jopa kymmenkertaiseksi sen omaan jalanjälkeen nähden. Älykkäät energiaratkaisut, logistiikan optimointi, rakennusten automaatio ja virtuaaliset kokoukset ovat esimerkkejä siitä, miten ICT voi vähentää päästöjä ja resurssien käyttöä muualla yhteiskunnassa.

Yrityksille tämä tarkoittaa, että ICT:n ympäristövaikutukset eivät ole erillinen vastuullisuusliite. Ne ovat osa strategiaa, riskienhallintaa ja kilpailukykyä – ja yhä useammin myös kysymys asiakasvaatimuksista ja sääntelyn suunnasta. EU:n digitaalistrategian lähtökohtana on, että digitaalitekniikat eivät saa kuluttaa enemmän energiaa kuin ne säästävät. Konkreettisenä tavoitteena on, että datakeskukset ovat ilmastoneutraaleja, energiatehokkaita ja kestäviä viimeistään vuonna 2030.

1.1. Visiiri-hanke: mistä se syntyi ja mitä se tavoittelee

Tämä itseopiskelumateriaali on tuotettu osana Visiiri – Vihreän siirtymän ICT-ekosysteemi -hanketta. Hanke syntyi käytännön havainnosta: suomalaisessa ICT-kentässä tietoisuus ja toimet eivät olleet vielä kohdanneet. Vuoden 2021 selvityksen mukaan 78 % yrityksistä ei ollut käynnistänyt ICT:hen liittyviä ilmastotoimia, ja vuoden 2023 kyselyssä 42 % ICT-yrityksistä ei tiedostanut toimintansa ilmasto- ja ympäristövaikutuksia lainkaan.

Visiiri on kuuden toimijan yhteishanke, jota koordinoi TIEKE Tietoyhteiskunnan kehittämiskeskus ry. Mukana ovat TIVIA ry sekä Itä-Suomen yliopisto, LUT-yliopisto, Oulun yliopisto ja Turun yliopisto.



Hanke rakentaa Suomeen kansallisen Green ICT -ekosysteemin verkottamalla toimijoita, kehittämällä mittaamista ja tuottamalla käytännön materiaalia yritysten käyttöön. Hankkeen aineistot löytyvät osoitteesta greenict.fi.

Konkreettisina tuloksina syntyy tietopaketteja ICT:n eri osa-alueista – datakeskuksista ja infrastruktuurista laitteiden ja ohjelmistojen kautta – sekä tämä itseopiskelumateriaali, jonka avulla alan henkilöstö voi omaksua ilmasto- ja ympäristöystävällisen ICT:n perusteet.

Materiaalissa kulkee kaksi punaista lankaa:

- Ensimmäinen on kokonaiskuva: mistä vaikutukset syntyvät ja miten ne liittyvät toisiinsa.
- Toinen on johtamisen logiikka: mitä voi mitata, mitä voi ohjata ja miten hyvät aikomukset muutetaan käytännöksi.

1.2. Mitä Green ICT tarkoittaa

Tätä kokonaisuutta kutsutaan nimillä Green ICT, Green IT tai kestävä ICT. Yleisesti käytetty lähtökohta on Murugesanin (2008) määritelmä: tietokoneita ja niihin liittyviä järjestelmiä käytetään tehokkaasti ja tarkoituksenmukaisesti niin, että ympäristövaikutus jää mahdollisimman pieneksi koko elinkaaren aikana.

Määritelmä jakautuu kahteen toisiaan täydentävään ajatukseen:

ICT:stä tehdään itsestään vihreämpää.

Tämä tarkoittaa yrityksen oman teknologian jalanjäljen pienentämistä: energiatehokkuutta, vastuullista hankintaa, laitteiden elinkaaren pidentämistä sekä kierron ja sähköisen jätteen hallintaa. Tällä hetkellä vain noin 22 % elektroniikkajätteestä kierrätetään, joten parantamisen varaa on paljon.

ICT:tä käytetään muiden toimintojen viherryttämiseen.

ICT voi vähentää päästöjä ja materiaalihukkaa muualla: älykkäillä energiaratkaisuilla, etätyöllä, logistiikan optimoinnilla, prosessien automatisoinnilla ja resurssien tarkemmalla käytöllä. Kädenjälkivaikutukset ovat suurimmat liikenteen, logistiikan, rakentamisen ja valmistavan teollisuuden aloilla.

Näitä ei pidä asettaa vastakkain. Yritys tarvitsee molemmat: pienemmän jalanjäljen omassa ICT:ssä ja suuremman kädenjäljen ratkaisuisaan.



1.3. Green ICT ei ole vain IT:n asia

Green ICT ei ole pelkästään IT-osaston teema. Se koskee koko organisaatiota, käytännössä jokaista, joka tekee päätöksiä teknologiasta, hankinnoista tai työtavoista:

- Hankintaosasto päättää, mitä ostetaan ja millä ehdoilla.
- Johto päättää, mitä mitataan ja mitä priorisoidaan.
- Talousosasto päättää, mitä pidetään kannattavana ja millä aikajänteellä.
- Kehitystiimi päättää, kuinka paljon laskentaa ja dataa palvelu tarvitsee.
- Infran ja verkon päättäjät päättävät kapasiteetista ja tehokkuudesta.
- Jokainen työntekijä vaikuttaa arjen valinnoillaan: laitteiden käyttö, videokokoukset, datan säilytys, tulostus ja laitteiden palautus.

Tutkimus osoittaa johdonmukaisesti, että organisaatiot saavat parempia tuloksia, kun Green ICT kytketään osaksi liiketoimintastrategiaa eikä käsitellä erillisenä teknisenä hankkeena. Johdon sitoutuminen on erityisen ratkaisevaa: organisaatioissa, joissa ylin johto aktiivisesti ajaa vihreän ICT:n tärkeyttä, investoinnit ovat

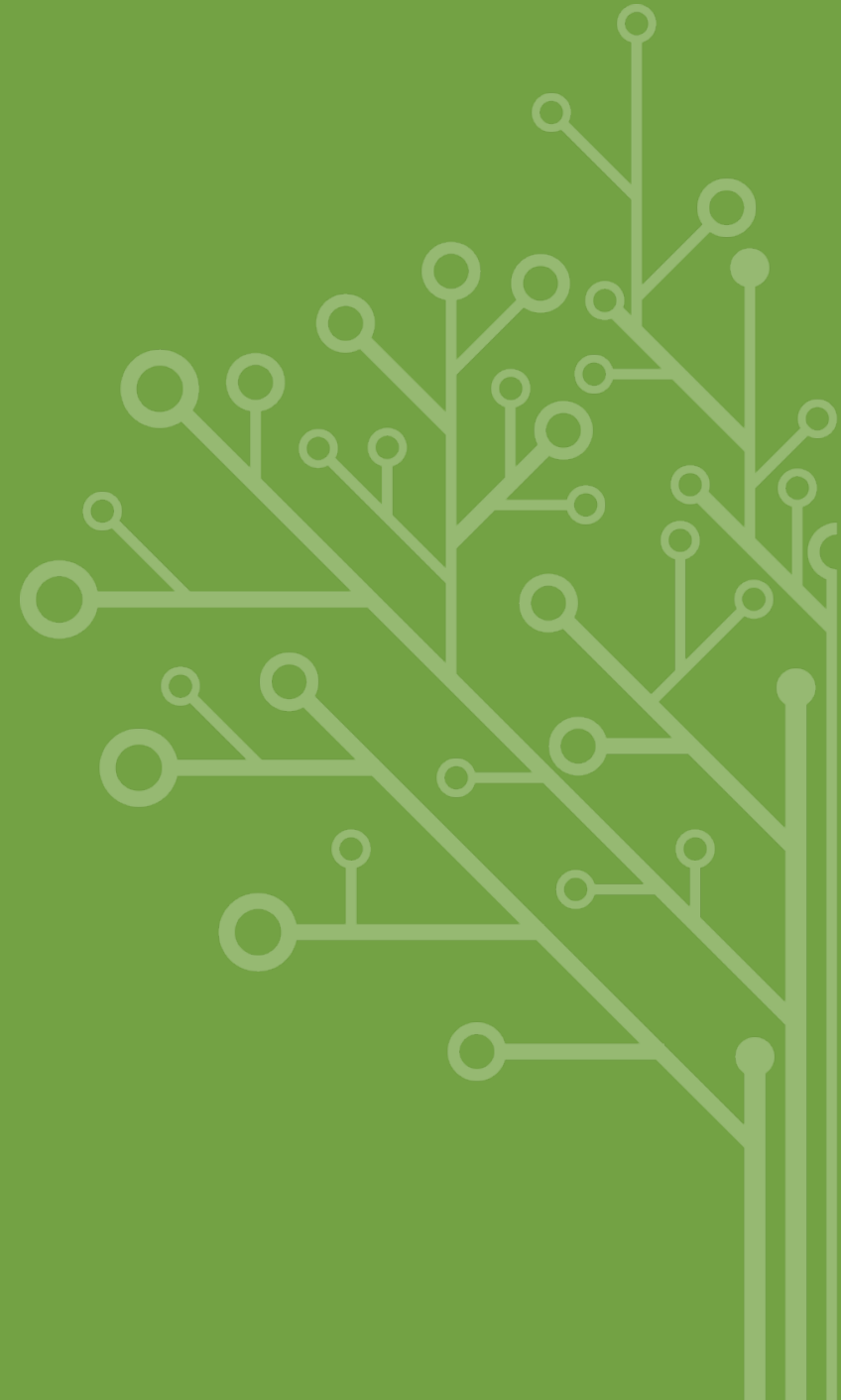
suurempia ja tulokset niin ympäristön kuin talouden kannalta merkittävästi parempia.

Liikenne- ja viestintäministeriön kansallinen ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategia tunnistaa kuusi keskeistä aluetta, joihin suomalaisen ICT-kentän tulisi löytää ratkaisuja: infrastruktuurin ympäristöystävällisyys, datatalouden kestävyys, kestävä materiaalivirrat ja kiertotalous, mittaamisen kehittäminen, kuluttajien tietoisuus sekä nousevien teknologioiden hyödyntäminen. Visiiri-hanke on pyrkinyt vastaamaan näihin kaikkiin.

Tämä materiaali tarjoaa eri rooleille erilaisen tarttumapinnan: johdolle ohjauslogiikan, kehittäjille teknisen vaikutusketjun ja hankinnalle sekä operoinnille käytännön vipuvarret.

2

Vaikutusten kokonaiskuva



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

2. Vaikutusten kokonaiskuva

Tämä luku vastaa yhteen kysymykseen: mistä ICT:n ympäristövaikutukset tulevat, mitä niistä tiedetään ja miten kokonaisuutta kannattaa jäsentää yrityksessä.

2.1. Digitaalinen ei ole aineeton – se on vain piilossa

Digitalisaation ympäristövaikutus on hankala hahmottaa, koska se ei näy käyttäjälle samalla tavalla kuin savupiippu tai jätekuorma. Palvelu on ruudulla, eikä ruutu kerro, mitä taustalla tapahtuu: kuinka monta palvelinkyselyä syntyy, missä data sijaitsee, kuinka paljon verkko siirtää ja mitä kaikkea varmuuskopioidaan.

Silti jokainen digitaalinen toiminto on pohjimmiltaan samaa kuin mikä tahansa tuotanto: se kuluttaa energiaa ja materiaaleja ja rakentuu

laite- ja toimitusketjujen varaan. Kun laiteketju on globaali ja palvelu hajautettu, vaikutus sirpaloituu – ja juuri siksi se jää helposti näkymättömiin.

2.2. Elinkaari: vaikutus ei ala käytöstä eikä loppu siihen

Hyvä tapa jäsentää ICT:n ympäristövaikutuksia on elinkaari, joka jakautuu kolmeen vaiheeseen: valmistukseen, käyttöön ja käytöstä poistoon. Malli näyttää yksinkertaiselta, mutta se korjaa yhden yleisimmistä harhaluuloista: että ICT:n ympäristövaikutus olisi lähinnä sähkölasku.

Todellisuudessa iso osa laitteiden elinkaarivaikutuksesta syntyy jo ennen kuin laite ehtii työpöydälle. Kannettavan tietokoneen tai älypuhelimien valmistus vaatii harvinaisten metallien louhintaa, energiaintensiivisiä tuotantoprosesseja ja pitkiä globaaleja toimitusketjuja. Monille laitteille valmistus kattaa suurimman osan koko elinkaaren päästöistä. Tämä tekee hankinnasta ympäristöpäätöksen – usein merkittävämmän kuin mikään käytönaikainen optimointi. Vähemmän ostaminen, paremman



ostaminen ja laitteiden pitäminen pidempään ovat organisaation vaikuttavimpia valintoja.

Käyttövaiheessa vaikutus jakautuu laitteisiin, verkkoihin, konesaleihin, ohjelmistoihin ja datavirtoihin. Näiden välillä on tärkeä ero: laitteiston energiankulutusta on suhteellisen helppo mitata, mutta ohjelmistojen vaikutus jää usein näkymättömiin – vaikka se on merkittävä ja siihen pystyy vaikuttamaan jo kehitysvaiheessa.

Käytöstä poisto on elinkaaren vaihe, jota aliarvioidaan eniten. Globaalisti syntyi vuonna 2022 ennätyksellinen 62 miljoonaa tonnia sähköistä jätettä – 82 % enemmän kuin vuonna 2010 – ja vain noin 22 % siitä kierrätettiin virallisesti [1]. Määrän ennustetaan nousevan 82 miljoonaan tonniin vuoteen 2030 mennessä. Loput päätyivät kaatopaikoille tai epäviralliseen käsittelyyn, jossa haitalliset aineet vapautuvat ympäristöön – ja samalla arvokkaat metallit ja komponentit jäävät hyödyntämättä. Yrityksessä tämä tarkoittaa, että laitteiden elinkaaren hallinta ei ole vain jätehuollon sopimusasia. Se on prosessi, joka alkaa hankinnasta: kuka omistaa laitteen elinkaaren, miten tietoturva hoidetaan niin että kierto on mahdollinen, ja mitä tapahtuu laitteelle kun se poistetaan käytöstä.

Elinkaaren läpileikkaavia tekijöitä ovat energia, data ja vesi. Energia on näistä keskeisin: kaikki ICT-toiminta laskennasta verkkoliikenteeseen vaatii sähköä, ja sähkön tuotantotapa ratkaisee pitkälti sen, paljonko siitä syntyy päästöjä. Data on toinen: mitä enemmän kerätään, siirretään, säilytetään ja varmuuskopioidaan, sitä enemmän kuormaa syntyy joka vaiheessa. Vesi puolestaan on jäähdytyksen kautta yhä useamman konesalin merkittävä resurssi – kysymys, joka nousee esiin erityisesti alueilla, joilla vesivarat ovat niukat.

2.3. Lukuja ja rajauksia: mitä tiedetään, mitä ei

ICT:n ympäristövaikutuksista on paljon lukuja liikkeellä, ja ne vaihtelevat lähteestä riippuen. Vaihtelun syy on useimmiten se, että rajaukset ovat erilaiset – ei se, että tutkijat olisivat eri mieltä perusilmiöstä.

Energiankulutuksesta tiedetään melko luotettavasti, että konesalien sähkönkulutus oli vuonna 2024 jo noin 415 TWh eli noin 1,5 % maailman sähkönkulutuksesta, ja sen ennustetaan lähes kaksinkertaistuvan noin 945 TWh:iin vuoteen 2030 mennessä [2]. ICT-sektorin käyttöaikainen kokonaiskulutus oli arviolta noin 1 000 TWh



vuonna 2023, kasvun painottuessa datakeskuksiin ja tekoälyyn. [3] Hyvä uutinen on, että sektorin kasvihuonekaasupäästöt ovat viime vuosina kääntyneet lievään laskuun uusiutuvan energian yleistymisen myötä. Huono uutinen on, että sähkönkulutus kasvaa edelleen, ja tehokkuuden parantuminen yksin ei riitä kompensoimaan volyymin kasvua.

Kasvihuonekaasupäästöistä käytetään usein haarukka 2–4 % globaaleista päästöistä – samaa kokoluokkaa kuin koko lentoliikenteen päästöt [4]. Ilman määrätietoisia toimia osuus voi kasvaa merkittävästi vuoteen 2040 mennessä.

Yritykselle olennainen viesti ei ole tarkka prosenttiluku vaan se, mitä laskemisen tapa kertoo: mittaaminen on vaikeaa, ja tulokset riippuvat siitä, mitä lasketaan mukaan. Lasketaanko vain käyttöaikainen energia vai myös laitteiden valmistus? Entä alihankintaketjut ja käyttäjälaitteet? Tämä ei tarkoita, ettei vaikutusta olisi – se tarkoittaa, että rajaukset on tehtävä näkyviksi ennen kuin lukuja vertaillaan.

2.4. Jalanjälki ja kädenjälki: kokonaiskuva vaatii molemmat

Tähän asti on puhuttu ICT:n omasta ympäristökuormasta – sen jalanjäljestä. Mutta se on vain puolet kuvasta. ICT on samanaikaisesti yksi merkittävimmistä ympäristökuormittajista ja yksi tehokkaimmista välineistä kuorman vähentämiseen muualla. Tätä toista puolta kutsutaan kädenjäljeksi: se tarkoittaa positiivista ympäristövaikutusta, jonka ICT mahdollistaa muilla sektoreilla – päästöjä ja resurssinkäyttöä, jota ei olisi syntynyt ilman digitaalista ratkaisua. Hilty ja Aebischer ovat vakiinnuttaneet tämän jalanjälki–kädenjälki-kehysten tieteelliseen keskusteluun, ja se on nykyään standarditapa jäsentää ICT:n suhdetta ympäristöön. [5]

Kädenjäljen potentiaali on huomattava. GeSI:n SMARTer2030-raportin mukaan ICT-ratkaisut voisivat vuoteen 2030 mennessä mahdollistaa päästövähennyksiä, jotka ovat lähes kymmenkertaiset suhteessa ICT-sektorin omaan kuormaan [6]. Käytännön esimerkkejä on runsaasti: älykkäät energiajärjestelmät, jotka tasapainottavat sähköntuotantoa ja tekevät uusiutuvasta energiasta tehokkaampaa; etätö ja digitaaliset palvelut, jotka vähentävät työmatkoja ja liikematkustamista; logistiikan optimointi, joka leikkaa polttoaineenkulutusta; älyrakennukset, jotka



automatisoivat lämmityksen ja jäähdytyksen; täsmäviljely, joka vähentää lannoite- ja vesimäärää.

Tähän liittyy kuitenkin kriittinen ehto: kädenjälki ei synny automaattisesti. Se edellyttää, että digitaalinen ratkaisu todella korvaa fyysisen prosessin tai tehostaa resurssinkäyttöä mitattavasti. Jos ratkaisu vain lisää kulutusta tai luo uutta kysyntää, kädenjälkeä ei synny – jalanjälki kasvaa.

Tämä on myös syy, miksi jalanjälkeä ja kädenjälkeä ei pidä asettaa vastakkain. Yritys tarvitsee molemmat: pienemmän jalanjäljen omassa ICT:ssä ja suuremman kädenjäljen ratkaisuissaan. Pelkästään omaa kulutusta vähentämällä menetetään kädenjäljen mahdollisuus. Pelkästään kädenjälkeen keskittymällä omaa jalanjälkeä ei johdeta.

2.5. Kun vastuu on hajallaan – ja mitä siitä seuraa

Green ICT:n yksi käytännön ongelma ei ole tiedon puute vaan omistajuuden puute. Organisaatioissa, joissa asiaa ei ole erikseen osoitettu kenellekään, se kuuluu ikään kuin kaikille – mikä käytännössä tarkoittaa, että se ei kuulu kenellekään.

Tämä näkyy tunnistettavina kuvioina. Hankinta ostaa laitteet halvimmalla ilman elinkaarikriteeriä, koska kukaan ei ole asettanut sellaista vaatimukseksi. IT poistaa vanhan laitteen käytöstä, mutta se jää varastoon, koska palautusprosessia ei ole. Kehitystiimi rakentaa palvelun, joka käyttää moninkertaisen määrän laskentatehoa tarpeeseen nähden, koska energiankulutus ei ole koskaan ollut suunnittelukriteeri. Ohjelmistoon lisätään ominaisuus, joka kerää dataa ”varmuuden vuoksi” – ja data jää pyörimään palvelimilla vuosiksi, koska kukaan ei omista sen elinkaarta. Pilvilasku kasvaa kuukaudesta toiseen, mutta yhteys kasvun ja tehtyjen kehityspäätösten välillä ei ole kenenkään näkyvissä.

Yhteistä näille on, että jokainen päätös on yksittäisenä rationaalinen – mutta kokonaisuus ei ole kenenkään vastuulla.

Tutkimus vahvistaa, että tähän auttaa nimenomaan strateginen kytkentä: organisaatiot, joissa Green ICT on osa liiketoimintastrategiaa eikä erillinen IT-hanke, saavat parempia tuloksia sekä ympäristön että talouden kannalta. Johdon sitoutuminen on ratkaisevaa – ei siksi, että johto tekisi tekniset päätökset, vaan siksi, että ilman johdon asettamia tavoitteita ja mittareita hajautetut päätökset optimoituvat väärin asioihin. [7, 8]

Käytännössä tämä tarkoittaa, että Green ICT tarvitsee omistajan – jonkun, jonka tehtävä on pitää kokonaiskuva näkyvissä ja varmistaa, että niin laite- kuin ohjelmistopuolen päätökset tukevat yhteistä suuntaa.

2.6. Säätely: vapaaehtoisuudesta veloitteeksi

Green ICT:n ympärillä ei ole vain arvoja ja strategioita vaan myös kehikkoja ja veloitteita, joiden painoarvo kasvaa jatkuvasti. Laajin viitekehys on YK:n kestävän kehityksen tavoitteet. EU-tasolla keskeinen käsite on kaksoissiirtymä: vihreä ja digitaalinen muutos nähdään toisiaan tukevinä, ei kilpailevinä tavoitteina. Konkreettisin yksittäinen tavoite on, että EU-alueen datakeskusten on oltava ilmastoneutraaleja ja energiatehokkaita viimeistään vuonna 2030 [1, 9]. Vuonna 2024 voimaan tullut ekosuunnitteluasetus (ESPR) tuo tuotepassit ja sitovat ympäristövaatimukset myös ICT-laitteistolle, mikä tulee vaikuttamaan hankintapäätöksiin koko EU:n alueella [10].

Suomessa kansallinen ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategia on yksi maailman ensimmäisistä alan kansallisista strategioista. Se tunnistaa kuusi painopistettä – viestintäverkkojen energiatehokkuus,

datakeskukset, laitteet ja elinkaari, mittaaminen ja data, ICT:n mahdollistava rooli sekä kuluttajatietoisuus – ja korostaa erityisesti mittaamisen puutetta: ilman vertailukelpoista dataa vaikutuksia on vaikea johtaa [11]. Visiiri-hanke on suora vastaus tähän tarpeeseen.

Organisaatioille tämä tarkoittaa, että sääntelyn suunta on selvä. Raportointivaatimukset tiukkenevat, hankintastandardit nousevat ja tuotteiden ympäristövaatimukset kasvavat. Parhaassa asemassa ovat ne, jotka aloittavat nyt – rakentamalla tietoisuutta, mittaamalla lähtötason ja integroimalla Green ICT:n osaksi omaa strategiaa.

2.7. Mittaaminen: määritelmä ennen mittaria

”Et voi johtaa sitä, mitä et mittaa” on ICT:ssä konkreettinen ongelma. Yrityksellä voi olla hyvä data energiankulutuksesta kiinteistöissä, mutta ei pilvessä; hyvä data laitemääristä, mutta ei elinkaarista; hyvä data kustannuksista, mutta ei kuorman syistä. Mittaamisen ensimmäinen vaihe ei siis ole mittarin valinta, vaan määritelmä: mitä lasketaan mukaan ja millä rajauksella.



Lähteet

[1] Baldé, C. P. ym. (2024). The Global E-waste Monitor 2024. ITU & UNITAR.

[2] IEA (2025). Energy and AI. International Energy Agency.

[3] Malmodin, J. ym. (2024). ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome. Ericsson.

[4] Freitag, C. ym. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9), 100340. DOI: 10.1016/j.patter.2021.100340

[5] Hilty, L. M., & Aebischer, B. (toim.) (2015). ICT Innovations for Sustainability. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 310. Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-09228-7

[6] GeSI & Accenture Strategy (2015). #SMARTer2030: ICT Solutions for 21st Century Challenges.

[7] Lei, C. F. ym. (2023). Green IT/IS adoption and environmental performance: The synergistic roles of IT–business strategic alignment

and environmental motivation. *Information and Management*, 60(8), 103886.

[8] Mithas, S., Khuntia, J., & Roy, P. K. (2010). Green Information Technology, Energy Efficiency, and Profits: Evidence from an Emerging Economy. *ICIS 2010 Proceedings*.

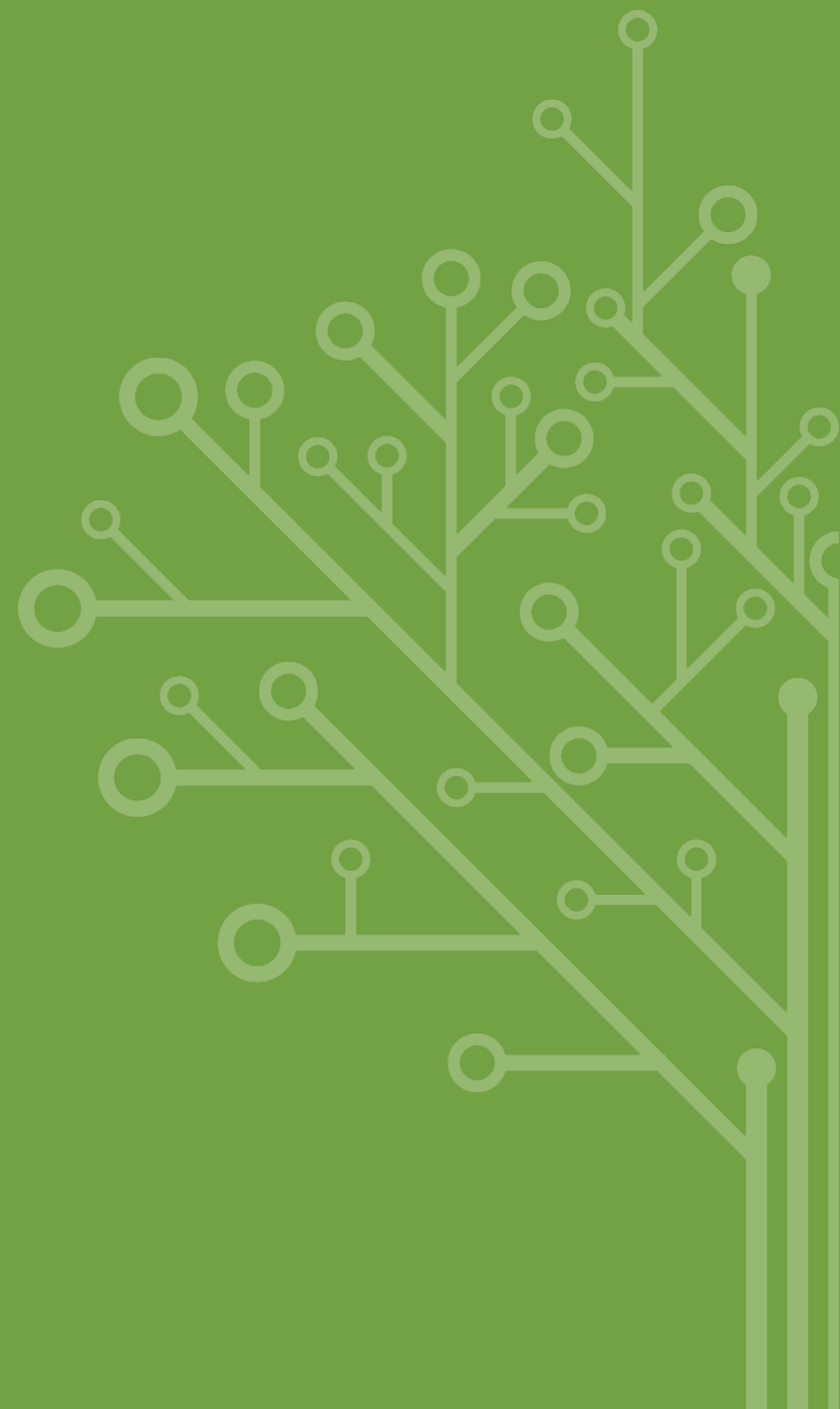
[9] European Commission. Green digital sector.

[10] Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council on Ecodesign for Sustainable Products.

[11] Liikenne- ja viestintäministeriö (2021). ICT-alan ilmasto- ja ympäristöstrategia. LVM julkaisuja 2021:6.

3

Datakeskukset



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

3. Datakeskukset

3.1. Mikä on datakeskus

Tässä oppaassa datakeskuksia tarkastellaan osana ICT-alan vihreää siirtymää. Tavoitteena on tehdä datakeskusten ympäristövaikutukset ymmärrettäviksi, mitattaviksi ja käytännössä parannettaviksi. Siksi tarkastelu sidotaan datakeskuksen toiminnan peruslogiikkaan sekä niihin mittareihin, joilla ympäristösuorituskykyä voidaan arvioida vertailukelpoisesti.

Datakeskus on fyysinen ympäristö, jossa tuotetaan digitaalisia palveluja laskennan, tallennuksen ja tietoliikenteen avulla. Se muodostuu tiloista, IT-laitteista ja niitä tukevasta infrastruktuurista. IT-laitteet, kuten palvelimet, tallennusjärjestelmät ja verkkolaitteet, suorittavat varsinaisen tiedonkäsittelyn. Niiden toimintaa tukevat muun muassa sähkönsyöttö, UPS-järjestelmät, varavoima, jäähdytys, automaatio, valvonta, tietoliikenneyhteydet sekä turvallisuusjärjestelmät. Nämä yhdessä mahdollistavat datakeskuksen luotettavan ja jatkuvan toiminnan ympäri vuorokauden [1][2].

Datakeskusympäristöt vaihtelevat pienistä paikallisista palvelinhuoneista erittäin suuriin datakeskuksiin, joita kutsutaan hyperskaalaluokan datakeskuksiksi. Datakeskusten kokoa voidaan kuvata esimerkiksi pinta-alalla, räkki- tai palvelinmäärällä sekä enimmäissähköteholla. Näistä sähköteho on keskeinen kapasiteetin ja mitoituksen mittari, sillä se kytkeytyy suoraan IT-laitteiden suorituskykyyn sekä jäähdytyksen ja muun tuki-infrastruktuurin mitoitukseen.

Datakeskuksen varsinainen tuote on verkon yli tuotettava IT-palvelu. Siksi ympäristövaikutuksia ei kannata arvioida vain rakennuksen koon, laitemäärän tai asennetun tehon perusteella, vaan sen mukaan, kuinka paljon energiaa, vettä ja muuta infrastruktuuria tarvitaan tietyn palvelun tuottamiseen luotettavasti. Olennaista ei siis ole vain datakeskuksen koko, vaan palvelun ja siihen käytettyjen resurssien välinen suhde. Tästä syystä ympäristösuorituskyvyn arvioinnissa on aina tarkasteltava sekä tuotettua palvelua että sen tuottamiseen käytettyjä panoksia.

Datakeskuksen sähkönkulutus koostuu karkeasti IT-laitteiden kulutuksesta sekä niitä tukevan infrastruktuurin energiankulutuksesta. Infrastruktuurin energiankulutus muodostuu erityisesti jäähdytyksestä sekä sähkönsyötön ja sähkönjakelun häviöistä. Lähes kaikki IT-



laitteiden käyttämä sähköenergia muuttuu lopulta lämmöksi. Jäähdytysjärjestelmän tehtävänä on poistaa tämä lämpö IT-laitteilta, ja hukkalämmön hyödyntäminen riippuu siitä, miten jäähdytysjärjestelmästä poistuva lämpö otetaan talteen ja hyödynnetään. Siksi datakeskus on samanaikaisesti sekä merkittävä sähkönkuluttaja että lämmöntuottaja. Ks. luku 3.2 (energiankulutus datakeskuksissa).

Datakeskuksen energiatehokkuuden parantaminen. Vähäpäästöisyys alkaa siitä, että sama palvelu tuotetaan pienemmällä energiamäärällä. Käytännössä tämä tarkoittaa IT-laitteiden tehokkaampaa käyttöä, eli oikeaa mitoitus ja hyvää käyttöastetta, ohjelmistojen resurssitehokkuutta, jäähdytyksen ja ilmavirtojen hallintaa sekä sähkönjakelujärjestelmien häviöiden vähentämistä. Ks. luku 3.3 (energiatehokkuuden parantaminen).

Datakeskuksessa syntyvää lämpöä voidaan ottaa talteen ja hyödyntää esimerkiksi kaukolämmössä tai kiinteistöjen lämmityksessä. Tämä parantaa energian kokonaishyödyntämistä silloin, kun ratkaisu on teknisesti toteuttamiskelpoinen ja paikallisesti tarkoituksenmukainen. Toteutettavuus riippuu muun muassa lämpötilatasoista, jäähdytys- ja lämpötekniikasta sekä siitä, onko lämmölle paikallista kysyntää. Ks. luku 3.4 (energian uudelleenkäyttö).

Uusiutuvat ja vähähiiliset energialähteet. Kun datakeskuksen energiatehokkuus on ensin optimoitu, toinen keskeinen ympäristökestävyyteen vaikuttava tekijä on käytetyn sähkön päästöintensiteetti. "Uusiutuva" ja "vähähiilinen/hiilivapaa" eivät ole sama asia, ja "100 %" -väite on aina sidottava siihen, mihin se perustuu (esim. oma tuotanto, sopimukset ja alkuperätakuut). Ks. luku 3.5 (uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen).

Hiilijalanjäljen seuranta ja hallinta. Datakeskuksen päästöt voidaan jäsentää käytönaikaisiin päästöihin (pääosin sähkönkulutus) ja elinkaaripäästöihin (rakennus ja laitteet). Tärkeää on ymmärtää peruslogiikka: käytönaikaiset päästöt syntyvät kulutuksesta kerrottuna päästökertoimella, ja vertailussa ratkaisevaa on, mitä on laskettu mukaan ja millä oletuksilla. Ks. luku 3.6 (hiilijalanjäljen seuranta ja hallinta).

Tämän itseopiskelumateriaalin tarkoituksena on antaa helposti lähestyttävä yleiskuva datakeskuksista, niiden ilmasto- ja ympäristövaikutuksista sekä vaikutusten systeemisestä luonteesta. Tarkoitus ei ole käsitellä jokaista teemaa teknisesti tyhjentävästi, vaan auttaa hahmottamaan kokonaisuuden täsmällisesti. Oppaan loppuosassa siirrytään peruskäsitteistä ympäristösuorituskyvyn arviointiin ja käytännön toteutukseen: tarkastelussa ovat vihreän



datakeskuksen peruselementit ja periaatteet, parhaat käytännöt, yritysesimerkit sekä alan tulevaisuuden suuntaukset. Teemojen tarkemmat menetelmät ja sovellukset kuvataan myöhemmin tuotettavissa syventävissä oppaissa ja lisämateriaaleissa.

3.2. Energiankulutus datakeskuksissa

Datakeskuksen ympäristövaikutusten ymmärtäminen alkaa tehon ja energian erosta. Teho (kW, MW) kuvaa hetkellistä kuormitusta, energia (kWh, MWh) ajan yli kumuloituvaa kulutusta. Esimerkiksi 10 kW:n jatkuva kuorma 24 tunnin ajan vastaa 240 kWh:n energiankulutusta. Tämä ero on tärkeä, koska mitoitus perustuu tehoon, mutta kustannukset, päästöt ja vuosivaikutukset määräytyvät energian perusteella.

Datakeskuksen sähkönkulutus jakautuu kahteen pääosaan: IT-energiaan ja tukijärjestelmien kulutukseen. IT-energia syntyy palvelimista, tallennuksesta ja verkkolaitteista. Tukijärjestelmien kulutus koostuu erityisesti jäähdytyksestä, ilmanvaihdosta, sähkönsyötöstä ja -jakelusta sekä muista kiinteistöteknisistä järjestelmistä. Jako on tärkeä, koska se tekee näkyväksi, kuinka suuri osa energiasta kuluu itse IT-palveluun ja kuinka suuri osa sen mahdollistamiseen. Mittareihin ja tarkempiin rajauksiin palataan luvussa 3.7.

Keskeinen periaate on, että lähes kaikki datakeskuksen käyttämä sähkö muuttuu lopulta lämmöksi [2][3]. Tämän vuoksi datakeskus on samanaikaisesti sekä merkittävä sähkönkuluttaja että lämmöntuottaja. Jos datakeskus käyttää jatkuvasti 10 MW sähkötehoa, se tuottaa suuruusluokaltaan noin 10 MW lämpötehoa.

Jäähdytys poistaa tämän lämmön IT-laitteilta, ja hukkalämmön hyödyntäminen alkaa siitä, mitä talteen otetulle lämmölle tehdään. Ensinnäkin lämpö on siirrettävä pois palvelimien prosessoreilta itse koneisiin (ilmajäähdytys) tai nesteeseen (nestejäähdytys), ja sieltä edelleen ulos rakennuksesta. Jotta tätä suhteellisen matalalämpöistä hukkaenergiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi kaukolämpöverkossa, sen lämpötilaa on yleensä nostettava lämpöpumpuilla verkkoon sopivalle tasolle.

3.3. Datakeskuksen energiatehokkuuden parantaminen

Energiatehokkuuden parantamisen käytännön kysymys on yksinkertainen: voidaanko sama IT-palvelu tuottaa pienemmällä energiamäärällä? Jos vastaus on kyllä, samalla pienenevät yleensä sekä energiakustannukset että käytönaikaiset päästöt. Siksi energiatehokkuus ei ole vain tekninen optimointikohde, vaan tärkein



käytännön keino pienentää datakeskuksen ympäristövaikutuksia jo ennen sähkön hankintaa koskevia ratkaisuja. Datakeskuksen energiatehokkuutta kuvataan usein tunnusluvulla PUE, joka kertoo datakeskuksen kokonaisenergiankulutuksen suhteen IT-laitteiden energiankulutukseen. Mitä lähempänä PUE on arvoa 1, sitä pienempi osuus energiasta kuluu IT:n ulkopuolisiin tukijärjestelmiin, kuten jäähdytykseen ja sähkönjakeluun. PUE:n mittaus- ja raportointitapa on standardoitu (ISO/IEC 30134-2) [6]. PUE ja sen tulkinta käsitellään tarkemmin luvussa 3.7.

Käytännössä energiatehokkuuden parantaminen alkaa IT-laitteistosta. Tämä tarkoittaa energiatehokkaiden palvelimien, tallennusratkaisujen ja verkkolaitteiden valintaa sekä niiden sisäänrakennettujen virransäästöominaisuuksien tarkoituksenmukaista hyödyntämistä [4][5].

Myös ohjelmistot vaikuttavat energiatehokkuuteen, koska ne määräävät, kuinka paljon laskentaa, muistia, tallennusta ja tiedonsiirtoa saman palvelun tuottaminen vaatii. Mitä resurssitehokkaampi ohjelmisto on, sitä pienempi on palvelun IT-energiankulutus. Ohjelmiston energiatehokkuuteen vaikuttavat esimerkiksi algoritmien tehokkuus, tarpeettoman datansiirron

välttäminen, kuorman hallinta sekä se, ettei palveluja pidetä turhaan käynnissä ilman todellista tarvetta.

Palvelimien käyttöasteen nostaminen on keskeistä energiansäästöissä. Modernien ohjelmistoratkaisujen, kuten virtualisoinnin ja konttitekologioiden, avulla yhdestä fyysisestä palvelimesta saadaan enemmän hyötyä ajamalla siinä useita palveluja samanaikaisesti. Tämä vähentää turhaa laitekapasiteettia ja pienentää aina päällä olevien, mutta vajaakäytöllä toimivien koneiden määrää [4][5]. Myös ohjelmistoarkkitehtuurilla on merkitystä: huonosti optimoitu sovellus voi lisätä palvelimien kuormitusta ja kasvattaa energiankulutusta, vaikka laitteisto olisi sinänsä energiatehokas.

Jäähdytyksessä keskeistä on vähentää turhaa jäähdytystyötä ja hallita ilmavirtoja. Palvelinsalissa IT-laitteet on asennettu räkkikaappeihin, jotka muodostavat rivejä. Energiatehokas ilmavirtojen hallinta perustuu siihen, että kaappirivien väliset käytävät eristetään muusta tilasta ovilla ja kattorakenteilla. Tällainen kuuma- tai kylmäkäytäväeristys (hot aisle / cold aisle containment) pakottaa ilman kulkemaan laitteiden läpi ja estää tulo- ja poistoilman sekoittumisen [4][5].



Ilma on kuitenkin lämmönsiirtimenä rajallinen, joten energiatehokkuuden parantamisessa ja tehosiheyden kasvaessa siirrytään yhä enemmän nestejäähdytykseen. Neste siirtää lämpöä ilmaa tehokkaammin joko suoraan prosessoreilta (suorajäähdytys) tai upottamalla laitteet nesteeseen (uppojäähdytys), mikä pienentää jäähdytykseen kuluva energiaa merkittävästi. Energiatehokkuutta voidaan parantaa myös hallitsemalla laitteiden lämpötilatasoja. Kun IT-laitteille syötettävän jäähdytysilman tai -nesteiden lämpötilaa nostetaan ja samalla sallitaan poistolämmön lämpötilan nousu, koneellisen jäähdytyksen tarve vähenee, vapaajäähdytyksen käyttö lisääntyy ja hukkalämmön hyödyntäminen tehostuu.

Datakeskuksen sähkönsyöttö- ja varavoimajärjestelmissä keskeisiä tavoitteita ovat energiahäviöiden minimointi ja korkean toimintavarmuuden varmistaminen. UPS-laitteiden, muuntajien ja sähkönjakelun häviöitä voidaan pienentää valitsemalla laitteet tarkoituksenmukaisesti ja mitoittamalla ne siten, että niiden hyötysuhde säilyy hyvänä normaalilla kuormitusalueella. Varavoimakoneiden osalta toimintavarmuus perustuu oikeaan mitoittamiseen sekä säännölliseen huoltoon ja testaukseen, jotta ne toimivat luotettavasti sähkökatkosten aikana.

Jatkuva energiankulutuksen seuranta ja poikkeamien havaitseminen auttavat tunnistamaan tehottomuuksia. Käytännössä tätä työtä ohjataan DCIM-ohjelmistoilla (Data Center Infrastructure Management) sekä kiinteistöautomaatiolla. Nämä hallintajärjestelmät yhdistävät tiedot IT-laitteista ja niiden kuormituksesta, jäähdytyksestä ja sähkönsyötöstä, jotta koko datakeskuksen toimintaa voidaan seurata ja optimoida reaaliajassa [4][5]. Energiatehokkuuden parantaminen pienentää tyypillisesti sekä energiakustannuksia että käytönaikaisia päästöjä, koska sama palvelu tuotetaan pienemmällä energiamäärällä.

3.4. Energian uudelleenkäyttö

Hukkalämmön hyötykäyttö on Suomessa usein käytännöllinen tapa parantaa datakeskuksen ympäristösuorituskykyä, koska viileä ilmasto, laajat kaukolämpöverkot ja teolliset käyttökohteet luovat sille hyvät edellytykset. Vaikutus ei kuitenkaan synny pelkästä lämmön talteenotosta, vaan siitä, kuinka paljon energiaa voidaan toimittaa hyötykäyttöön teknisesti ja taloudellisesti järkevällä tavalla. Siksi arvioinnissa on tarkasteltava yhtä aikaa paikallista kysyntää, liityntämahdollisuuksia, lämpötilatasoa ja sitä lisäenergiaa, jota lämmön hyödyntäminen vaatii [3][7].



Hukkalämmön hyödyntäminen ei kuitenkaan ole automaattisesti järkevää tai mahdollista kaikissa kohteissa. Toteutettavuus riippuu ennen kaikkea kolmesta asiasta: onko lämmölle paikallista kysyntää tai ostaja, onko liittynyt esimerkiksi kaukolämpöverkkoon tai muuhun lämmitysjärjestelmään teknisesti ja taloudellisesti järkevä, ja saadaanko lämpötilataso hyödynnettäväksi ilman kohtuuttoman suurta lisäenergiankulutusta. Käytännössä lämpöä voidaan joutua nostamaan lämpöpumpuilla sopivalle tasolle ennen kuin se voidaan syöttää hyötykäyttöön.

Tavoitteena ei siis ole vain ottaa lämpöä talteen, vaan parantaa energian kokonaisyödyntämistä tavalla, joka on teknisesti toteuttamiskelpoinen ja paikallisesti tarkoituksenmukainen. Tästä syystä hukkalämmön hyödyntämisestä kannattaa esittää ensisijaisesti mitattuja tuloksia ja selkeästi rajattuja lukuja, ei pelkkiä yleisiä väitteitä.

Lisätieto: energian uudelleenkäytön osuutta voidaan kuvata tunnusluvulla ERF (Energy Reuse Factor), joka on määritelty EN 50600-4-6-standardissa. ERF kertoo, kuinka suuri osa datakeskuksen kokonaisenergiasta toimitetaan hyötykäyttöön datakeskuksen rajojen ulkopuolelle. ERF:n esittely ja käyttö KPI-kehityksessä käsitellään tarkemmin luvussa 7.

3.5. Uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen

Datakeskuksen käytönaikaiset päästöt riippuvat ennen kaikkea siitä, kuinka paljon se kuluttaa sähköenergiaa ja millä tavalla sähkö on tuotettu (sähkön päästökerroin). Ympäristösuorituskyky paranee, kun käytetty sähkö on uusiutuvaa tai muutoin vähähiilistä/hiilivapaata. Uusiutuvaa tai vähähiilistä sähköä voidaan hankkia käytännössä kolmella tavalla. Näiden valinta määrittää, kuinka suuri osa datakeskuksen kulutuksesta voidaan perustellusti laskea uusiutuvaksi tai vähähiiliseksi:

- Oma tuotanto: esimerkiksi aurinkopaneelit tai tuulivoima (yleensä vain osa kulutuksesta).
- Pitkäaikaiset sähkösopimukset (PPA): datakeskus sopii suoraan voimalan tai tuottajan kanssa, että ostaa tältä tietyn määrän sähköä useiden vuosien ajaksi.
- Alkuperätakuut ja muut todennukset: osoitetaan, että ostettu sähkö on uusiutuvaa sovitun järjestelmän mukaisesti [8].

Uusiutuvan energian osuutta kuvataan tunnusluvulla REF (Renewable Energy Factor). Sen laskentatapa on määritelty EU:n

datakeskusraportoinnissa (komission delegoitu asetus (EU) 2024/1364, liite III) sekä standardissa ISO/IEC 30134-3. Ks. luku 7.

Jos näet väitteen "100 % uusiutuvaa", kysy aina mihin se perustuu (oma tuotanto, PPA vai alkuperätakuut) ja koskeeko se koko kulutusta vai vain osaa. Tämä tekee väitteestä vertailukelpoisen ja vähentää väärinymmärryksiä.

Tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan tai muutoin vähähiilisen/hiilivapaan sähkön osuutta datakeskuksen kulutuksessa. Monet suuret datakeskusoperaattorit ovat sitoutuneet 100 % uusiutuvan sähkön käyttöön osana hiilineutraaliustavoitteitaan, mutta väitteen sisältö riippuu aina siitä, miten sähkö on hankittu ja todennettu.

3.6. Hiilijalanjäljen seuranta ja hallinta

Mitattavasti vähäpäästöisen datakeskuksen ydinkysymys on, kuinka paljon kasvihuonekaasupäästöjä syntyy tuotettua IT-palvelua kohti. Käytönaikainen hiilijalanjälki määräytyy pitkälti sen mukaan, millä tavalla käytetty sähkö on tuotettu (eli mikä on sähkön päästökerroin).

Käytönaikaisia päästöjä arvioidaan yhdistämällä datakeskuksen sähkönkulutustiedot ja käytetyn sähkön päästökerroin (CO₂e/kWh,

"hiilidioksidiekvivalentti per kilowattitunti"). Muita päästöjä syntyy datakeskuksen elinkaaren aikana esimerkiksi rakennus- ja laitemateriaalien valmistuksesta sekä elinkaaren lopun käsittelystä (purku, kierrätys ja jätehuolto). Käytönaikaiseen päästöjen hallintaan kuuluu energiatehokkuuden parantaminen sekä käytetyn sähkön päästöintensiteetin pienentäminen. Päästöintensiteetti tarkoittaa, kuinka paljon päästöjä syntyy tuotettua IT-energiaa kohti (esim. gCO₂e/kWh IT-energiaa), missä IT-energia tarkoittaa palvelimien ja muiden IT-laitteiden käyttämää energiaa (ei koko rakennuksen energiaa). Mitä pienempi luku, sitä vähäpäästöisempi toiminta. Tämä on hyödyllinen tapa vertailla ratkaisuja ja palveluntarjoajia samalla "mittatikulla". Kun kohtaat tällaisen luvun, tarkista aina:

- Millä päästökertoimella luku on laskettu (ja mistä kerroin on otettu).
- Mitä laskenta sisältää (mitä on mukana ja mitä ei; esim. vain sähkön käyttö vai myös jäähdytys ja varavoima).

Päästöjen pienentämisessä on kaksi pääkeinoa:

- Energiatehokkuus: pienennetään käytettyjen kilowattituntien määrää optimoimalla teknologiaa ja prosesseja.
- Sähkön päästöintensiteetti: hankitaan uusiutuvaa tai muutoin vähähiilistä/hiilivapaata sähköä. Uusiutuvan osuuden kasvua voidaan kuvata REF-mittarilla, mutta hiilijalanjälki määräytyy



aina käytetyn päästökertoimen ja laskennan rajauksen mukaan (ks. luvut 5 ja 7).

•
Monet suuret toimijat hankkivat datakeskuksilleen 100 % uusiutuvaa tai hiilivapaata sähköä ja tavoittelevat toiminnassaan hiilineutraaliutta [8]. Jos viestinnässä käytetään "100 %", täsmennä lyhyesti, mihin se perustuu (esim. sopimukseen ja alkuperätakuisiin). Jos kompensatioita käytetään, ne kerrotaan erikseen: kompensointi ei ole sama asia kuin päästöjen vähentäminen.

3.7. Vihreän datakeskuksen peruselementit ja periaatteet

Tässä oppaassa termiä vihreä datakeskus käytetään työväliseenä, jonka avulla ympäristövaikutukset tehdään ymmärrettäviksi, mitattaviksi ja vertailukelpoisiksi. Sillä ei tarkoiteta markkinointikieltä eikä virallista EU:n myöntämää luokkaa, vaan datakeskusta, jonka ympäristösuorituskykyä arvioidaan dokumentoitujen, todennettavien ja yhteismittallisten indikaattorien perusteella. Tässä merkityksessä vihreys ei ole mielikuva vaan osoitettavissa oleva ominaisuus: datakeskus kuuluu ympäristösuorituskyvyltään parhaaseen joukkoon

silloin, kun arviointi tehdään läpinäkyvästi ja samoilla periaatteilla [9][10].

EU:n energiatehokkuusdirektiivi (EU) 2023/1791 edellyttää, että vähintään 500 kW:n asennetun IT-tehon datakeskusten omistajat ja operaattorit asettavat vuosittain tietyt tiedot julkisesti saataville. Komission delegoitu asetus (EU) 2024/1364 täsmentää raportoitavat tiedot sekä yhteisen mittaus- ja laskentamenetelmän. Sääntelyn ensimmäinen vaihe ei siis vielä muodosta yksittäiselle datakeskukselle virallista EU:n myöntämää "Green status" -merkintää, vaan yhteisen perustan datakeskusten ympäristösuorituskyvyn mittaamiseen, laskentaan ja vertailuun [9][10].

Tässä oppaassa vihreän datakeskuksen arviointi ankkuroidaan EU:n ensimmäisen vaiheen avainindikaattoreihin: PUE:hen, WUE:hen, ERF:ään ja REF:ään. Ne eivät ole suoria raakamittauksia, vaan datakeskuksen määritellyistä mittauspisteistä kerätyistä ja raportoiduista lähtötiedoista laskettavia indikaattoreita, joiden tulkinta ja vertailtavuus edellyttävät ilmoitettua mittausjaksoa, rajauksia ja laskentatapaa. Ilman näitä tietoja vihreyttä koskevat väitteet jäävät helposti epätarkoiksi tai harhaanjohtaviksi [10].



Vihreän datakeskuksen keskeiset periaatteet

- **Energiatehokkuus (PUE).** Tavoitteena on tuottaa sama IT-palvelu pienemmällä kokonaisenergiankulutuksella. PUE kuvaa datakeskuksen kokonaisenergiankulutuksen suhdetta IT-laitteiden energiankulutukseen. Mitä lähempänä arvo on yhtä, sitä pienempi osuus energiasta kuluu tukijärjestelmiin ja häviöihin [10].
- **Vedenkäytön hallinta (WUE).** Tavoitteena on seurata ja vähentää veden käyttöä suhteessa tuotettuun IT-energiaan. WUE kuvaa datakeskuksen vedenkulutusta suhteessa IT-energiankulutukseen. Se tekee näkyväksi erityisesti jäähdytysratkaisujen vesivaikutukset [10].
- **Energian uudelleenkäyttö (ERF).** Tavoitteena on ottaa talteen datakeskuksessa syntyvää lämpöenergiaa ja hyödyntää sitä siellä, missä se on teknisesti ja paikallisesti mahdollista. ERF kuvaa hyötykäyttöön toimitetun energian osuutta suhteessa datakeskuksen kokonaisenergiankulutukseen [10].
- **Uusiutuvan energian osuus (REF).** Tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energian osuutta ja dokumentoida selkeästi, mihin väite perustuu, esimerkiksi omaan tuotantoon, PPA-sopimukseen tai alkuperätakuisiin. REF kuvaa uusiutuvan energian kokonaiskulutuksen osuutta suhteessa datakeskuksen kokonaisenergiankulutukseen [10].
- **Läpinäkyvyys ja vertailukelpoisuus.** Indikaattoreilla on merkitystä vain, jos niiden laskenta perustuu samoihin periaatteisiin. Siksi datakeskuksen ympäristösuorituskyvystä raportoitaessa on ilmoitettava indikaattorien lisäksi mittausjakso, järjestelmärajaukset ja käytetty laskentamenetelmä. Ilman näitä tietoja vertailu ei ole luotettavaa [9][10].
- **Päästöjen arviointi täydentävillä mittareilla.** Jos raportoinnissa käytetään lisäksi päästöintensiiteettiä kuvaavia mittareita, kuten CUE, niiden yhteydessä on ilmoitettava käytetyt päästökertoimet, niiden lähde sekä laskennan rajaukset. Muutoin luvut eivät ole aidosti vertailukelpoisia.
- **Resurssitehokkuus ja kiertotalous.** Vihreän datakeskuksen periaatteisiin kuuluu myös laitteiden elinkaaren pidentäminen, ylirajoituksen välttäminen sekä uudelleenkäytön ja kierrätyksen suosiminen. Näin ympäristövaikutuksia tarkastellaan kokonaisuutena, ei vain käytönaikaisen sähkönkulutuksen näkökulmasta.



Peruselementit käytännössä

Ympäristösuorituskyky syntyy käytännössä vasta silloin, kun jokaiselle merkittävälle vaikutukselle löytyy sekä tekninen parannuskeino että tapa osoittaa muutos mittaamalla. Siksi vihreän datakeskuksen peruselementeissä yhdistyvät aina kolme kysymystä: mistä vaikutus syntyy, miten sitä seurataan ja millä toimenpiteellä sitä voidaan pienentää. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että energiaa, vettä ja muita resursseja kuluu mahdollisimman vähän IT-palvelun tuottamisen kannalta ei-välttämättömiin toimintoihin ja että kulutuksen muutokset voidaan osoittaa luotettavasti.

IT-laitteissa keskeistä on välttää vajaakäyntiä ja ylimitoitusta. Energiatehokas laitteisto, tarkoituksenmukainen kapasiteetin mitoitus ja riittävä käyttöaste vähentävät turhaa kulutusta. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi tarpeettomien aina päällä olevien palvelimien sammuttamista, kuorman tiivistämistä pienemmälle laitemäärälle silloin, kun se on turvallista, sekä virransäästötoimien hyödyntämistä niin, etteivät palvelutaso ja käytettävyys heikkene.

Tallennuksessa ja datanhallinnassa ympäristösuorituskyky paranee, kun turhaa kapasiteettia, tarpeettomia kopioita ja ylimääräistä datansiirtoa vähennetään. Kun data sijoitetaan käyttötarpeen mukaan

tarkoituksenmukaiseen tallennusratkaisuun, vältetään tarpeetonta levy-, verkko- ja jäähdytyskuormaa.

Tilasuunnittelussa tavoitteena on minimoida turha tilavuus ja pitää ilmankierto hallittuna. Kuuma- ja kylmäkäytävien erottelu, vaihteittain laajennettava kapasiteetti sekä ylimitoituksen välttäminen parantavat jäähdytyksen tehokkuutta ja pienentävät hukkaenergiaa.

Sähkönsyötössä ja jakelussa olennaista on pienentää häviöitä ja säilyttää toimintavarmuus. Oikein mitoitettu UPS, tarkoituksenmukainen sähkönjakelu ja mittaaminen mahdollisimman lähellä kulutuskohteita helpottavat häviöiden ja poikkeamien tunnistamista.

Jäähdytyksessä tavoitteena on poistaa lämpö mahdollisimman vähällä lisäenergialla. Ulko-olosuhteiden hyödyntäminen, hallitut ilmavirrat ja tarkoituksenmukainen jäähdytysratkaisu vähentävät tarpeetonta energiankulutusta ja parantavat koko datakeskuksen energiatehokkuutta.

Hukkalämmön hyödyntämisessä tavoitteena on ottaa syntyvä lämpö talteen ja ohjata se hyötykäyttöön siellä, missä paikalliset olosuhteet sen mahdollistavat. Mitä suurempi osa datakeskuksen tuottamasta

lämmöstä voidaan käyttää hyödyksi, sitä parempi on energian kokonaishyödyntäminen.

Sähkön hankinnassa ympäristösuorituskyky paranee, kun uusiutuvan energian osuutta kasvatetaan ja sen alkuperä dokumentoidaan läpinäkyvästi. Olennaista ei ole vain väite uusiutuvasta sähköstä, vaan myös sen todennettava perusta ja selkeä rajaus.

Seuranta ja automaatio sitovat kokonaisuuden yhteen. Reaaliaikainen mittaus, johdonmukainen raportointi ja poikkeamien havaitseminen mahdollistavat jatkuvan parantamisen. Vasta tällöin voidaan osoittaa, mitkä toimenpiteet todella parantavat datakeskuksen ympäristösuorituskykyä ja mitkä jäävät pelkiksi oletuksiksi.

3.8. Parhaat käytännöt ympäristösuorituskykyisen datakeskuksen toteuttamisessa

Edellisessä luvussa kuvatut periaatteet muuttuvat käytännön hyödyiksi vasta silloin, kun ne huomioidaan johdonmukaisesti sijaintivalinnoissa, suunnittelussa, operoinnissa ja seurannassa. Tässä luvussa

tarkastellaan, miten ympäristösuorituskykyä parantavat ratkaisut toteutetaan käytännössä.

Suurimmat vaikutukset syntyvät jo ennen ensimmäistäkään laitetta: sijainnista ja liitynnöistä. Jos alueella on saatavilla uusiutuvaa tai muuten vähähiilistä/hiilivapaata sähköä, se voi pienentää käytönaikaisia päästöjä sen mukaan, miten hankinta ja todentaminen on järjestetty. Samalla on varmistettava sähköverkon liittymän riittävyys, kuormitusvara ja laajennettavuus, jotta sähköinfrastruktuuria ei tarvitse mitoittaa tarpeettoman suureksi epävarmuuden vuoksi. Jo alkuvaiheessa kannattaa myös selvittää, onko hukkalämmölle realistinen hyödyntämiskohde, esimerkiksi kaukolämpöverkko tai lähellä olevat rakennukset.

Suunnittelussa datakeskusta kannattaa tarkastella modulaarisena kokonaisuutena. Kun kapasiteettia voidaan kasvattaa vaiheittain, vältetään tilanne, jossa suuri määrä laitteita ja infrastruktuuria on pitkään vajaakäytöllä. Rakennus- ja tilasuunnittelussa ilmankierto pidetään lyhyenä ja hallittuna, ja kuumen ja kylmän ilman sekoittumista vältetään. Nämä ratkaisut vaikuttavat suoraan siihen, kuinka paljon jäähdytys-, puhallus- ja pumppausenergiaa tarvitaan.



Käytännön energiatehokkuus syntyy siitä, että IT-laitteet, jäähdytys ja sähköjärjestelmät toimivat yhtenä kokonaisuutena. Jäähdytyksessä tämä tarkoittaa esimerkiksi vapaajäähdytyksen hyödyntämistä olosuhteiden salliessa, lämpötila- ja ilmavirta-asetusten pitämistä laitevalmistajien suositusalueilla sekä ohjausta lämpötila- ja virtausmittausten perusteella. Pumppujen ja puhaltimien taajuusmuuttajaohjaus mahdollistaa portaattoman säädön, joka on yleensä energiatehokkaampaa kuin pelkkä päälle/pois-ohjaus. Jos palvelimissa on paljon lämpöä tuottavia prosessoreita tai kiihdyttimiä, kuten AI/HPC- tai GPU-kuormia, nestejäähdytys tai uppojäähdytys voi olla tarkoituksenmukainen ratkaisu.

Sähkönsyötössä ja jakelussa häviöitä pienennetään oikealla mitoituksella ja tarkoituksenmukaisilla UPS- ja jakeluratkaisuilla. Varavoimassa keskeistä on toimintavarmuus, joten huolto ja testaus ovat olennaisia. Mittaus kannattaa viedä riittävän tarkalle tasolle, jotta kulutus näkyy vähintään alue- tai kaappitasolla ja poikkeamat voidaan havaita nopeasti.

Sähkön hankinnassa parhaat käytännöt liittyvät ennen kaikkea selkeään dokumentointiin. Jos käytetään omaa tuotantoa, PPA-sopimuksia tai alkuperätakuuta, niiden rooli on kirjoitettava auki ymmärrettävästi. Jos viestinnässä käytetään ilmaisua "100 %", siihen on

liitettävä tarkenne siitä, mihin väite perustuu ja kattaako se koko kulutuksen vai vain osan. Mahdolliset kompensatiot esitetään erikseen.

Hukkalämmön hyödyntämisessä parhaat käytännöt riippuvat paikallisista reunaehdoista. Olennaista on, onko lämmölle vastaanottaja, onko liityntä teknisesti ja taloudellisesti järkevä ja saadaanko lämpötilataso käyttökelpoiseksi kohtuullisella lisäenergialla. Kun nämä ehdot täyttyvät, lämpö voidaan ohjata kaukolämpöverkkoon tai muihin kohteisiin. Tulokset on osoitettava mittaamalla, ei vain tavoiteluvuilla.

Vedenkäytössä käytännön toteutus tarkoittaa sitä, että jäähdytysratkaisun vaikutus makean veden kulutukseen tehdään näkyväksi. Vettä seurataan järjestelmällisesti, ja ratkaisuissa suositaan vaihtoehtoja, jotka vähentävät veden käyttöä tai tekevät siitä ennustettavaa, esimerkiksi suljettuja kiertoja. Tämä korostuu erityisesti vesistressialueilla, mutta periaate on sama kaikkialla.

IT-puolella ympäristösuorituskyky paranee yleensä silloin, kun turha aina päällä oleva kapasiteetti poistuu ja kuormaa ajetaan tehokkaammin pienemmällä palvelinmäärällä. Tähän voidaan käyttää esimerkiksi virtualisointia, ohjelmistokontteja, kapasiteetin hallintaa ja

automaattista skaalautumista. Samalla laitteiden elinkaaren hallinta, kuten uudelleenkäyttö, kunnostus, kierrätys ja vastuulliset hankintakriteerit, varmistaa, että kokonaisvaikutus paranee laajemmin eikä vain yksittäisessä kohdassa.

Parhaat käytännöt eivät kuitenkaan toteudu ilman selkeitä vastuita, jatkuvaa mittausta ja järjestelmällistä parantamista. Kun tavoitteet on asetettu, niitä seurataan säännöllisesti ja muutokset dokumentoidaan niin, että todellinen parannus voidaan erottaa laskentatavan muutoksesta. EU:n perusmittarit (PUE, WUE, ERF, REF) ja niiden mittausjakso, rajaukset ja laskentasäännöt muodostavat rungon, jonka päälle lisämittarit, kuten päästöintensiteetti, voidaan rakentaa läpinäkyvästi; samat tunnusluvut ovat myös linjassa yleisesti käytettyjen standardisarjojen EN 50600-4 ja ISO/IEC 30134 kanssa [6][10][11].

3.9. Yritysten esimerkkejä, saavutetut hyödyt ja opit

Suomalaisessa mittakaavassa ympäristösuorituskykyä parantavia datakeskusratkaisuja ovat vieneet käytäntöön etenkin suuret teknologiayhtiöt sekä energia- ja teleoperaattorit. Esimerkeissä korostuu sama perusasia kuin tässä oppaassa: tulokset syntyvät

paikallisista reunaehdoista (sähkö, lämpöverkko, kumppanit) ja ne kannattaa esittää mitattuna ja selkeästi rajattuna, jotta ne ovat vertailukelpoisia.

Googlen Haminan datakeskus toimii entisessä paperitehtaassa ja hyödyntää merivettä jäähdytyksessä. Google ja Haminan Energia ovat käynnistäneet ulkoisen hukkalämmön talteenoton, jonka arvioidaan kattavan noin 80 % paikallisen kaukolämpöverkon vuotuisesta lämmöntarpeesta. Googlen mukaan Suomen toiminnoissa saavutettiin 98 % Carbon-free energy -taso vuonna 2023 [12].

Kajaanissa CSC:n LUMI-supertietokone on esimerkki siitä, miten suuri laskentateho voidaan yhdistää paikallisiin energiaetuihin: järjestelmä käyttää 100 % vesivoimaa ja sen hukkalämpö kattaa noin 20 % Kajaanin kaukolämmöstä [13]. Tämä havainnollistaa, miksi hukkalämmön hyödyntäminen kannattaa selvittää jo suunnittelussa: ilman lämpömarkkinaa ja toimivaa liityntää potentiaali jää teoriaksi.

Helsingin seudulla hukkalämpöä hyödynnetään myös operoinnin ja energiayhtiöiden yhteistyönä. Helen ja Telia ovat kanavoineet Pitäjänmäen datakeskuksen hukkalämpöä kaukolämpöverkkoon, ja lämpömäärä kasvaa datakeskuksen laajentuessa [14]. Elisa puolestaan kertoo käyttävänsä 100 % hiilivapaata sähköä Suomessa ja Virossa

sekä hyödyntävänsä datakeskustensa hukkalämpöä Espoon ja Helsingin kaukolämmityksessä [15].

Näistä esimerkeistä nousee kolme käytännön oppia. Ensinnäkin suurimmat hyödyt syntyvät, kun hukkalämmölle on ostaja ja liityntä sekä lämpötilatasot ovat realistisia jo suunnitteluvaiheessa. Toiseksi "100 %" ja muut suuret väitteet ovat hyödyllisiä vasta, kun niiden perusta (hankintasopimukset/alkuperätakuut ja rajaukset) kerrotaan läpinäkyvästi. Kolmanneksi mittaaminen ja vertailukelpoiset rajaukset ratkaisevat: muuten on vaikea erottaa todellinen parannus laskentatavan tai raportointitavan muutoksesta.

3.10. Tulevaisuuden suuntaukset vihreissä datakeskuksissa

Vihreiden datakeskusten tulevaisuus ei perustu yhteen teknologiaan, vaan siihen, miten energiatehokkuutta, vedenkäyttöä, energian uudelleenkäyttöä, uusiutuvan energian hyödyntämistä sekä materiaalien resurssitehokkuutta ja kiertotaloutta voidaan parantaa samanaikaisesti. Kehitystä ohjaavat erityisesti laskennan tehotiheyden kasvu, ympäristösuorituskyvyn mittaamisen tarkentuminen sekä

datakeskusten kytkeytyminen aiempaa tiiviimmin ympäröivään energia- ja infrastruktuurijärjestelmään.

Keskeinen tekninen muutos liittyy laskennan tehotiheyden kasvuun. Perinteisten prosessorien rinnalle tulee yhä enemmän tekoälyn, koneoppimisen ja suurteholaskennan vaatimia GPU:ita ja muita kiihdyttämiä, mikä kasvattaa sekä sähkönkulutusta että lämmöntuottoa. Tämän seurauksena jäähdytyksestä ja sähkön saatavuudesta tulee entistä tärkeämpiä datakeskusten suunnittelun reunaehtoja.

Jäähdytysratkaisuissa kehitys suuntautuu kohti nesteeseen perustuvia järjestelmiä. Ilmajäähdytys säilyy edelleen käyttökelpoisena monissa kohteissa, joissa tehotiheys on maltillinen, mutta sen rinnalle yleistyvät suorajäähdytys ja uppojäähdytys. Näiden ratkaisujen etuna on, että lämpöä voidaan poistaa tehokkaammin suuritehoisilta komponenteilta, samalla kun jäähdytyksen energiantarve pienenee ja syntyvän hukkalämmön lämpötilataso nousee. Tämä vahvistaa sekä energiatehokkuutta että energian uudelleenkäytön mahdollisuuksia.

Toinen tärkeä kehityssuunta on hukkalämmön hyödyntämisen vahvistuminen. Datakeskuksia tarkastellaan tulevaisuudessa yhä enemmän osana paikallista energijärjestelmää, ei vain sähkönkuluttajina. Erityisesti Suomessa mahdollisuuksia liittyy siihen,



voidaanko datakeskusten tuottamaa lämpöä hyödyntää kaukolämpöverkossa tai muissa lämmityskohteissa. Tulevaisuudessa kilpailuetua ei synny pelkästään siitä, että lämpöä syntyy, vaan siitä, kuinka suuri osa siitä voidaan toimittaa hyötykäyttöön teknisesti ja paikallisesti järkevällä tavalla.

Sähkön hankinnassa ja käytössä korostuu läpinäkyvyys. Uusiutuvan ja vähähiilisen sähkön osuutta pyritään kasvattamaan oman tuotannon, pitkäaikaisten hankintasopimusten, alkuperätkäuiden ja muiden todennuskeinojen avulla. Samalla datakeskuksilta odotetaan aiempaa selkeämpää tapaa osoittaa, mihin ympäristövaikutukset perustuvat. Myös kysyntäjouston merkitys voi kasvaa, jos datakeskus voi siirtää osan kuormastaan ajankohtiin, jotka tukevat sähköjärjestelmän tasapainoa ilman, että palvelutaso heikkenee.

Vedenkäytön merkitys kasvaa tulevaisuudessa erityisesti alueilla, joilla makean veden saatavuus on rajallinen tai veden käyttöön kohdistuu tiukentuvia vaatimuksia. Tämän vuoksi jäähdytysratkaisujen arvioinnissa tarkastellaan yhä useammin sähkönkulutuksen lisäksi myös niiden vaikutusta vedenkulutukseen. Näin datakeskusten ympäristösuorituskykyä arvioidaan entistä kokonaisvaltaisemmin.

Myös resurssitehokkuus ja kiertotalous vahvistuvat tulevaisuuden suuntauksina. Huomio kohdistuu yhä enemmän laitteiden koko elinkaareen, ei ainoastaan niiden käytönaikaiseen energiankulutukseen. Laitteiden käyttöiän pidentäminen, uudelleenkäyttö, kunnostus, kierrätys ja vastuullinen käytöstä poisto muodostuvat aiempaa tärkeämmiksi osiksi vihreän datakeskuksen kokonaisuutta.

Yhteistä näille kehityssuunnille on, että vihreä datakeskus ei tulevaisuudessa tarkoita vain energiatehokasta tilaa tai uusiutuvaa sähköä käyttävää toimintaa. Se tarkoittaa kokonaisuutta, jossa energiatehokkuus, vedenkäyttö, energian uudelleenkäyttö, sähkön alkuperä, resurssitehokkuus ja mitattava ympäristösuorituskyky kytkeytyvät toisiinsa. Tulevaisuuden vihreä datakeskus on ennen kaikkea datakeskus, jonka ympäristövaikutuksia voidaan hallita, osoittaa ja parantaa systemaattisesti. Siksi vihreiden datakeskusten kehittämisessä ratkaisevaa on, että tulevaisuuden ratkaisut suunnitellaan mitattaviksi, vertailukelpoisiksi ja paikallisiin reunaehtoihin sopiviksi jo alusta lähtien.

Resurssit ja lisämateriaali

Kirjat ja raportit: IEA: Data Centres and Data Transmission Networks; Uptime Institute: Global Data Center Survey Results 2025; Data Center Handbook (2nd ed., 2021).

EU-sääntely ja ohjeistus: energiatehokkuusdirektiivi (EU) 2023/1791, komission delegoitu asetus (EU) 2024/1364 sekä European Code of Conduct for Energy Efficiency in Data Centres.

KPI-mittarit ja standardit: ISO/IEC 30134 -sarja, EN 50600-4 -sarja ja ASHRAE TC 9.9 -ohjeistus.

Kurssit, webinaarit ja verkostot: The Green Grid, Finnish Data Center Association (FDCA), Renewables Finland: Renewable Energy for Datacenters & Major Industries sekä Climate Neutral Data Centre Pact.

Tenttikysymyksiä ja harjoitustehtävät

Tenttikysymyksiä: perusteet

1. Mitä datakeskus tekee, ja miksi sen "tuote" on palvelu? (Vihje: luku 1)
2. Mihin kahteen pääosaan datakeskuksen energiankulutus jakautuu, ja miksi tämä jako on tärkeä? (Vihje: luvut 1–2)
3. Selitä teho (kW) ja energia (kWh) ja laske: 10 kW kuorma 24 h = ? kWh. (Vihje: luku 2)
4. Mikä tekee hukkalämmön hyödyntämisestä Suomessa usein realistista, ja mitkä reunaehdot ratkaisevat toteutettavuuden? (Vihje: luku 4)
5. Nimeä kolme käytännön keinoa, joilla datakeskuksen energiatehokkuutta parannetaan. (Vihje: luku 3)
6. Mitä "100 % uusiutuvaa" -väite voi käytännössä tarkoittaa, ja mitä tarkistat aina ennen kuin pidät väitettä vertailukelpoisena? (Vihje: luku 5)
7. Mitä eroa on käytönaikaisilla päästöillä ja elinkaaripäästöillä, ja miten käytönaikaiset päästöt arvioidaan perusperiaatteella? (Vihje: luku 6)



8. Miksi rajaukset ja mittausjakso ovat välttämättömiä, jotta "vähäpäästöisyys" on vertailukelpoinen väite? (Vihje: luku 7)
9. Selitä yhdellä lauseella, mitä kukin EU:n perusmittareista kuvaa (PUE, WUE, ERF, REF). (Vihje: luku 7)
10. Mitä EU:n 500 kW:n kynnyisarvo tarkoittaa oppaan mukaan, ja mihin se liittyy? (Vihje: luvut 7 ja 10)

Soveltavat Green ICT -kysymykset.

1. Miksi "vihreä datakeskus" on epäselvä ilmaus ilman määritelmää, ja miten määrittelisit "vihreyden" mitattavasti? (Vihje: luvut 1 ja 7)
2. Mitkä ovat neljä perusmittaria, joihin datakeskuksen ympäristösuorituskyky kannattaa ankkuroida, jotta väitteet ovat vertailukelpoisia? (Vihje: luku 7)
3. Mitä tarkoitetaan mittausjaksolla ja rajauksilla, ja miksi ne ovat yhtä tärkeitä kuin itse mittariarvo? (Vihje: luku 7)
4. Saat toimittajalta PUE-arvon. Mitkä kolme tarkennusta pyydät ennen kuin vertaat sitä toiseen toimittajaan? (Vihje: luvut 2 ja 7)

5. Saat väitteen "100 % uusiutuvaa sähköä". Mitkä kaksi kysymystä kysyt aina, jotta ymmärrät mitä väite tarkoittaa käytännössä? (Vihje: luku 5)
6. Mikä ero on "uusiutuvalla", "vähähiilisellä/hiilivapaalla" ja "hiilineutraalilla", ja miksi kompensatio pitää käsitellä erikseen? (Vihje: luvut 5–6)
7. Toimittaja kertoo hyödyntävänsä hukkalämpöä. Mitkä kolme reunaehto ratkaisevat, onko väite teknisesti ja paikallisesti toteutettavissa ja vaikutuksiltaan merkittävä? (Vihje: luku 4)
8. Toimittaja antaa päästöintensiteetin (esim. gCO₂e/kWh IT-energiaa). Mitkä kaksi tietoa sinun pitää nähdä, jotta luku on tulkittavissa ja vertailukelpoinen? (Vihje: luku 6)
9. Miksi pelkkä sertifikaatti tai yleinen vastuullisuuslupaus ei riitä vertailuun, ja mitä tietoja pyydät sen lisäksi? (Vihje: luku 7)
10. Tee "uskottavuustarkistus" yhdellä lauseella: mitkä kolme tietoa pitää löytyä, jotta ympäristöväite on vertailukelpoinen? (Vihje: luku 7)



Lähteet

[1] IEA. Data Centres and Data Transmission Networks. International Energy Agency.

[2] Barroso, L. A., Clidas, J., & Hölzle, U. (2013). The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines (2nd ed.). Morgan & Claypool.

[3] Oró, E., Depoorter, V., Garcia, A., & Salom, J. (2015). Energy efficiency and renewable energy integration in data centres: Strategies and modelling review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 429–445.

[4] Lawrence Berkeley National Laboratory. (2024). Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design.

[5] The Green Grid. (2011). Recommendations for Measuring and Reporting Overall Data Center Efficiency Version 2 – Measuring PUE for Data Centers (May 2011).

[6] ISO/IEC 30134-2:2026. Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness

(PUE); ISO/IEC 30134-3:2016/Amd 1:2018. Part 3: Renewable energy factor (REF); ISO/IEC 30134-9:2022. Part 9: Water usage effectiveness (WUE).

[7] Euroheat & Power. (2017). Datacentre supplies local heating in Mäntsälä, Finland.

[8] Cao, Z., Zhou, X., Hu, H., Wang, Z., & Wen, Y. (2021). Towards a Systematic Survey for Carbon Neutral Data Centers. arXiv.

[9] European Parliament and Council of the European Union. (2023). Directive (EU) 2023/1791 of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 (recast).

[10] European Commission. (2024). Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1364 of 14 March 2024 on the first phase of the establishment of a common Union rating scheme for data centres.

[11] EN 50600-4-2:2016+A1:2019. Information technology — Data centre facilities and infrastructures — Part 4-2: Power Usage Effectiveness; EN 50600-4-3:2016+A1:2019. Part 4-3: Renewable Energy Factor; EN 50600-4-6:2020. Part 4-6: Energy Reuse Factor; EN 50600-4-9:2022. Part 4-9: Water Usage Effectiveness.



[12] Google. Hamina, Finland – Google Data Center Location.

[13] LUMI. (2022). LUMI one of the greenest supercomputers in the world. See also LUMI. (2020). The waste energy of LUMI supercomputer produces 20 percent of the district heat of the city of Kajaani.

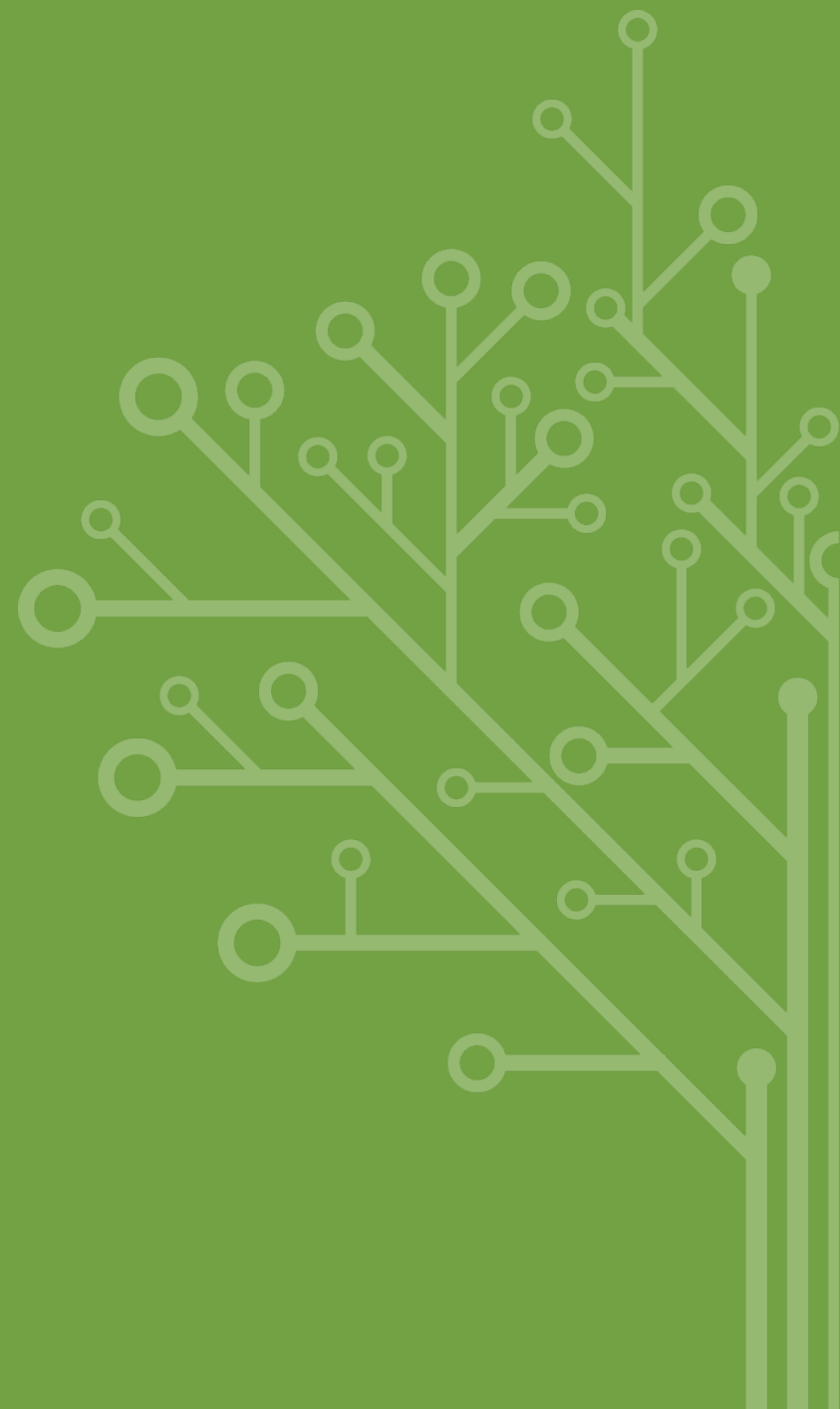
[14] Helen. (2025). Helen and Telia’s Collaboration Brings Even More Data Center Heat to Helsinki Residents.

[15] Elisa. Energy Efficiency. See also Environmental metrics and targets.

[16] Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986.

4

Matkaviestinverkot



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

4. Matkaviestinverkot

Tässä itseopiskelumateriaalin kappaleessa tarkastellaan, miten ympäristökestävyys huomioidaan matkaviestintäällä osana laajempaa ICT-alan vihreää siirtymää. Matkaviestinjärjestelmät ovat langattomia tiedonsiirtojärjestelmiä, jotka mahdollistavat liikkuville käyttäjille puhelut, viestit ja datan siirron sekä pääsyn internettiin ja muihin palveluihin maankattavien matkaviestinverkkojen kautta. Lähtökohtana on, että matkaviestinverkoilla on kaksoisrooli vihreässä siirtymässä. Yhtäältä ne aiheuttavat ympäristövaikutuksia esimerkiksi energiankulutuksen, kasvihuonekaasupäästöjen, materiaalien käytön, laitteiden valmistuksen ja elinkaaren lopun jätteiden kautta. Toisaalta ne mahdollistavat kestävyshyötyjä muilla aloilla mahdollistamalla ja tukemalla erilaisia digitaalisia palveluja, kuten etättyötä, älykästä liikennettä, teollisuuden optimointia ja dataohjattua resurssitehokkuutta. Matkaviestinala voi vähentää ympäristöjalanjälkeään ja samalla vahvistaa positiivista ympäristökädenjälkeään. Matkaviestinverkkojen ympäristökestävyydessä voidaan parantaa erityisesti parantamalla energiatehokkuutta.

Tämä itseopiskelumateriaali tuo yhteen VISIIRI-hankkeen kolmen raportin päähavainnot matkaviestinverkkojen ympäristökestävyydestä ja energiatehokkuudesta. Raportit tunnistavat matkaviestinalan sidosryhmät, sisältäen yritystoimijat sekä regulointi- ja standardointifoorumit, ja esittelevät käynnissä olevia ympäristökestävyyden ja energiatehokkuuden parantamisen toimenpiteitä ja niitä kuvaavia indikaattoreita.

4.1. Energiankulutus matkaviestinverkoissa

Matkaviestinverkkojen ympäristökestävyyttä voidaan parantaa erityisesti parantamalla energiatehokkuutta ja vähentämällä energiankulutusta. Uudemmat 5G-matkaviestinverkkosukupolvet ovat teknisesti energiatehokkaampia kuin aiemmat, mutta verkkojen kokonaisenergiankulutus kasvaa silti, koska entistä kompleksisempien verkkojen on tuettava huomattavasti suurempaa määrää laitteita, dataa ja laskentatehtäviä kuin ennen. Tiedonsiirtomäärien kasvu, verkkojen tihentyminen, virtualisointi, pilvipohjaiset toiminnot ja tekoälyn lisääntyvä käyttö kasvattavat energiantarvetta.

Matkaviestinverkkojen energiankulutusta on tarkasteltava koko päästä päähän ulottuvan matkaviestinverkon tasolla, mukaan lukien



radioverkko, päätelaitteet, core-verkko sekä niihin liittyvä pilvi- ja datakeskusinfrastruktuuri. Matkaviestinverkoissa radioverkko on suurin energiankulutuksen lähde, mikä johtuu pääasiassa tukiasemien langattomaan tiedonsiirtoon tarvittavista komponenteista (erityisesti tehovahvistimista) ja niitä tukevista jäähdytysjärjestelmistä. Energiankulutuksen kasvuun on vaikuttanut myös se, että verkot rakennetaan usein huippukuormitusta varten, vaikka ne toimivat suuren osan ajasta alle täyden käyttöasteen. Lisäksi korkeammat taajuusalueet, verkkojen tihentyminen, ohjelmistopohjainen käsittely ja tekoälyyn perustuva optimointi lisäävät laskennallista ja operatiivista kuormaa, mikä voi heikentää digitaalisen laajenemisen ympäristöhyötyjä, jos niitä ei hallita huolellisesti.

4.2. Matkaviestinverkkojen energiatehokkuuden parantaminen

Matkaviestinverkkojen ympäristökestävyyden ja erityisesti energiatehokkuuden haasteisiin vastaamiseksi on laaja joukko energiatehokkuutta parantavia menetelmiä. Neljä pääasiallista energiansäästön osa-aluetta matkaviestinverkoissa sisältävät aikatasoon liittyvät menetelmät, joissa komponentteja poistetaan väliaikaisesti käytöstä joutojaksojen aikana, taajuustasoon liittyvät

menetelmät, joissa käytössä olevaa kaistanleveyttä pienennetään tai kantoaaltoja kytketään pois vähäisen liikenteen aikana, tilatasoon liittyvät menetelmät, joissa peittoaluetta ja aktiivisia antennielementtejä mukautetaan kysynnän mukaan, sekä tehotasoon liittyvät menetelmät, joissa lähetystehoja vähennetään tarkemman ohjauksen avulla. Yksittäiset menetelmät voivat toteuttaa näitä neljää osa-aluetta yhtäaikaisesti.

Teknisiä lähestymistapoja energiatehokkuuden parantamiseksi verkoissa ovat esimerkiksi tekoälyn ja koneoppimisen käyttö liikenteen ennustamiseen ja automaatioon, vähän käytettyjen verkkokomponenttien poiskytkentämahdollisuudet, lähes nollaenergiainen viestintä ja energian keruu pienitehoisille laitteille, energianhallintajärjestelmät, radioverkon jakaminen, reunalaskenta, virtualisointi, sekä parannetut jäähdytysteknologiat. Mikään yksittäinen menetelmä ei kuitenkaan yleensä riitä yksin, vaan merkittäviä hyötyjä saavutetaan yhdistämällä useita tekniikoita koko verkon alueella.

Energiatehokkuus on nostettu tärkeäksi suunnitteluperiaatteeksi matkaviestinverkoille jo verkkojen kehityksen alusta lähtien eikä vasta käyttöönoton jälkeen lisättävänä ominaisuutena, mikä näkyy esimerkiksi tulevaisuuden 6G-verkkojen kehityksessä. Energiatehokkaiden matkaviestinverkkojen periaatteita ovat



energiatehokkaiden laitteiden ja infrastruktuurin suunnittelu, verkon toiminnan dynaaminen mukauttaminen liikenteen kysyntään, energiansäästötoimien soveltaminen kaikkiin verkon osiin, sellaisten arkkitehtuurien valinta, jotka jakavat käsittelyn ja tiedonsiirron tehokkaasti, uusiutuvan energian integrointi, verkon virtualisoinnin ja ohjelmistopohjaistamisen laajentaminen silloin kun ne parantavat resurssien käyttöä, jäähdytyksen ja lämmönhallinnan kehittäminen sekä elinkaariajattelun omaksuminen, jossa huomioidaan materiaalit, valmistus, käyttö, uudelleenkäyttö ja elinkaaren loppuvaihe. Tämä laajempi näkökulma on tärkeä, koska ympäristövaikutuksia määrittää paitsi verkkojen toiminta myös se, miten laitteet valmistetaan, miten ne saavat energiansa, miten niitä ylläpidetään ja milloin ne korvataan uusilla.

4.3. Säätelyn rooli

Säätely ohjaa ympäristökestävyyttä matkaviestinnässä ja laajemmin ICT-alalla sitovan lainsäädännön sekä ohjeistuksen. Kansainvälisellä tasolla korostuu Yhdistyneiden kansakuntien kestävä kehityksen tavoitteet sekä Kansainvälisen televiestintäliitto ITU:n rooli, miten matkaviestintä kytkeytyy laajempiin kestävyys- ja ilmastotavoitteisiin. Euroopan tasolla ympäristökestävyyttä matkaviestinnässä ohjaa

toisiinsa liittyvä säädösten kokonaisuus, joka kattaa ilmastotoimet, energiatehokkuuden, uusiutuvan energian, kiertotalouden, jätehuollon, kemikaalit, tuotteiden kestävyys ja viestintäinfrastruktuurin.

Keskeisiä säädöksiä ovat muun muassa EU:n ilmastolaki, energiatehokkuusdirektiivi, uusiutuvaa energiaa koskeva lainsäädäntö, ekosuunnittelu- ja energiamerkintäsäännöt, sähkö- ja elektroniikkaromun hallinnan WEEE-direktiivi, akkualan asetus, vaarallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa rajoittava RoHS-direktiivi, kemikaalien käytön hallinnan REACH-asetus, EU-taksonomia sekä Euroopan sähköisen viestinnän säännöstö. Yhdessä nämä toimenpiteet edistävät matkaviestialalla ja laajemmin ICT-alalla päästöjen vähentämistä, energian tehokkaampaa käyttöä, tuotteiden parempaa kestävyttä ja korjattavuutta, turvallisempia materiaalivalintoja, vahvempia kiertotalouskäytäntöjä sekä kestävämpää verkkoinfrastruktuurin rakentamista.

4.4. Kestävyysraportointi

Kestävyysraportointi on kehittynyt Euroopassa vapaaehtoisesta yritys vastuuseen liittyvästä raportoinnista kohti velvoittavaa ja



yhdenmukaisempaa sääntelykehystä. Aiemmin hajanaiset ESG- ja vastuullisuusraportoinnin käytännöt ovat muuttuneet sidosryhmien kasvaneiden vaatimusten, vertailukelpoisuuden tarpeen ja viherpesun torjunnan myötä. Keskeisessä asemassa ovat EU:n yritysten kestävyysraportointidirektiivi CSRD ja eurooppalaiset kestävyysraportointistandardit (ESRS), jotka muodostavat uuden eurooppalaisen raportointikehyksen suurelle joukolle matkaviestinalan yrityksiä. CSRD laajentaa raportointivelvollisuuksien piiriä, vahvistaa tietojen vertailukelpoisuutta, tuo mukaan ulkopuolisen varmennuksen sekä edistää digitaalista raportointia. ESRS puolestaan täsmentää, miten yritysten tulee raportoida kestävyystietonsa käytännössä. Näissä korostuu kaksoisolennaisuus, jonka mukaan yritysten on arvioitava sekä vaikutuksiaan ympäristöön ja ihmisiin että sitä, miten kestävyyskysymykset vaikuttavat yrityksen taloudelliseen asemaan ja kehitykseen.

ESRS:n ympäristöä koskevat aihealueet, erityisesti ilmastonmuutos, saastuminen, vesi- ja merivarat, luonnon monimuotoisuus sekä resurssien käyttö ja kiertotalous. Näiden kautta ympäristöraportointi laajenee pelkistä päästöistä kohti kokonaisvaltaisempaa kuvaa yrityksen ympäristövaikutuksista, riskeistä, tavoitteista ja toimenpiteistä. Matkaviestintäalan näkökulmasta kestävyysraportointi tarkoittaa esimerkiksi verkkojen energiankulutuksen,

kasvihuonekaasupäästöjen, sähkö- ja elektroniikkajätteen, laitteiden kiertotalouden, toimitusketjun päästöjen ja infrastruktuurin rakentamisen tarkastelua silloin, kun nämä aiheet ovat olennaisia. Kestävyysraportoinnista on tullut keskeinen osa yritysten sääntely-ympäristöä, strategista johtamista ja sidosryhmäviestintää, ja että erityisesti ympäristötietojen laadukas, vertailukelpoinen ja läpinäkyvä raportointi on yhä tärkeämpää myös matkaviestintäalan toimijoille.

4.5. Standardointi

Standardoinnilla on keskeinen rooli ympäristökestävyyden edistämässä matkaviestinnässä teknisten standardien, mittareiden, arviointimenetelmien ja parhaiden käytäntöjen avulla. Sääntelyn ja raportointivaatimusten rinnalla tarvitaan standardeja, jotka mahdollistavat ympäristösuorituskyvyn johdonmukaisen mittaamisen, vertailun ja parantamisen eri tasoilla tuotteista ja laitteista aina tukiasemapaikkoihin, verkkoihin, organisaatioihin ja laajempiin järjestelmätasoihin asti.

Keskeisiä standardointitoimijoita ovat ISO, ITU-T, ETSI ja 3GPP, joilla on erilaiset mutta toisiaan täydentävät roolit matkaviestinnän ja ICT-alan kestävyyttä koskevassa työssä. ITU-T:n L-sarja muodostaa laajan



ICT- ja matkaviestintäalan erityispiirteisiin kohdistuvan standardikokonaisuuden, joka käsittelee muun muassa sähkö- ja elektroniikkajätettä, kiertotaloutta, energian syöttöä ja varastointia, energiatehokkuutta, ilmastovaikutusten arviointia sekä ilmastonmuutokseen sopeutumista. ISO tarjoaa yleisempiä ympäristöjohtamisen, energianhallinnan, elinkaariarvioinnin, kasvihuonekaasulaskennan ja kiertotalouden standardeja, joita voidaan soveltaa myös matkaviestintäalan toimijoihin. ETSI:n rooli Euroopan standardointijärjestönä on keskeinen Euroopassa ja ETSI on tehnyt laajan standardikokoelman yhteistyössä ITU-T:n ja ISO:n kanssa Euroopan markkinoille tuleville matkaviestinlaitteille. 3GPP kansainvälisenä matkaviestinjärjestelmien päästandardointijärjestönä on tehnyt standardeja erityisesti radioverkon energiansäästön, 5G-verkon suorituskyvyn mittaamisen, operoinnin ja ylläpidon energiahallinnan sekä teho-, energia- ja ympäristöparametrien seurannan näkökulmasta.

Matkaviestinverkkojen energiatehokkuus standardoinnissa sisältää mittareiden, mittausmenetelmien, tukiasemapaikkojen tehokkuuden, radioverkon energiansäästön, virtualisoinnin, jäähdytysratkaisujen, uusiutuvan energian, energiavarastojen ja älykkäiden energiaratkaisujen kautta. Standardointi ei rajoitu pelkästään energiankulutuksen vähentämiseen, vaan kattaa myös laitteiden

kestävyyden, korjattavuuden, materiaalitehokkuuden, digitaalisen tuotepassin, elinkaariarvioinnin, kiertotalouden, akkujen hallinnan, sähkö- ja elektroniikkajätteen käsittelyn sekä ICT:n positiivisten vaikutusten arvioinnin muilla sektoreilla. Standardointikehitys on olennainen osa matkaviestinnän ympäristökestävyyttä, koska se muuntaa yleiset tavoitteet ja sääntelylinjaukset konkreettisiksi teknisiksi menetelmiksi, joiden avulla yritykset voivat mitata, hallita, vertailla ja kehittää ympäristökestävyyttä käytännössä.

4.6. Johtopäätökset

Matkaviestintään vaikuttava eurooppalainen kehys ympäristökestävyyden parantamiseksi on laaja ja yhä tiiviimmin toisiinsa kytkeytynyt. Ilmastotoimiin, energiatehokkuuteen, uusiutuvaan energiaan, kiertotalouteen, tuotesuunnitteluun, kemikaaleihin, jätehuoltoon ja viestintäinfrastruktuuriin liittyvä sääntely muovaa kaikki sitä, miten matkaviestinala hallitsee ympäristökestävyyttä. Samalla CSRD:n ja ESRS:n mukainen yritysten kestävyysraportointi tekee ympäristöä koskevasta raportoinnista Euroopassa järjestelmällisempää edellyttämällä yrityksiltä olennaisten aiheiden, kuten energiankulutuksen, päästöjen, resurssien käytön, kiertotalouden ja ilmastosiirtymään liittyvien toimien arviointia ja

raportointia. Samanaikaisesti standardointiorganisaatioiden laatimat standardit tarjoavat tekniset menetelmät, mittarit ja parhaat käytännöt, joita tarvitaan kestävyysuorituskyvyn mittaamiseen ja parantamiseen tuotteissa, tukiasemapaikoissa, verkkoinfrastruktuurissa ja organisaatioiden toiminnassa.

Matkaviestinsektorin ympäristökestävyyden vahvistaminen edellyttää samanaikaisesti oman ympäristöjalanjäljen pienentämistä ja positiivisen kädenjäljen kasvattamista. Tämä onnistuu vain, jos operaattorit, teknologiatoimittajat ja toimialan yhteistyöverkostot toimivat koordinoitusti, mittaavat vaikutuksiaan systemaattisesti ja kehittävät ratkaisuja, jotka tukevat myös muiden toimialojen vihreää siirtymää. Energiatohokkuuden parantaminen ja energiankulutuksen vähentäminen ovat edelleen matkaviestinverkkojen näkyvin ja välittömin ympäristökestävyyden parannuskohde. Tehokas ympäristökestävyyden hallinta matkaviestinnässä edellyttää myös huomiota uusiutuvan energian käyttöön, laitteiden ja verkkojen elinkaari-vaikutuksiin, materiaalitehokkuuteen, akkujen ja sähkö- ja elektroniikkajätteen hallintaan, läpinäkyvään raportointiin sekä kestävään infrastruktuuriin.

Matkaviestinverkkojen ympäristökestävyyden parantaminen edellyttää päästä päähän ulottuvaa, elinkaari-perusteista lähestymistapaa, jossa

yhdistyvät teknologinen innovaatio, älykäs ohjaus, arkkitehtuuriset ratkaisut ja kestävät toimintakäytännöt. Radioverkko on edelleen tärkein energiansäästön kohde, mutta edistymisen riippuu koordinoituista parannuksista koko järjestelmässä. Tekoälyllä tulee olemaan yhä tärkeämpi rooli tulevaisuuden matkaviestinverkoissa, mutta samalla sen oma energiankulutus on hallittava huolellisesti. Energiatohokkuus on keskeinen vaatimus tulevien 6G-matkaviestinverkkojen kestäväälle kehitykselle.

Lisätietoja:

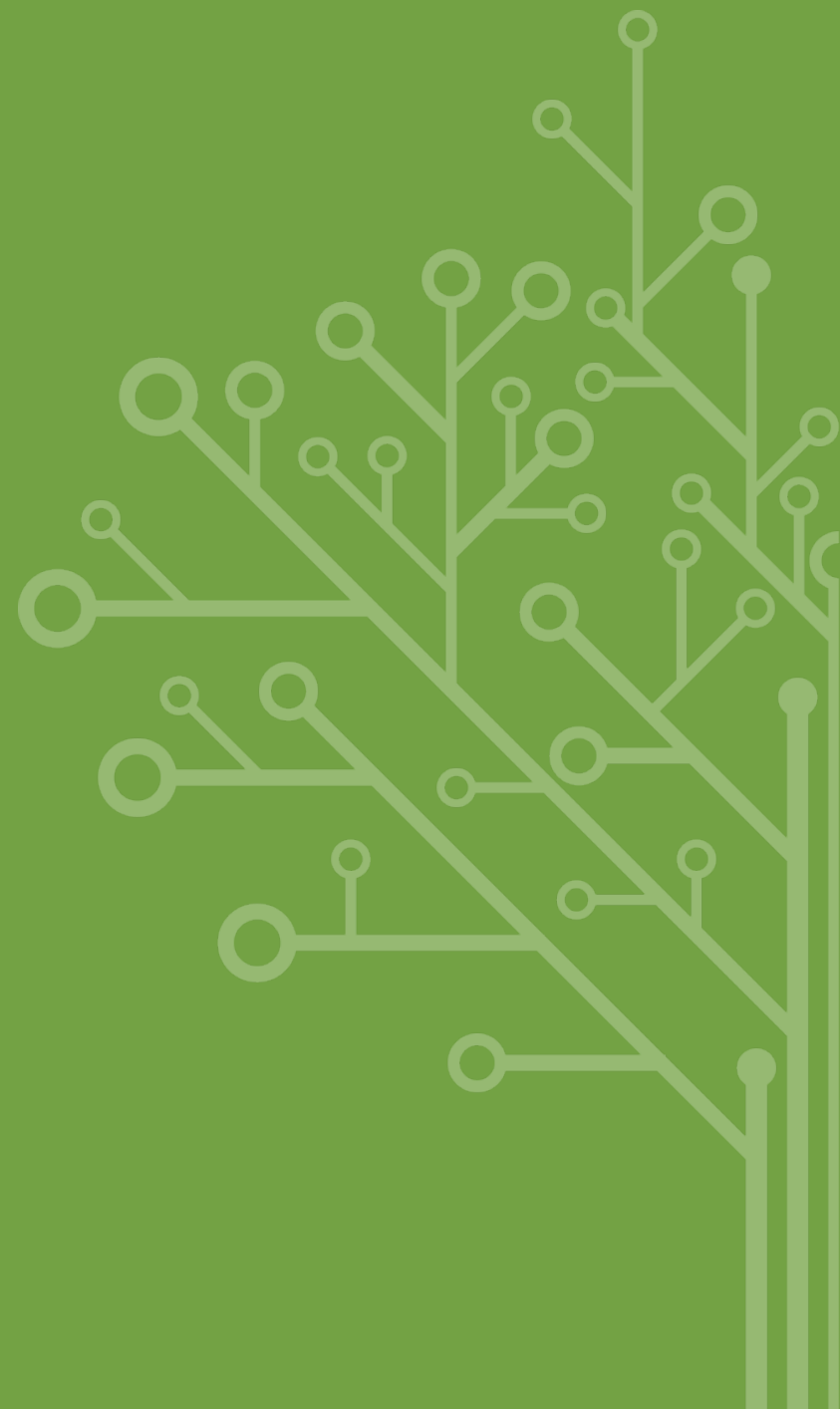
Raportti 1: Ympäristökestävyys matkaviestinjärjestelmissä: Selvitys matkaviestinsektorin sidosryhmien toiminnasta ja indikaattoreista. Oulun yliopisto. 2026.

Raportti 2: Ympäristökestävyys matkaviestinjärjestelmissä: Analyysi sääntelystä ja standardoinnista. Oulun yliopisto. 2026.

Raportti 3: Ympäristökestävyys matkaviestinjärjestelmissä: Energiatohokkuuden parantamisen tekniikoita ja suunnitteluperiaatteita. Oulun yliopisto. 2026.

5

Laitteet



VISIIRI.



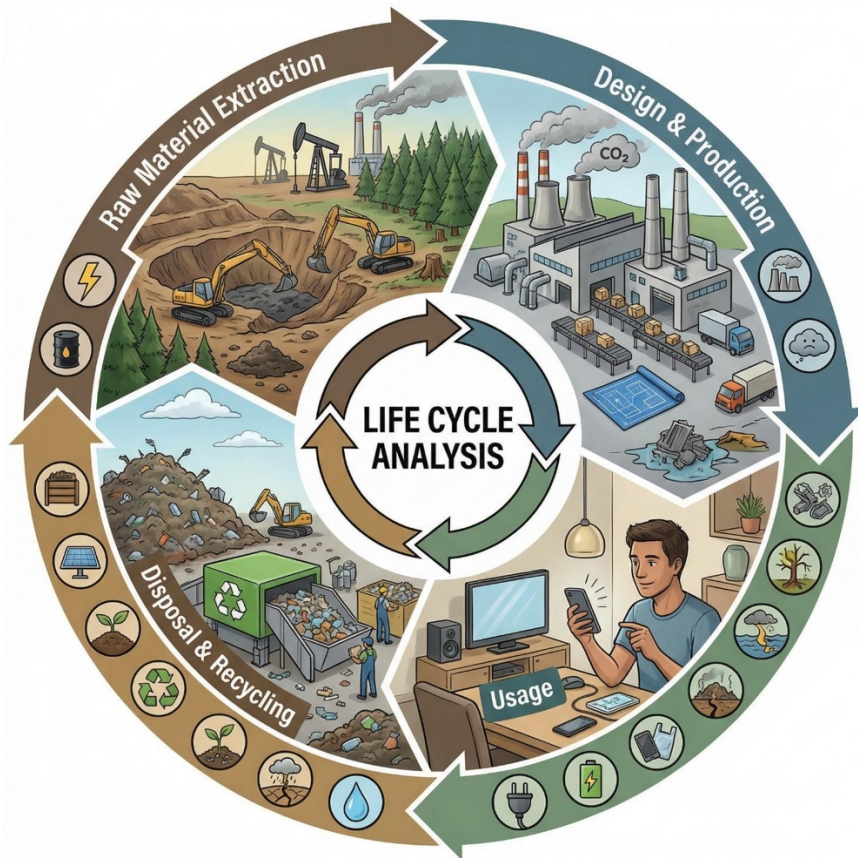
Euroopan unionin
osarahoittama

5. ICT-laitteet

ICT-laitteen käsite on älylaitteiden räjähdysten myötä joidenkin määritysten mukaan laajentunut paljonkin. Useimmat nykyiset televisiot ovat käytännössä älypuhelimeen verrattavia laitteita, yleisimmin ne toimivat android-pohjaisella käyttöjärjestelmällä ja niissä on monia samoja appeja. Älykodissa koko asunto on älylaitteiden kokonaisuus, jossa kaikki kodinkoneet pakastimesta saunan kiukaaseen ovat hallittavissa tai toimivat itsenäisen ohjauksen kautta. Sama pätee autoihin, nykyisten sähköautojen esikuva Tesla on käytännössä pyörillä kulkeva tietokone, jossa on lisänä auton hallintalaitteet ja suurin osa nykyisistä autoista seuraa tätä kaavaa.

Tässä luvussa keskitytään kuitenkin perinteisesti ICT-laitteiksi miellettyihin laitteisiin, joita ovat työasematietokoneet ja kosketusnäyttöiset älypuhelimet. Samat tekijät koskevat myös palvelintietokoneita datakeskuksissa, usein korostuneesti, koska ne ovat uusinta teknologiaa ja sisältävät enemmän ja korkeatehoisempia siruja, kuin työasemat. Laitteista myös monet kuvantamislaitteet, kuten skannerit, tulostimet ja monitoimilaitteet käsitellään niiden erityispiirteiden osalta.

Avain laitteiden ilmasto- ja ympäristövaikutusten ymmärtämiseen on elinkaaren ja sen vaiheiden ymmärtäminen. Perinteinen elinkaarinäkemyksen on ollut lineaaritalouden mukainen raaka-ainehankinnasta hävitykseen johtanut kaari. Nykyinen elinkaari tarkoittaa enemmänkin elinkaarikehää, jossa kierrätys ja kierrätettävyyden ovat tärkeässä osassa, ja tarkoituksena on pitää mahdollisimman monta laitetta toiminnassa mahdollisimman kauan ja mahdollisimman paljon käytetyistä raaka-aineista kierrossa.



Elinkaaren kehän vaiheet voidaan karkeasti jakaa kuvan 1 mukaisesti neljään osaan. Raaka-ainehankinta sisältää sekä neitseellisten, että kierrätettyjen raaka-aineiden lähteet, sekä tähän liittyvien toimintojen päästöt. Suunnittelu ja tuotanto -osuus sisältää kaikki jalostuksen ja tuotannon ketjut, sekä tuotesuunnittelun. Tässä osiossa kehän kuvaavuus on hieman epätarkka, koska suunnittelussa tulee ottaa huomioon kierrätettävyys ja käytetyt raaka-aineet. Tuotantovaiheen jälkeen laite lähtee käyttövaiheeseen, jossa tavoitteena on mahdollisimman pitkä käytössä olo. Lopulta kun laite ei enää ole käyttökelpoinen, se siirtyy hävitys ja kierrätys vaiheeseen, jossa pyritään käyttämään laitteen osat ja raaka-aineet mahdollisimman pitkälti hyväksi. Näiden lisäksi on erillisenä tekijänä vielä logistiikka, jota monimutkaisten ICT-laitteiden tuotannossa on paljon mukana.

5.1. Raaka-aineiden hankinta

Suurin osa elektroniikan raaka-aineista on vielä neitseellisiä, elektroniikkaromun kierrätysaste globaalisti on noin 22,3 % ja romun määrä kasvaa nopeammin kuin kierrätysbisnes pysyy mukana. Tietoteknisissä laitteissa on 800-1000 erilaista ainesosaa, joista monet ovat erittäin myrkyllisiä ihmiselle ja haitallisia ympäristölle. Monet raaka-aineet louhitaan kolmannessa maailmassa, usein huonoissa



työoloissa ja ympäristöä huomioimatta. Näistä erityisesti korostuvat konfliktimineraaleiksi kutsutut kulta, tantalum, tina ja tungsten, joiden tuotanto on pitkälti konfliktialueilla ja joiden tuotoilla ruokitaan konflikteja. Yhden kannettavan tietokoneen tuottamiseen tarvitaan 1200 kiloa louhittua maa-ainesta, älypuhelimessa tämä määrä on 86 kiloa.

Myrkyllisiä raaka-aineita, joita koneissa käytetään ovat esimerkiksi bromatut palonestoaineet, kevyt- ja raskasmetalli, heksavalentti kromi, sekä polyvinyylilokloridi (PVC-muovi). Raskasmetalleista yleisimmät ovat cadmium, elohopea ja lyijy, kevytmetalleista beryllium. Suurin osa näistä aineista on jossain määrin karsinogeenisiä, eli niille altistuminen lisää syöpäriskiä. Melkein kaikki ovat myös biomagnifikoituvia, eli ne kertyvät ravintoverkossa sen alemmilla tasoilla sen huipulle, kuten ihmisiin. Ne ovat myös bioakkumuloituvia, eli ne kertyvät kehoon, koska keho ei osaa niitä hajottaa. Yhdelläkään näistä ei myöskään ole todettu ravintoarvoa tai positiivisia biofunktioita ihmiskehossa.

Beryllium aiheuttaa berylliosista, joka on berylliumpölyn hengittämisestä aiheutuva keuhkosairaus. Siinä hiukkaset tulehduttavat keuhkorakkuloita ja aiheuttavat hapenottokyvyn vähenemistä. Lyijy ja elohopea tuhoavat keskushermostoa ja ovat erityisen haitallinen lapsille ja sikiöille. Cadmium aiheuttaa

verenpainetautia ja sydänsairauksia, ja on erityisen myrkyllistä munuaisille ja saastuttaa vesistöjä pienissäkin pitoisuuksissa. Samoin tekee heksavalentti kromi, joka on myös munuaisten vahingoittamisen lisäksi maksatoksista. Bromatut palonestoaineet taas tuhoavat luontaista immuunipuolustusta. PVC-muovit ja sen johdannaiset ovat erittäin myrkyllisiä kaikelle elolliselle, ihmisellä ne tuhoavat dna:ta, sisäelimiä, keskushermostoa, lisääntymiselimiä ja immuunijärjestelmää. Konfliktimineraalien aiheuttamista sodista ilmeisin ja ajankohtaisin on tällä hetkellä käynnissä oleva Sudanin sisällissota. Sodan viisi osapuolta kamppailee öljyn, kaasun ja mineraalivarantojen hallinnasta. Jokaisella osapuolella on omia kansainvälisiä kumppaneita, joille osapuolet myyvät alueensa luonnonvarojen tuotantoa pääosin aseita vastaan. Osapuolten tukijoihin kuuluvat mm. Arabiemiraatit, Kiina, Turkki ja Venäjä, joilla kaikilla on omia intressejään alueen luonnon rikkauksista. Sota on aiheuttanut noin 150 000 kuolonuhria, noin 14 miljoonaa ihmistä on joutunut lähtemään pakolaiseksi ja miljoona lasta on jatkuvasti aliravittuja. Sodan loppumiselle tai aselevolle ei ole toistaiseksi ollut mahdollisuuksia.

5.2. Design

Suunnittelu on se vaihe, jonka pitäisi olla tässä elinkaarikehällä se, mistä kaikki lähtee liikkeelle, sillä siinä päätetään laitteen tärkeimpiä ominaisuuksia, kuten sen materiaalit, myrkylliset aineet, kierrätettävyyden helpous niin osina kuin raaka-aineina ja kestävyys suunnitellun käyttövaiheen maksimoimiseksi elinkaarikehällä. Samoin suunnitteluvaiheessa on mahdollisuus päättää ympäristösertifiointien, kuten TCO Certified tai EPEAT, huomioon ottamisesta tuotteen osalta. Euroopassa suunniteltuja tuotteita koskee nykyään Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2024/1781 eli EcoDesign direktiivi, joka koskee myös tieto- ja viestintätekniikan laitteita.

Suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon, että laitteeseen saa sen tarvitsemia päivityksiä mahdollisimman kauan.

5.3. Tuotanto

Tuotantovaiheessa raaka-aineita jalostetaan, niistä kasataan komponentteja ja lopulta komponenteista kasataan valmiita laitteita. Laitteiden valmistuksen monimutkaisuudesta hyvänä esimerkkinä toimii iPhone, jonka arvoketjussa on yli 1400 tuotantoketjua, jotka

koskettavat noin 50 eri maata. Lisäksi laitteiden valmistus vaatii erityislaitteistoa ja korkeaa osaamista. Korkeatasoisten sirujen valmistuksessa käytetään extreme ultra violet litografialaitteistoa, pitkälle erikoistunutta softaa, ja korkeakoulutettua työvoimaa. Laitteiden tuotanto on energiantensiivinen prosessi, jossa kuluu myös suuria määriä vettä. Yhden läppärimen valmistaminen vaatii 190 000 litran vedenkäyttöä ja yhden älypuhelimien noin 50 000 litran.

Kun laitteiden tuotantoketjuja katsotaan, se alkaa raaka-aineiden jalostamisesta. Kaiken nykyisen tietotekniikan ytimessä on piisiru, joka tehdään piin monokristalli-muodosta. Tässä prosessissa piin tulee olla erittäin puhtaassa muodossa, jossa pölyhiukkanen riittää pilaamaan kyseisen tuotantovaiheen, joten se on tehtävä kliinisen puhtaassa tilassa. Prosessissa puhdasta piikristallia kastetaan sulaan piihin ja sulasta raaka-aineesta siemenkiteen ympärille muodostuu tuloksena piikristalliharkko. Tässä Harkosta tämän jälkeen leikataan ohuita siivuja, joita kutsutaan englanninkielisesti "wafer" eli vohveli, jotka kiillotetaan peilikirkkaiksi. Tämän jälkeen ne ovat valmiita litografiaan.

Tässä vaiheessa piivohvelit päällystetään valoherkällä, fotoresistillä aineella, josta on negatiivinen ja positiivinen muoto. Positiivinen muoto on yleisempi, sillä pinnoitettu osa vohvelia muuttuu pehmeämmäksi ja helpommin työstettäväksi, kun se valotetaan



ultraviolettilaserilla. Negatiivinen muoto taas kovettaa sillä pinnoitetun vohvelin osan ja mahdollistaa muun osan työstämisen. Päälystetty vohveli syötetään litografia-laitteeseen, jolla siihen tulostetaan kuvio, joka perustuu tarkasti suunniteltuun piirustukseen. Tämän kuvion tulee olla nanometrilleen oikein nykyisten alle muutaman nanometrin transistorien takia. Tulostuksen jälkeen vohveli pestään, jolloin tulostettu 3d-kuvio tulee esiin.

Tämän jälkeen kuvio kaiverretaan, jotta saadaan tehtyä monikerroksinen mikrosirun kehys. Nykyisissä siruissa näitä kerroksia voi olla kymmeniä, enimmillään tällä hetkellä 175, joka asettaa todella tarkat vaatimukset kaiverrukseen. Kaiverrus voidaan tehdä joko kuivamenetelmällä, jossa käyttämällä kaasuja saadaan sirun kuvio esille, märkämenetelmässä käytetään nestemuotoisia kemikaalikylypyjä. Lopulta kaiverrettuun sirun kehukseen ammutaan negatiivisia ja positiivisia ioneja, joilla saadaan kuvioon halutut johtavuudet ja varaukset, joilla sähköä voidaan ohjailta. Tällä tavoin muodostetaan transistorit, sähköiset loogiset portit, mikropiirin peruskomponentit. Vohvelista voidaan tämän jälkeen sahata timanttisahalla yksittäisiä siruja, joista tietotekniikan komponentit valmistetaan.

5.4. Käyttö

Käyttövaiheen pääasiallinen suora ilmasto- ja ympäristövaikutus on energiankulutus. Koska laitteet ovat nykyään erittäin energiatehokkaita, on tämä vaikutus melko pieni. Hyvänä esimerkkinä voidaan ottaa Teknillisen korkeakoulun, nykyisen Aalto-yliopiston hankkima, silloin Suomen tehokkain supertietokone Cray C94, joka kulutti jäähdytyksineen 250 – 300 kW sähköä ja tuotti maksimissaan noin 4 gigafloppia laskentatehoa. Applen kohtuu uudehko Bionic A15 siru, jota käytetään monen meistä taskussa olevissa iPhoneissa kuluttaa energiaa 2-4 W ja tuottaa 1712,6 gigafloppia laskentatehoa. 30 vuodessa energiatehokkuus on siis monituhatkertaistunut.

Tärkeämpi vaikutus käytön osalta ei olekaan suora energiankulutus, vaan käyttövaiheen itsensä pidentäminen mahdollisimman pitkäksi. Johtuen laitteiden energiatehokkuudesta ja valmistusprosessin monimutkaisuudesta, sekä laajasta määrästä tuotantoketjuja, on käytön ulkopuolisten päästöjen ja energiankulutuksen määrä noin kymmenkertainen yhteen käyttövuoteen nähden. Lyhyen aikaa käytössä ollut laite on näin ollen ympäristön kannalta surkein mahdollinen laite, oli se kuinka energiatehokas tahansa itse käytön



aikana. On suositeltavaa, että työaseman ja kannettavan käyttöikä on 7-10 vuotta ja älypuhelimienkin 5-7 vuotta.

Usein pullonkaulaksi tulee laitteen raudan fyysisen toimivuuden sijasta sille saatavissa olevat softapäivitykset. Tärkeitä ovat etenkin tietoturvapäivitykset laitteen käyttöjärjestelmään, koska monimutkaisina softina niissä on paljon haavoittuvuuksia. Kun tietoturvapäivitykset lakkaavat, myös muiden softien tuki laitteissa lakkaa. Näistä merkittävimminä mobiililaitteissa verkkopankki-app'it ja pöytä tietokoneissa käyttösoftat, kuten selaimet ja toimisto-ohjelmistot.

5.5. Käytöstä poisto ja kierrätys

Parasta kierrätystä on toimivan laitteen ottaminen uuteen käyttöön ja laitteita kannattaakin käyttää niin kauan, kun se on mahdollista. Työasemissa ja kannettavissa tämä on usein helpompaa, kuin mobiililaitteissa, joissa käyttöjärjestelmäpäivitykset ja tietoturvapäivitykset lakkaavat nopeammin, eikä vaihtoehtoisia järjestelmiä ole tarjolla. Työasemiin löytyy useita avoimen lähdekoodin vaihtoehtoja, jotka toimivat vanhemmissakin tietokoneissa, niin x86 ja x64 arkkitehtuurissa, kuin ARM-arkkitehtuurissakin.

Useimmat komponentit ovat vaihdettavissa, etenkin pöytätyöasemissa ja monien harrastajien pöytäkoneet ovat Theseuksen tietokoneita, suurin osa komponenteista on vaihdettu tehokkaampiin jossain vaiheessa. Kannettavissa on enemmän vaihtelua, parhaimmillaan niissä voi vaihtaa lähes kaikki lisälaitteiden kortit, pahimmillaan jopa kiintolevyn piirit on integroitu emolevylle. Aina kun mahdollista ja taloudellisesti edes sinnepäin järkevää, kannattaa huoltaa koneita ja käyttää niitä mahdollisimman pitkään. Lopulta kuitenkin kaikki maallinen on katoavaista ja jokainen työasema tulee tiensä päähän, yleensä kun prosessori tai emolevy hajoaa.

Tässä vaiheessa on vielä mahdollista kierrättää komponentteja, kuten monet kierrätysyritykset tekevätkin. Tehdasheduollettuna monet komponentit ovat lähes uuden veroisia ja niitä voidaan käyttää varaosina, tai jopa uusien koneiden osina. Vanhoille tietokoneiden osille on myös oma markkinansa harrastajien keskuudessa. Hajonneet tai vanhentuneet osat ovat myös usein romua, kun kone on lakannut toimimasta, jolloin ne kierrätetään raaka-aineiksi.

Raaka-aineiden kierrätyksessä käytetään erilaisia keinoja mekaanisesta purkamisesta kemikaaliseen liotukseen. Helpoimpia kierrättää ovat alumiinikuoret ja muut puhtaasta metallista tehdyt osat. Hankalimpia ovat integroidut piirit, jotka on usein pinnoitettu palonestoaineella ja

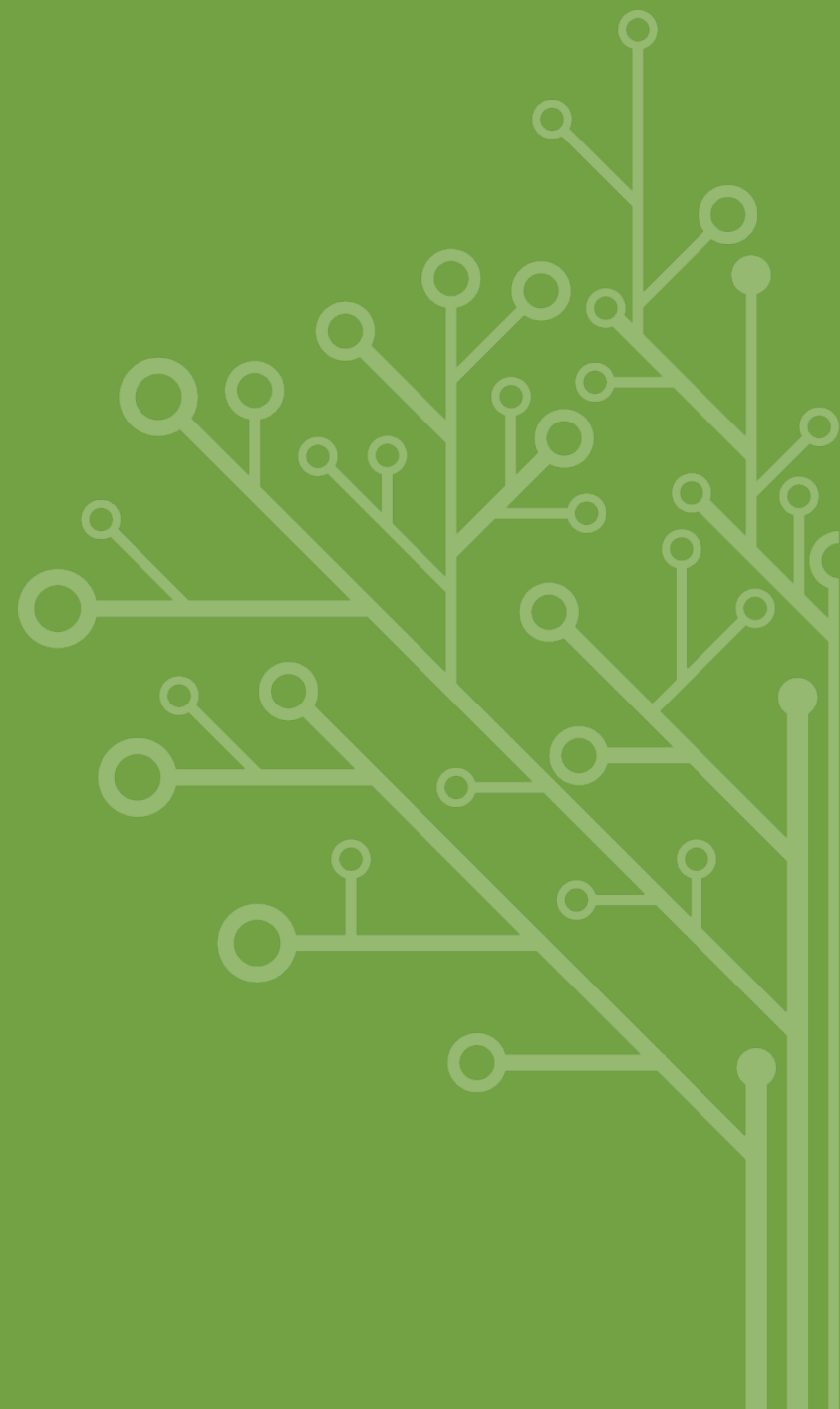


kierrätyskelvottomat muovit, joissa on myös usein erilaisia kemikaaleja mukana. Vaarallisimpia kierrättää ovat aiemmin mainitut erityisaineet, kuten kevyt- ja raskasmetallit. Raaka-aineiden kierrätystä kutsutaan kovakierrätykseksi, ja laitteiden ja niiden osien kierrätystä pehmeäksi kierrätykseksi.

Tärkeintä kovakierrätyksessä on varmistaa, että laite päätyy asialliseen käsittelyyn. Pehmeykierrätyksessä on hyvä varmistaa, että laitteita ei dumpata kolmanteen maailmaan, jossa ne voivat päätyä luontoon tai kaatopaikalle, vaan että ne pysyvät Euroopassa.

6

Ohjelmistot



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

6. Ohjelmistot

6.1. Mitä on Green Coding?

Green coding eli vihreä koodaus tarkoittaa ohjelmistojen suunnittelua ja toteuttamista siten, että niiden aiheuttama energian- ja resurssienkulutus minimoidaan sovelluksen ajon aikana. Kyse ei ole tinkimisestä toiminnallisuudesta tai laadusta, vaan siitä, että samat tavoitteet saavutetaan fiksummin ja kevyemmin.

Yksi vihreän koodauksen tärkeimmistä lähtökohdista on ymmärtää, että ohjelmiston suurin ympäristövaikutus syntyy silloin, kun sitä käytetään – ei niinkään sitä kehittäessä. Tämä ajonaikainen kulutus ei ole vakio, vaan se elää jatkuvasti käyttöasteen, käyttötapojen ja kulloisenkin ajoympäristön mukaan. Kehittäjän tekemillä koodivalinnoilla, kuten algoritmeilla, arkkitehtuurilla ja tiedon käsittelytavoilla, on suora vaikutus siihen, kuinka raskaaksi ohjelmisto lopulta muodostuu. Koska digitaalinen maailma on monimutkainen, vihreä koodaus vaatii aina mittaamista; pelkkä mututuntuma johtaa usein harhaan, ja todellinen kulutus on tehtävä näkyväksi datan avulla.

On myös tärkeää huomata, mitä vihreä koodaus ei ole. Se ei tarkoita pelkkää pistemäistä suorituskyvyn optimointia tai kertaluonteista siivousprojektia. Se ei myöskään ole ennenaikaista pikkuasioiden viilaamista (premature optimization). Sen sijaan toiminta keskittyy ennen kaikkea turhan työn välttämiseen ja toistuvien prosessien karsimiseen.

6.2. Frontend – Käyttöliittymät ja asiakaspuoli

Frontend-sovellukset vaikuttavat energiankulutukseen kolmella pääalueella: koodin suorittamisessa, näkymän renderöinnissä ja verkkoliikenteessä. Koska samaa käyttöliittymää saattaa käyttää samanaikaisesti tuhannet tai miljoonat ihmiset, pienetkin kooditason tehottomuudet moninkertaistuvat nopeasti laajassa mittakaavassa.

Käyttöliittymää kehittäessä tulisi ensinnäkin välttää turhia renderöintejä ja jatkuvia, tarpeettomia päivityksiä. Sovelluksen ladattavaa pakettikokoa (bundle size) voidaan pienentää merkittävästi pilkkomalla koodia ja lataamalla sitä laiskasti (lazy loading), jolloin käyttäjän laitteelle siirretään vain se materiaali, jota sillä hetkellä todella tarvitaan. Myös palvelimen suuntaan tapahtuvaa "pölinää" eli



jatkuvia pieniä API-kutsuja on syytä välttää ja pyrkiä sen sijaan harvempiin, yhdistettyihin kyselyihin. Kun tähän yhdistetään viisas välimuistin käyttö, estetään saman datan lataaminen verkosta uudestaan ja uudestaan. Lisäksi visuaalisella puolella kannattaa suosia keveitä, CSS-pohjaisia ja laitteistokiihdytettyjä animaatioita raskaan JavaScript-väännön sijaan.

Ydinajatus: Tehokas frontend säästää suoraan käyttäjän laitteen akkua, vähentää globaalia verkkoliikennettä ja parantaa samalla käyttökokemusta – erityisesti mobiililaitteilla.

6.3. Backend – Palvelinjärjestelmät

Palvelinpuolella energiaa kuluttavat erityisesti prosessorin tekemä työmäärä pyyntöä kohden, tietokantahaut sekä datansiirron volyyymi. Siinä missä frontend näkyy yksittäisen käyttäjän laitteella, palvelimilla tehottomuudet skaalautuvat suoraan kävijämäärään ja dataliikenteen mukaan.

Tehokkaan backendin rakentaminen alkaa siitä, että vähennetään työtä pyyntöä kohden ja optimoidaan sovelluksen kriittiset polut (hot paths), joita ajetaan jatkuvasti. Tietokantahaut ovat tyypillisiä

pullonkauloja, joten raskaat suorituskykyöppöt – kuten N+1-kyselyt – ja liian suuren tietomäärän hakeminen (over-fetching) on karsittava. Välimuisti on palvelimellakin tehokas työkalu, mutta sen todelliset hyödyt on aina varmistettava mittaamalla, sillä välimuistin ylläpitokin kuluttaa resursseja. Lopuksi on syytä minimoida asiakkaalle lähetettävien datapakettien koko ja valita tehokkaat, tarvittaessa tiivistetyt viestintä- ja serialisointimuodot perinteisen, toisinaan raskaan JSON-datan tilalle.

Ydinajatus: Palvelinjärjestelmissä pienikin tehottomuus voi johtaa valtavaan energiahukkaan, koska samaa koodia suoritetaan toistuvasti ja massiivisessa mittakaavassa.

6.4. Tekoäly (AI) ja koneoppiminen

Tekoälyjärjestelmät ovat nykyisin tunnetusti suuria energiasyöppöjä. Erityisesti mallien kouluttaminen ja laajamittainen päättely eli valmiin mallin käyttäminen (inference) kuluttavat huomattavan määrän sähköä, minkä vuoksi tekoälyä on lähestyttävä tarkasti suunnitellen.

Koulutusvaiheessa energiahukkaa voidaan torjua valitsemalla tehtävään oikean kokoiset, ei tarpeettoman suuret mallit ja datajoukot.



Pällekkäisiä ja turhia kokeiluja tulisikin välttää ja prosessissa kannattaa hyödyntää varhaista pysäytystä (early stopping) sekä muita moderneja, tehokkaita koulutusmenetelmiä. Tärkeää on myös maksimoida laitteiston käyttöaste, jotta palvelimet tekevät tehokkaasti työtä eivätkä seiso tyhjäkäynnillä.

Kun malli on valmis ja siirrytään päättelyvaiheeseen, käyttöön tulisi valita pienin mahdollinen toimiva malli. Syötteiden ja kehoitteiden (prompt) koko on syytä pitää napakkana, ja usein toistuvat tekoälyvastaukset kannattaa tallentaa välimuistiin uuden laskennan välttämiseksi. Jos mahdollista, pyyntöjä on hyvä myös yhdistää suuremmiksi nipuiksi (batching).

Ydinajatus: Tekoälyä tulee käyttää harkiten. Ratkaisuissa on aina punnittava tarkasti saavutettu hyöty ja tarkkuus suhteessa kulutettuihin resursseihin.

6.5. Kompromissit (Trade-offs)

Vihreä koodaus ei ole mustavalkoista, vaan se on jatkuvaa tasapainoilua energiatehokkuuden ja ohjelmiston muiden laatuvaatimusten välillä. Yhtä valmista, täydellistä ratkaisua ei ole

olemassa, vaan valinnat on tehtävä aina kontekstin, mittausten ja kokonaisvaikutusten perusteella.

Kehittäjä kohtaa työssään useita tyypillisiä kompromisseja:

- Prosessori vastaan muisti: Välimuistin käyttö on erinomainen tapa vähentää laskentaa ja säästää prosessorin tehoa, mutta samalla se kasvattaa sovelluksen muistinkulutusta.
- Verkko vastaan laskenta: Datan pakkaaminen pienentää siirrettävän tiedon määrää verkossa, mikä säästää verkkoresursseja. Toisaalta pakkauksen purkaminen vastaanottopäässä vaatii prosessorilta enemmän työtä.
- Tehokkuus vastaan ylläpidettävyys: Äärimmilleen optimoitu koodi saattaa säästää energiaa, mutta se voi muuttua niin monimutkaiseksi, että sen ylläpito, ymmärtäminen ja jatkokehitys vaikeutuvat huomattavasti.
- Paikalliset vastaan järjestelmän laajuiset vaikutukset: Yhden pienen osion optimointi saattaa näyttää paikallisesti hyvältä, mutta se voi vahingossa siirtää kuormituksen ja energiankulutuksen järjestelmän toiseen osaan.

Kaiken lisäksi mittaamiseen liittyy aina tiettyä epävarmuutta.

Ohjelmistojen energiankulutusdata on usein suuntaa-antavaa ja arvioitua, minkä vuoksi saatuja tuloksia on osattava tulkita kriittisesti ja huolellisesti.



6.6. Kestävä ohjelmistokehitys: Miten kestävyys voidaan huomioida koko ohjelmistokehityksen elinkaaren aikana?

Kestävä ohjelmistokehitys laajentaa perinteistä ohjelmistotuotannon näkökulmaa. Siinä missä perinteisesti keskitytään toiminnallisuuteen, aikatauluihin ja kustannuksiin, kestävä lähestymistapa huomioi ohjelmiston ekologiset vaikutukset koko elinkaaren ajan. Tämä tarkoittaa sitä, että ympäristövaikutuksia tarkastellaan jo ennen ensimmäistä koodiriviä ja vielä pitkään sen jälkeen, kun ohjelmisto on otettu käyttöön.

Tässä kappaleessa käydään läpi ensin datan rooli ympäristökestävässä ohjelmistokehityksessä ja sen jälkeen kaikki ohjelmistokehityksen vaiheet, joista jokaisessa annetaan konkreettisia esimerkkejä siitä miten kestävyys voidaan ottaa huomioon.

Datan rooli ympäristökestävydessä

Data on yksi keskeisimmistä ohjelmistojen ympäristövaikutusten lähteistä. Jokainen datapiste aiheuttaa kuormaa useassa vaiheessa:

keruussa, siirrossa, käsittelyssä, tallennuksessa ja usein vielä varmuuskopioinnissa ja uudelleen käytössä. Kun dataa kerätään varmuuden vuoksi tai tulevia, epämääräisiä käyttötapauksia ajatellen, syntyy nopeasti kertautuva kuorma, jota on myöhemmin vaikea hallita.

Kestävä ohjelmistokehitys edellyttää dataminimalismia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että jo vaatimuksia määriteltäessä kysytään, mitä dataa todella tarvitaan, millä tarkkuudella ja kuinka pitkään. Datan käyttötarkoitus ja elinkaari tulee määritellä yhtä huolellisesti kuin sen rakenne. Poistaminen, anonymisointi ja arkistointi eivät saa olla jälkikäteen lisättäviä toimintoja, vaan osa alkuperäistä suunnittelua.

Tuotantovaiheessa datan määrä kasvaa usein huomaamatta. Lokit, analytiikka, telemetria ja tekoälyyn liittyvät aineistot voivat paisua nopeasti, ellei niille ole nimetty omistajuutta ja selkeitä sääntöjä. Kestävä lähestymistapa korostaa tarkoituksellista mittaamista: kerätään vain sellaista dataa, jota todella hyödynnetään päätöksenteossa, ja arvioidaan säännöllisesti, onko keräys edelleen perusteltua.



Kestävyyttä läpi ohjelmiston koko elinkaaren

Hankinta

Ohjelmistojen hankintavaiheessa tehdään usein ratkaisuja, jotka määrittävät ympäristövaikutuksia vuosiksi eteenpäin. Kestävyys tulisi nähdä hankinnoissa yhtä keskeisenä kriteerinä kuin hinta, tietoturva tai toiminnallisuus. Tämä tarkoittaa muun muassa sitä, että toimittajilta edellytetään läpinäkyvyyttä energiankulutukseen, infrastruktuuriin ja elinkaarivaikutuksiin liittyen.

Kestävässä hankinnoissa korostuvat ratkaisut, jotka toimivat olemassa olevalla laitteistolla eivätkä pakota nopeisiin laitepäivityksiin. Modulaarisuus ja muunneltavuus tukevat ohjelmiston pitkää käyttöikää ja vähentävät tarvetta korvaaville järjestelmille.

Konkreettisia esimerkkejä käytännön toimiksi:

- Lisää tarjouspyyntöihin (RFP) erillinen osio, jossa toimittajaa pyydetään kuvaamaan ohjelmiston energiankulutukseen vaikuttavat tekijät. Tämä voi olla karkea arvio, esimerkiksi miten ohjelmiston kuormitus kasvaa käyttäjämäärän mukana tai millaisia infrastruktuuriratkaisuja se edellyttää. Tärkeämpää kuin täydellinen tarkkuus on se, että aihe tehdään näkyväksi.

- Vaadi ohjelmistolta toimivuutta nykyisellä laitekannalla. Hankinnassa voidaan esimerkiksi määritellä, että ohjelmiston on toimittava vähintään viisi vuotta vanhoilla päätelaitteilla tai tietyllä suorituskykytasolla ilman pakottavia päivityksiä.
- Sovi jo hankintavaiheessa, miten energiankulutusta ja kuormitusta seurataan. Tämä voi tarkoittaa yksinkertaista mittaria, kuten CPU- tai muistinkäyttöä per käyttäjäistunto, jonka toimittaja sitoutuu raportoimaan säännöllisesti.

Vaatimusmäärittely

Vaatimusvaihe on yksi tärkeimmistä kestävyuden näkökulmasta. Tässä vaiheessa päätetään, kuinka paljon dataa käsitellään, millaisia suorituskykyvaatimuksia asetetaan ja kuinka laajasti järjestelmän oletetaan skaalautuvan. Kestävä vaatimusmäärittely pyrkii rajaamaan järjestelmän vain siihen, mikä on aidosti tarpeellista.

Vaatimuksissa tulisi huomioida erilaiset käyttöympäristöt ja laitteistot. Ohjelmiston tulisi sopeutua heikompiin verkkoihin ja laitteisiin ilman, että käyttäjäkokemus romahtaa. Energiatohokkaiden oletusasetusten tarjoaminen ja käyttäjien mahdollisuus hallita resurssien käyttöä ovat keskeisiä keinoja vähentää turhaa kuormaa.



Konkreettisia esimerkkejä käytännön toimiksi:

- Ota käyttöön periaate, että jokaiselle datakentälle tai tietovirralle on nimettävä käyttötarkoitus. Jos käyttötarkoitusta ei pystytä kuvaamaan selkeästi, dataa ei kerätä. Tämä yksinkertainen kysymys karsii usein merkittävän osan "varmuuden vuoksi" -datasta.
- Määrittele energiatehokkaat oletusasetukset vaatimuksissa. Esimerkiksi raskaat analytiikka- tai reaaliaikaiset päivitystoiminnot voidaan määritellä oletuksena pois päältä ja aktivoitaviksi vain tarpeen mukaan.
- Vaadi, että heikommassa verkko-olosuhteissa ohjelmisto vähentää automaattisesti päivitystiheyttä, kuvia tai taustaprosesseja sen sijaan, että yrittäisi ylläpitää täyttä toiminnallisuutta hinnalla millä hyvänsä.

Suunnittelu ja toteutus

Suunnittelu- ja toteutusvaiheessa kestävyys konkretisoituu teknisiksi ratkaisuuksi. Arkkitehtuurivalinnat, ohjelmointikielet, kehykset ja algoritmit vaikuttavat suoraan ohjelmiston energiankulutukseen. Kevyet, modulaariset ja selkeät rakenteet tukevat sekä ympäristökestävyyttä että pitkäaikaista ylläpidettävyyttä.

Datan minimointi, tehokkaat algoritmit ja tarpeettomien riippuvuuksien karsiminen ovat keskeisiä periaatteita. Myös käyttöliittymäsuunnittelu vaikuttaa energiankulutukseen: raskaat animaatiot ja jatkuvat päivitykset lisäävät sekä datansiirtoa että laskentaa, kun taas selkeät ja yksinkertaiset ratkaisut vähentävät hukkaa.

Konkreettisia esimerkkejä käytännön toimiksi:

- Ota käyttöön käytäntö, jossa jokaiselle uudelle komponentille tai mikropalvelulle perustellaan sen olemassaolo. Jos sama toiminnallisuus voidaan toteuttaa osana olemassa olevaa komponenttia ilman merkittävää monimutkaistumista, uutta osaa ei luoda.
- Tee riippuvuuksien säännöllinen karsinta. Tiimi voi esimerkiksi varata jokaisesta kehitysjaksosta pienen osuuden vanhojen kirjastojen, frameworkien ja käyttämättömän koodin poistamiseen. Tämä vähentää sekä ajonaikaista kuormaa että kehityksen aikaisia kustannuksia.
- Varmista, että jokaiselle animaatiolle, jatkuvalle päivitykselle tai visuaaliselle tehosteelle on selkeä käyttäjähyöty. Jos hyötyä ei pystytä kuvaamaan, ominaisuus jätetään pois.



Testaus

Testaus kuluttaa merkittävästi laskentaresursseja erityisesti automatisoiduissa ympäristöissä. Kestävä testaus ei tarkoita testauksen vähentämistä, vaan sen kohdentamista. Testauksen avulla voidaan tunnistaa tehottomia ratkaisuja ja estää niiden päätyminen tuotantoon, missä niiden vaikutus kertautuisi moninkertaiseksi.

Konkreettisia esimerkkejä käytännön toimiksi:

- Rajaa jatkuvan integraation putkissa ajettavat testit eri tasoihin. Kevyet yksikkötestit ajetaan jokaisella muutoksella, mutta raskaat integraatio- tai suorituskykytestit ajetaan harvemmin, esimerkiksi kerran vuorokaudessa tai ennen julkaisuja.
- Mittaa testauksen aikaisia resurssihiikkejä. Jo pelkkä havainto siitä, mitkä testit kuormittavat eniten, auttaa kohdistamaan optimointia ja poistamaan päällekkäisiä tai vähäarvoisia testejä.
- Hyödynnä testauksessa realistisia mutta pienennettyjä datamääriä. Täysikokoisten tuotantodatojen käyttö testauksessa kasvattaa kuormaa usein tarpeettomasti ilman, että testauksen laatu paranee.

Käyttö ja ylläpito

Suurin osa ohjelmiston ympäristövaikutuksista syntyy käyttö- ja ylläpitovaiheessa. Päivitykset, uudet ominaisuudet ja kasvava datamäärä lisäävät usein järjestelmän resurssivaatimuksia. Kestävä ylläpito perustuu jatkuvaan karsimiseen: poistetaan tarpeeton data, käyttämätön kapasiteetti ja vanhentuneet toiminnot.

FinOps- ja GreenOps-ajattelut yhdistävät taloudelliset ja ympäristölliset näkökulmat. Kun resurssien käyttö tehdään näkyväksi, syntyy kannustimia vähentää sekä kustannuksia että päästöjä.

Konkreettisia esimerkkejä käytännön toimiksi:

- Siivoa säännöllisesti resursseja. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi käyttämättömien pilvi-instanssien, levyjen ja varmuuskopioiden poistamista kerran kuukaudessa tai jokaisen sprintin päätteeksi.
- Tee resurssien käytöstä näkyvää tiimeille. Esimerkiksi yksinkertainen dashboard, joka näyttää palvelun kustannukset tai kuormituksen trendit, auttaa ohjaamaan kehitystä ilman erillisiä ympäristömittareita.
- Tarjoa käyttäjille asetuksia, joilla käyttäjä voi vähentää päivitystiheyttä, datan käyttöä tai taustatoimintoja.



Poistaminen

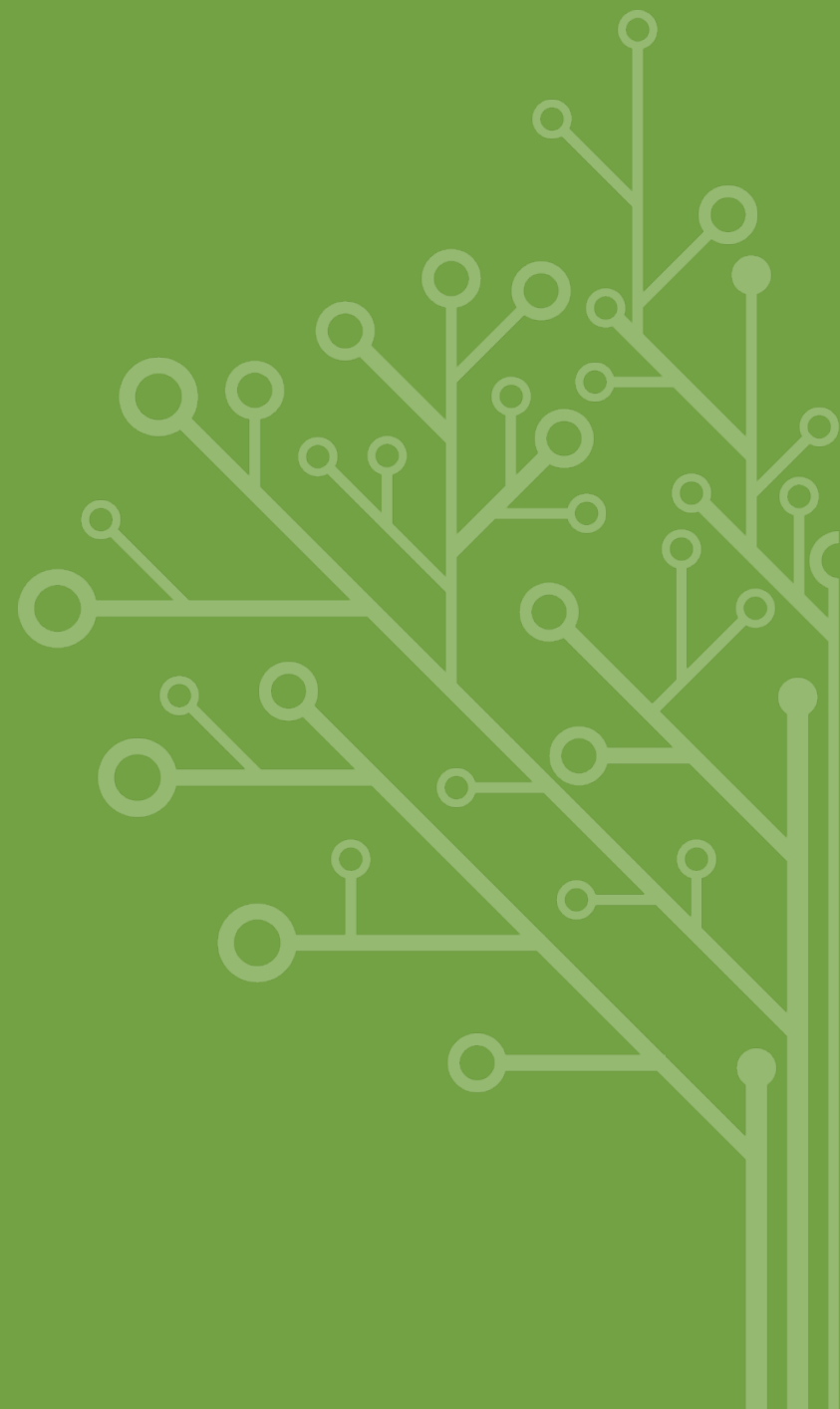
Ohjelmiston käytöstä poistaminen on olennainen osa kestävästä elinkaarta. Hallitsematon alasajo voi johtaa laajoihin datamigraatioihin, ylimääräiseen laskentaan ja jopa laitepäivityksiin. Kestävä poistaminen edellyttää etukäteen suunniteltuja poistopolkuja, datan karsintaa ja järjestelmien hallittua alasajoa.

Konkreettisia esimerkkejä käytännön toimiksi:

- Määrittele ohjelmistolle elinkaaren loppua koskeva suunnitelma jo ennen käyttöönottoa. Tämä voi olla yksinkertainen dokumentti, jossa kuvataan, miten data poistetaan, arkistoidaan tai siirretään, kun järjestelmästä luovutaan.
- Suorita datan karsinta ennen migraatioita. Ennen uuden järjestelmän käyttöönottoa voidaan päättää, että vain viimeisen tietyn ajanjakson data siirretään ja vanhempi data poistetaan tai arkistoidaan erilliseen, kevyempään ratkaisuun.
- Sammuta toimintoja yksi kerrallaan ja samalla seuraa, mitä osia todella vielä tarvitaan. Tämä vähentää turhia siirtoja ja kuormaa.

7

Ohjelmiston energiankulutus ja mittaaminen



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

7. Ohjelmiston energiankulutus ja mittaaminen

Kuinka lisätä ymmärrystä ohjelmiston tai järjestelmän kestävyysvaikutuksista? Ohjelmistojen ja järjestelmien kestävyysvaikutusten selvitys vaatii aina jonkinlaista ymmärrystä mahdollisista vaikutuksista sekä kullekin vaikutukselle sopivia mittaamenetelmiä. Vaikutuksia arvioitaessa on hyvä määrittää, miltä kannalta niitä tarkastellaan.

7.1. Ohjelmistojen energiakulutus

Ohjelmistojen hiilijalanjälki muodostuu suurelta osin niiden energiankäytöstä. Digitaalisten palveluiden ja datakeskusten energiankulutuksen osuus maailman sähköntarpeesta on kasvanut nopeasti, ja tarpeen on arvioitu kasvavan rajusti lähivuosina

digitaalisten palveluiden, pilvilaskennan ja tekoälyn käytön yleistyessä. Etenkin tekoäly kasvattaa merkittävästi datakeskusten tarvetta ja energiankulutusta, sillä kielimallien koulutus ja lisääntyvä inferenssi tarvitsevat paljon laskentatehoa. Ohjelmistojen hiilijalanjälki on siis globaalistikin arvioiden merkittävä. Ympäristöhaittojen lisäksi ohjelmistojen suuri energiankulutus lisää myös laitteiden teknistä kulumista, ja heikentää ohjelmistotuotteiden edullisuutta, saavutettavuutta ja käytettävyyttä. Näitä vaikutuksia on kuvattu myös Sustainability Awareness Framework (SusAF) -kehikossa (kts. kappale 7.5).

“Et voi parantaa sitä, mitä et mittaa”

Ohjelmistojen kehityksessä käytetään paljon erilaisia mittareita, kuten ohjelmointivirheiden määrää, suorituskykyä ja kompleksisuutta. Energiakulutusta on myös mitattu, mutta se on jäänyt vähäiselle huomiolle halvan energian vuoksi. Mittaaminen on kuitenkin keskeinen edellytys energiatehokkuuden systemaattiselle kehittämiselle. Mittaamatta kulutusta voidaan lähinnä arvioida, ja sen vähentämistä on vaikea ohjata tai todentaa. Mittaus tarjoaakin ohjelmistokehitykselle palautekanavan samaan tapaan kuin testaus: se auttaa tunnistamaan kulutusta lisääviä ratkaisuja ja arvioimaan

optimointien vaikutuksia. Sen tekninen toteuttaminen on kuitenkin haastavaa.

Mittaamisen haasteet

Energiankulutusta voidaan tarkastella erityyppisillä mittareilla, mutta niillä kaikilla on omat rajoitteensa. Mittauksen on usein oltava hyvin hienojakoista, sillä yksittäisen toiminnon suorittaminen voi kestää alle mikrosekunnin, ja sama laitteisto voi samaan aikaan palvella useita tehtäviä. Erilaisten päätelaitetyyppien ja pilvilaskennan myötä toimintaympäristö on muuttunut rajusti, ja laitteiden monimuotoisuuden vuoksi tutkimustulokset vanhenevat nopeasti ja niiden yleistäminen on hankalaa. Pilviympäristöissä näkyvyys infrastruktuuriin riippuu myös palveluntarjoajan tarjoamista rajapinnoista.

Suurin haaste lienee kuitenkin mittaustiedon liittämässä osaksi ohjelmistokehityksen arkea. Joitakin erityisalvoja lukuun ottamatta metodologia on vielä melko vähäisessä käytössä ohjelmistokehityksessä. Kustannustehokkaiden mittarien saatavuus on kuitenkin jatkuvasti parantunut, kuten myös mittaamiseen kehitetyt avoimen lähdekoodin ohjelmistot. Kun energiankulutusta seurataan

jatkuvasti osana kehitys- ja tuotantoprosesseja, voidaan energiatehokkuutta parantaa iteratiivisesti samalla tavoin kuin laatua, turvallisuutta tai suorituskykyä. Siksi energiankulutuksen vertailun mahdollistavat mittaustekniikat on oleellista tuoda mukaan ohjelmistokehitykseen.

7.2. Energianmittauksen metodologia

Ohjelmistojen energiankulutuksen mittaaminen ei ole yksittäinen tekniikka tai työkalu, vaan joukko menetelmiä, joilla pyritään tuottamaan mahdollisimman luotettavaa ja vertailukelpoista tietoa ohjelmiston toiminnasta.

Käyttöskenaariot ja mittaustapakset

Mittausjärjestelyn kehitys alkaa yleensä järjestelmän keskeisten käyttöskenaarioiden tunnistamisesta. Tarkoituksena on selvittää, millaiset ohjelmiston käyttötavat ovat energiankulutuksen kannalta merkittäviä. Käyttöskenaarioita voidaan tunnistaa esimerkiksi käyttäjähaastattelujen, dokumentaation, lokitietojen tai asiantuntija-arvioiden perusteella. Tavoitteena on löytää ohjelmistosta ne toiminnot, jotka kuluttavat paljon resursseja ja joita käytetään usein.



Käyttöskenaarioiden pohjalta muodostetaan mittaustapaukset. Ne määrittelevät tarkemmin, mitä toimintoa mitataan, millä syötteillä mittausta tehdään ja millainen tulos mittauksesta halutaan saada.

Mittaustapaukset muistuttavat ohjelmistotekniikasta tuttuja testitapauksia, mutta niiden tavoitteena ei ole ensisijaisesti ohjelmiston oikeellisuuden tarkastaminen vaan energiankulutuksen havainnointi. Mittaus voidaan suorittaa käsin tai automatisoidusti. Käsin tehtävä mittausta voi soveltua yksinkertaisiin kokeisiin tai alustavaan tarkasteluun, mutta automatisoidut mittaustapaukset ovat systemaattisempia.

Mittaustapaukset

Modernit ohjelmistojärjestelmät ovat usein monimutkaisia ja osin epädeterministisiä. Sama toiminto voi käyttäytyä eri suorituskerroilla hieman eri tavalla esimerkiksi käyttöjärjestelmän ajoituksen, välimuistien, verkkoliikenteen tai rinnakkaisten prosessien vuoksi. Siksi yksittäinen mittaustulos ei yleensä riitä luotettavien johtopäätösten tekemiseen, vaan mittausta pyritään toistamaan systemaattisesti useita kertoja. Toisto auttaa tunnistamaan poikkeavat mittaustulokset ja arvioimaan tulosten vaihtelua. Samalla voidaan havaita tilanteita, joissa

ohjelmiston energiatehokkuus muuttuu toistojen välillä esimerkiksi lämpötilan, kuormituksen tai mukautuvien optimointien seurauksena.

Toistuvaan mittaukseen perustuva metodologia on ohjelmistotekniikassa yleinen myös muiden suureiden, kuten suoritusajan, muistinkulutuksen tai verkkoliikenteen mittaamisessa. Monissa organisaatioissa mittaustapauksen perusrakenne voi olla jo olemassa esimerkiksi suorituskyvyn testauksen yhteydessä. Energian mittaaminen voidaan usein integroida osaksi olemassa olevia työnkuluja verrattain pienillä muutoksilla.

Systemaattinen energianmittaus edellyttää suunniteltua mittaustapauksia. Käytännössä kyse on kokonaisesta prosessista, jossa määritellään mittauksen kohde, toteutustapa ja kuinka tuloksia tulkitaan. Mittaustapaukset yhdistää ohjelmistotekniikan testauskäytännöt, automaation, fyysiset mittalaitteet ja datan analysoinnin yhdeksi kokonaisuudeksi.

Automatisointi

Automatisointi vähentää mittausten vaihtelua ja inhimillisten virheiden vaikutusta. Se mahdollistaa suuren määrän toistoja identtisellä tavalla



ilman jatkuvaa manuaalista työtä, mikä myös helpottaa tulosten vertailua. Automaation rakentaminen kuitenkin vaatii enemmän mittaus tapausten pohjalta laadittavien testauskriptien ja - ympäristöjen valmistelua. Automaatio voi käyttää ohjelmistoa ohjelmistorobotiikan menetelmillä käyttöliittymän kautta ihmisten tavoin, tai mittaus voidaan toteuttaa ohjelmointirajapintojen avulla perinteisen yksikkö- tai integraatiotestauksen tapaan. Rajapintojen käyttö mahdollistaa yleensä tarkemman hallinnan ja paremman toistettavuuden, mutta ei ole aina mahdollista erityisesti suljetuissa järjestelmissä tai käyttöliittymäpainotteisissa sovelluksissa.

Tekoälypohjaisten työkalujen käyttöön liittyy kuitenkin erityisiä haasteita. Esimerkiksi suuret kielimallit eivät ole täysin deterministisiä, eli sama syöte ei välttämättä tuota aina täsmälleen samaa lopputulosta. Tekoälyä voidaan hyödyntää mittauksen suunnittelussa ilman, että se osallistuu varsinaiseen mittausprosessiin. Tällöin epädeterministisyys ei välttämättä vaikuta mittaustuloksiin samalla tavalla kuin jos tekoäly osallistuisi itse mittauksen suorittamiseen.

Testauskriptit pyritään yleensä pitämään mahdollisimman riippumattomina itse mittausjärjestelmästä. Käytännössä erityisesti automatisoitu mittaus kuitenkin edellyttää tarkkaa tietoa mittausajon alusta ja lopusta, jotta ohjelmiston suoritus voidaan tahdistaa

mittauksen kanssa. Tämä voi edellyttää ohjausviestien kommunikoimista mittausohjelmiston ja mitattavan järjestelmän välillä osana skriptiä. Tämä muistuttaa toteutusperiaatteeltaan ohjelmistojen lokiviestejä, joissa järjestelmän sisäisiä tapahtumia merkitään analysointia varten.

Mittausympäristö

Mittausympäristö vaikuttaa merkittävästi mittaustuloksiin. Ohjelmistoa voidaan mitata sen normaalissa käyttö- tai kehitysaikaisessa ympäristössä tai erityisessä mittauslaboratoriossa. Hallitussa laboratorioympäristössä pyritään tarkkuuden parantamiseksi eristämään yksittäisen toiminnon energiankulutus muusta järjestelmästä, mutta tulokset voivat olla vähemmän realistisia kuin ohjelmiston todellisessa käyttöympäristössä. Myös mittauslaitteet ja - ohjelmistot voidaan erottaa mitattavasta järjestelmästä, jotta ne vaikuttaisivat mahdollisimman vähän mittaustuloksiin. Erityisesti päätelaitteilla täydellinen eristäminen on usein mahdotonta, sillä käyttöjärjestelmä, taustaprosessit ja laitteiston omat energiansäästömekanismit vaikuttavat mittauksiin. Päinvastainen ongelma voi syntyä, jos laitteen normaalissa käyttöympäristössä sen



sähkönsyötön toteutus tai akkukäyttöisyys estää mittarien käyttämistä laitteen mittaamiseen.

Mittauksen tarkkuustaso eli granulariteetti voi vaihdella suuresti. Mittaus voidaan kohdistaa koko laitteeseen tai yksittäiseen komponenttiin, tiettyyn ohjelmiston toimintoon tai jopa yksittäisten koodirivien tasolle. Mitä hienojakoisempaa mittausta tavoitellaan, sitä vaikeammaksi sen toteuttaminen yleensä muuttuu.

Mittaustapausten rinnalla suunnitellaan mittausympäristön arkkitehtuuri. Tässä vaiheessa päätetään, millaisia mittareita, tietokoneita, verkkoratkaisuja ja muita laitteita mittauksessa käytetään. Samalla määritellään, mitä osia järjestelmästä halutaan mitata ja millä tarkkuudella. Arkkitehtuurista voidaan laatia kaavioesityksineen dokumentti, johon merkitään edellä kuvatut seikat mittauksen kannalta oleellisin yksityiskohdin. Dokumentoinnin merkitys korostuu, mikäli mittaus halutaan toistaa tai monistaa eri projekteihin, mittausta tehdään pitkällä aikavälillä tai halutaan validoida aiempi mittaus.

Fyysisten mittalaitteiden käyttö erottaa energianmittauksen monesta muusta ohjelmistotekniikan testausmenetelmästä. Mittaus voi edellyttää virtalähteiden ja mittarien asennustöitä, laitteiden konfigurointia tai erillisten tiedonsiirtokanavien rakentamista

mittausdatan keräämiseksi. Mittausympäristön toteutus muistuttaa joissain tapauksissa laboratoriojärjestelmän rakentamista.

Kokonaiskulutuksen kannalta myös oheislaitteilla voi olla merkitystä. Esimerkiksi monitorit, verkkolaitteet tai ulkoiset tallennusjärjestelmät voivat korostua järjestelmän energiankulutuksessa, vaikka niiden vaikutus voi unohtua pelkkään ohjelmistoon keskittyvässä tarkastelussa.

Koordinointi ja orkestrointi

Mittausjärjestely tarvitsee usein erillisiä ohjausskriptejä, joiden tehtävä on koordinoida koko mittausprosessia. Koordinointiin tyypillisesti kuuluu mittausympäristön valmistelu, mittausajojen suoritus, tulosdatan keräys ja yhteensovittaminen sekä mittauksen tulosten analysointi ja visualisointi.

Ohjausskriptien toteutus voi olla hyvin työlästä. Mittauslaitteet käyttävät erilaisia rajapintoja, tiedostomuotoja, mittayksiköitä ja tiedonsiirtoprotokollia, joiden yhteensovittaminen vaatii usein paljon käsityötä. Mittausjärjestelmän rakentaminen lieneekin ollut yksi keskeinen syy siihen, miksi ohjelmistojen energianmittaus ei ole



yleistynyt yhtä laajasti kuin esimerkiksi suorituskykytestaus tai automaattinen ohjelmistotestaus.

Viime vuosina tilanne on kuitenkin parantunut. Mittausjärjestelyjen hallintaan on kehitetty ohjelmistoja, jotka automatisoivat suuren osan mittausprosessista ja kokoavat eri mittalähteet yhtenäiseksi työkuluksi. Esimerkki tällaisesta työkalusta on Visiiri-projektissa kehitetty PowerGoblin, joka koordinoi monimutkaisen mittausjärjestelyn helpommin hallittavaksi kokonaisuudeksi. Vaikka itse mittausympäristö täytyy edelleen rakentaa tapauskohtaisesti, mittausjärjestelyn prosessimallia työkalut voivat vähentää merkittävästi järjestelyyn liittyvää manuaalista työtä.

Datan analysointi ja ympäristövaikutukset

Mittausprosessin lopputuloksena syntyy tyypillisesti suuria määriä aikasarjamuotoista mittausdataa. Data voi sisältää esimerkiksi energiankulutuksen, tehon, prosessorikuorman, muistinkäytön ja verkkoliikenteen mittauksia eri käyttötilanteissa.

Yksittäisten mittausten perusteella voidaan arvioida ohjelmiston energiankulutusta tietyissä käyttöskenaarioissa, mutta laajempien

ympäristövaikutusten arviointi edellyttää usein lisämalleja ja painotuksia. Käyttöskenaarioita voidaan esimerkiksi painottaa niiden yleisyyden perusteella: harvoin käytetty toiminto vaikuttaa kokonaiskulutukseen vähemmän kuin jatkuvasti käytössä oleva toiminto.

Kun mittaustuloksia yhdistetään tietoihin käyttäjämääristä, käyttöajoista ja sähkön tuotantotavoista, voidaan muodostaa arvio ohjelmiston kokonaisenergiankulutuksesta ja hiilijalanjäljestä. Käytännössä tällaiset arviot perustuvat usein mittausten, tilastollisten mallien ja asiantuntija-arvioiden yhdistämiseen, sillä koko globaalin ohjelmistojärjestelmän täydellinen suora mittaaminen on harvoin mahdollista.

Mittausjärjestelyn rakentaminen onkin tyypillisesti iteratiivista. Ensimmäiset mittaukset voivat paljastaa uusia merkittäviä käyttöskenaarioita, tarkentaa mittaustapauksia tai osoittaa puutteita mittausjärjestelyssä. Tämän vuoksi mittausjärjestelmää kehitetään usein vaiheittain samalla tavoin kuin muitakin ohjelmistotekniikan testaus- ja analysointimenetelmiä.



7.3. Mittalaitteet ja -ohjelmistot

Ohjelmistojen energiankulutuksen mittaamiseen on käytettävissä hyvin erilaisia mittalaitteita ja -ohjelmistoja. Mittaus voidaan tehdä suoraan fyysisillä tai sisäänrakennetuilla ohjelmistopohjaisilla mittareilla tai epäsuorasti laskennallisten mallien avulla. Mittaustapa valitaan sen mukaan, millaista järjestelmää mitataan, kuinka tarkkaa tietoa tarvitaan ja millaisessa ympäristössä mittaus tehdään.

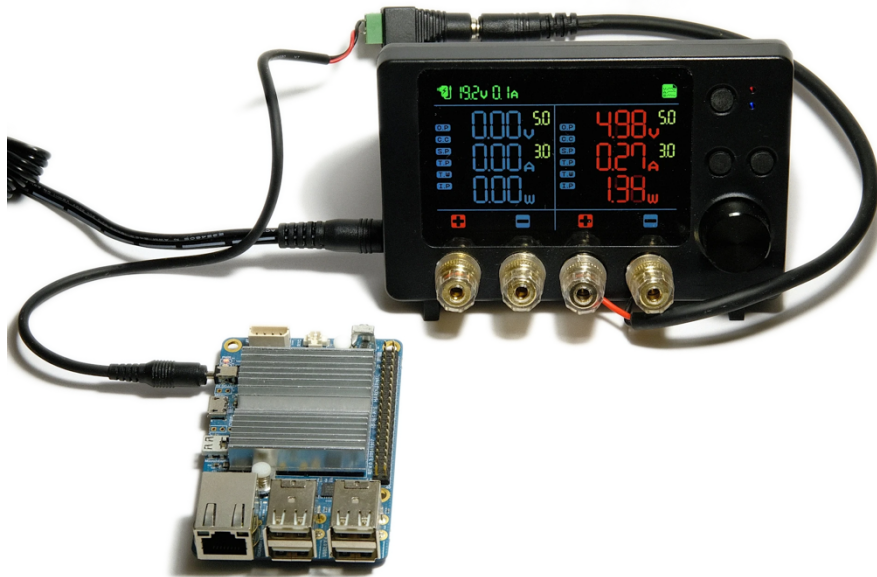
Fyysiset mittarit tarjoavat yleensä tarkimman tavan mitata energiankulutusta, mutta niiden käyttö voi olla työlästä tai jopa mahdotonta esimerkiksi suljetuissa datakeskusympäristöissä. Sisäänrakennetut ohjelmistopohjaiset mittarit puolestaan mahdollistavat käytännöllisen mittaamisen ilman erillistä laitteistoa, mutta niiden näkyvyys rajoittuu usein vain tiettyihin komponentteihin. Laskennalliset mallit taas mahdollistavat kulutuksen arvioinnin myös tilanteissa, joissa suoraa mittaamista ei voida tehdä.

Fyysiset mittarit

Fyysiset energiamittarit voidaan jakaa karkeasti vaihto- (AC) ja tasavirtapohjaisiin (DC) mittareihin. AC-mittarit mittaavat tyypillisesti

verkkovirtaan liitettyjen laitteiden kokonaiskulutusta, kun taas DC-mittareita käytetään esimerkiksi mobiililaitteiden, sulautettujen järjestelmien ja yksittäisten komponenttien mittaamiseen. Mittarit mittaavat tyypillisesti jännitettä, virtaa, tehoa ja energiaa. Osa laitteista on ohjelmoitavia, mikä mahdollistaa mittauksien ohjelmallisen ohjaamisen esimerkiksi käynnistämällä tai sammuttamalla laitteita tarkasti ajoitettuna.

Yksinkertaisimmillaan mittari sijoitetaan sähköverkon ja mitattavan laitteen väliin. Osa mittareista, kuten pihtivirtamittarit, mahdollistavat mittaamisen ilman että järjestelmää tarvitsee sammuttaa johto irrottamalla. Tällaiset ratkaisut soveltuvat erityisesti ympäristöihin, joissa mittaus ei saa keskeyttää normaalia toimintaa.



Smart Power 3 -mittavirtalähde.

Toinen yleinen mittarityyppi on mittaava virtalähde eli mittavirtalähde. Tällaiset laitteet eivät ainoastaan mittaa energiankulutusta, vaan myös syöttävät virran mitattavalle järjestelmälle. Laboratoriovirtalähteet kuuluvat usein tähän ryhmään. Mittaavat virtalähteet tarjoavat yleensä

hyvän tarkkuuden ja mahdollisuuden hallita mittaustilannetta tarkasti, mutta niiden hinta voi olla korkea erityisesti suurilla tai useilla järjestelmillä mitattaessa.

Kolmas yleinen lähestymistapa on käyttää erillisiä mittaosamoduuleja, jotka sijoitetaan virtalähteen ja mitattavan laitteen väliin. Tällaisia ratkaisuja käytetään esimerkiksi USB-laitteiden mittaamiseen. Moduulit voivat olla valmiita kaupallisia tuotteita tai yksittäisistä elektroniikkakomponenteista. Mittarien toimintaperiaatteet perustuvat erilaisiin fysikaalisiin ilmiöihin. Laajasti käytettyjä teknologioita ovat esimerkiksi shunttivastukset ja Hall-anturit. Käytännön mittaustyössä teknologioiden yksityiskohtainen tuntemus ei yleensä ole välttämätöntä, ellei mittaajajärjestelmää rakenneta itse komponenteista.

Mittarien hintataso vaihtelee huomattavasti. Edulliset kuluttajatasoisen mittarit voivat maksaa vain muutamia euroja, kun taas laboratorioikäyttöön tarkoitettujen tarkkuusmittarit voivat maksaa satoja tai tuhansia euroja kantaan kohden. Erityisen tarkkaan käyttöön on saatavilla myös kalibroituja mittalaitteita. Edullisissa mittareissa mittaustarkkuus voi olla useita prosentteja, mikä voi vaikeuttaa pienten kulutuserojen havaitsemista.



Ohjelmistopohjaiset mittarit

Monissa moderneissa tietokoneissa ja järjestelmäpiireissä on sisäänrakennettuja mittareita, joiden tietoja voidaan lukea ohjelmallisesti. Näiden avulla voidaan arvioida esimerkiksi prosessorin, muistin, näytönohjaimen tai muiden komponenttien energiankulutusta ilman ulkoisia mittalaitteita. Mittarit ilmoittavat kulutuksen usein teho- ja energiayksiköitä käyttäen. Jännitteet voidaan myös ilmoittaa tai niiden kokoluokka tunnetaan. Tunnettu esimerkki on Running Average Power Limit (RAPL), joka tarjoaa suhteellisen tarkkaa tietoa erityisesti prosessorin ja muistin energiankulutuksesta. Näytönohjaimilla ja palvelinlaitteilla on vastaavia rajapintoja.

Ohjelmistopohjaisten mittarien etuna on niiden helppo käyttöönotto ja hyvä integroitavuus ohjelmistokehityksen työnkulkuihin. Mittaaminen voidaan automatisoida osaksi testaus- ja jatkuvan integraation ympäristöjä ilman erillistä mittauslaitteistoa. Tämä on erityisen tärkeää datakeskus- ja pilviympäristöissä, joissa fyysisten mittalaitteiden asentaminen ei välttämättä ole mahdollista tietoturvan, kustannusten tai infrastruktuurin hallinnan vuoksi.

Sisäänrakennettujen mittarien rajoituksena on kuitenkin se, että niiden näkyvyys järjestelmään voi olla rajallinen. Mittarit eivät välttämättä kata kaikkia komponentteja, ja osa mittauksista perustuu valmistajien omiin laskennallisiin arvioihin eikä suoraan fyysiseen mittaukseen. Lisäksi eri valmistajien toteutukset voivat poiketa merkittävästi toisistaan. Joissakin tietokoneiden virtalähteissä on myös sisäänrakennettu energianmittaus, mutta niitä ei yleensä ole suunniteltu ohjelmistojen tarkkaan energianmittaamiseen. Ne soveltuvat paremmin järjestelmän karkean kokonaiskulutuksen seurantaan.

Laskennalliset mallit ja epäsuora mittaaminen

Energiankulutusta voidaan arvioida myös ilman varsinaista mittarilaitetta. Ohjelmiston lähdekoodin staattinen analyysi pyrkii tunnistamaan energiankulutukseen vaikuttavia rakenteita ilman ohjelman suorittamista. Tällaiset menetelmät voivat auttaa arvioimaan ohjelmiston laatua tai tunnistamaan mahdollisia ongelmakohtia, mutta todellisen energiankulutuksen ennustaminen näin on vaikeaa.

Toinen yleinen lähestymistapa perustuu resurssikulutuksen mittaamiseen. Esimerkiksi prosessorin käyttöaste, suoritusaika,



levyoperaatiot ja verkkoliikenne korreloivat usein energiankulutuksen kanssa. Näiden suureiden ja mitatun energiankulutuksen välille voidaan rakentaa energiankulutuksen arviointiin laskentamalleja, jotka toimivat myös ympäristöissä, joissa ei ole energianmittausta.

Mallit voivat antaa varsin käyttökelpoisia arvioita etenkin laskentapainotteisissa sovelluksissa, joissa energiankulutus riippuu voimakkaasti prosessorin käyttöasteesta. Kaikki energiankulutus ei kuitenkaan synny suorasta laskennasta; myös muisti, tallennusmediat, näytöt, verkko- ja muu infrastruktuuri vaikuttavat kokonaiskulutukseen. Käytännössä energiankulutuksen määrittäminen voi perustua eri menetelmien yhdistämiseen. Fyysisillä mittareilla tuotetaan referenssidata, ohjelmistopohjaiset mittarit mahdollistavat jatkuvan seurannan ja laskennalliset mallit auttavat arvioimaan kulutusta tilanteissa, joissa suora mittaaminen ei ole mahdollista.

7.4. Mittausjärjestelyn toteutus

Energiankulutuksen mittaus voidaan toteuttaa hyvin monella tavalla riippuen siitä, millaista ohjelmistoa mitataan ja missä ympäristössä se toimii. Mittausjärjestelyn suunnittelu kannattaa aloittaa muutamista

peruskysymyksistä, jotka vaikuttavat sekä mittausmenetelmän että käytettävien työkalujen valintaan.

Ensimmäinen keskeinen kysymys on, mille alustalle mitattava ohjelmisto on tarkoitettu. Työpöytäsovellukset, mobiiliohjelmit, palvelinjärjestelmät ja sulautetut laitteet vaativat usein erilaisia mittareita ja erilaisia mittausjärjestelyjä. Kaikki mittarit eivät sovellu kaikkiin ympäristöihin, eikä kaikkia laitteita voida mitata samalla tarkkuudella.

Toinen tärkeä kysymys liittyy järjestelmän rakenteeseen. Moni moderni ohjelmisto koostuu useista erillisistä prosesseista tai verkon yli kommunikoivista osista. Tällöin on päätettävä, mitataanko esimerkiksi käyttäjän päätelaitetta, palvelinpuolen backend-järjestelmää vai koko järjestelmää yhdessä. Samalla on ratkaistava, mikä järjestelmän osa toimii mittauksen aktiivisena koordinoijana.

Kolmas käytännön kysymys liittyy ohjelmiston riippuvuuksiin ja asennusympäristöön. Jos ohjelmiston käynnistäminen vaatii monimutkaisen ympäristön tai suuren määrän riippuvuuksia, mittauksen toteutus voi helpottua merkittävästi konttitekniikoiden avulla.

Mittausten yleinen rakenne

Mittausjärjestelyt noudattavat yleensä samankaltaista perusrakennetta riippumatta siitä, mitä ohjelmistoa mitataan.

Ensimmäisessä vaiheessa valmistellaan mittausympäristö. Valmistelu tyypillisesti sisältää mittarien, mitattavien laitteiden, verkon ja ohjelmistojen konfiguroinnin. Testidatan valmistelu kuuluu myös tähän vaiheeseen, sillä käsiteltävät datamäärät voivat olla suuria. Valmistelut voidaan tehdä manuaalisesti tai automatisoida skripteillä. Koska ne tehdään ennen varsinaista mittausajoa, niillä ei yleensä ole suoraa vaikutusta mitaustuloksiin.

Tämän jälkeen alustetaan mittausohjelmisto ja mitattavat järjestelmät. Käytännössä mittaus voidaan yksinkertaistaa siten, että yksi järjestelmän osa toimii aktiivisena mittauksen koordinoijana. Tämä laite tai ohjelmoproessi käynnistää mittaukset ja hallitsee testiskriptejä. Mittausohjelmisto toteuttaa mittausdatan keräyksen ja käsittelyn koordinoijan ohjeiden mukaisesti. Muut järjestelmään kuuluvat laitteet voivat osallistua normaaliin toimintaan ilman, että niiden tarvitsee olla tietoisia mittausprosessista. Esimerkiksi web-palvelun tapauksessa taustapalvelu ja tietokanta voivat toimia

normaalisti samalla kun ulkoinen skripti ohjaa mittausprosessia selaimen sijaan.

Mittaukset toistetaan yleensä useita kertoja tulosten vertailukelpoisuuden parantamiseksi. Yhden mittausistunnon aikana voidaan suorittaa useita erilaisia mittauksia ilman, että koko ympäristöä tarvitsee rakentaa uudelleen. Lopuksi mittausohjelmisto käsittelee, visualisoi ja raportoi tulokset.

Modernit mittausjärjestelyt voivat olla myös hajautettuja: yksi mittaus voidaan suorittaa kontissa, toinen selainautomaatiolla ja kolmas mobiililaitteella. Mittausohjelmisto mahdollistaa tällaisten hajautettujen mittauksien koordinoinnin verkon yli ohjelmointirajapintojen avulla.

Skriptiveton mittaus

Yksinkertaisin mitattava ohjelmistotyyppi on komentoriviohjelma. Tällaisessa tapauksessa mittaus voidaan toteuttaa suoraviivaisella skriptillä, joka koordinoi mittausistunnon ja -ajot sekä suorittaa mitattavan ohjelman. Jokaiselle mitattavalle toiminnolle määritellään oma mittauksena. Skripti kommunikoi mittausohjelmiston kanssa

ennen suoritusta ja sen jälkeen, jonka pohjalta aikaleimoin merkitty mittausdata voidaan yhdistää oikeaan mittausajoon.

Mikäli skripti ja/tai mitattava ohjelma tarvitsevat monimutkaista käyttöympäristöä, voi mittaus olla perusteltua eristää konttitekniologioilla. Vastaavasti jos mitattava ohjelma on jo eristetty konttiin, voi myös mittauskripti olla tarpeen tuoda kontin sisään järjestelyn yksinkertaistamiseksi.

Konttipohjainen mittaus

Konttitekniologiat mahdollistavat sovellusten suorittamisen eristetyssä ympäristössä. Kontit sisältävät ohjelmiston tarvitsemat ohjelmistokomponentit ja ympäristömääritykset erillään muista konteista ja isäntäjärjestelmästä, mikä helpottaa yksittäisen palvelun ja erityisesti palvelukokonaisuuksien käyttöä.

Sama mittaus voidaan suorittaa useissa ympäristöissä samalla ohjelmistokokoonpanolla ilman, että käyttöjärjestelmän tai asennusten erot vaikuttavat tuloksiin merkittävästi. Tämä helpottaa mittauksen toistettavuuden ohella myös mittausjärjestelyjen jakamista organisaatioiden välillä. Konttien käynnistys ja sammutus pyritään

yleensä pitämään mittausajojen ulkopuolella, koska ne voivat olla suhteellisen raskaita operaatioita, eivätkä useinkaan ole osa ohjelmiston normaalia käyttötappaa.

Backend-palveluiden mittaus

Backend-palveluiden mittaaminen voidaan toteuttaa usealla tavalla. Yksinkertaisimmillaan palvelua käsitellään "mustana laatikkona", jolloin ulkopuolinen skripti lähettää palvelulle pyyntöjä analysoimatta palvelun sisäistä toimintaa. Tämä voi olla ainoa mahdollinen lähestymistapa esimerkiksi suljetun lähdekoodin tai pilvipalvelupohjaisissa järjestelmissä. Toinen tapa on integroida mittauksen koordinointi osaksi palvelun ohjelmakoodia. Tällöin mittauksen alku- ja loppumerkinnot voidaan sijoittaa esimerkiksi suoraan web-palvelun rajapintakutsujen toteutuksen ympärille. Näin mittaus voidaan kohdistaa tarkemmin juuri tietyn toiminnon suorittamiseen.

Mitattava palvelu käynnistetään yleensä ennen mittauksia, minkä jälkeen mittausajojen aikana suoritetaan yksittäisiä pyyntöjä tai käyttöskenaarioita. Haluttaessa voidaan mitata myös palvelun käynnistymistä tai ensimmäisen pyynnön käsittelyä.

Käyttöliittymien mittaaminen ohjelmistorobotiikalla

Graafisten käyttöliittymien mittauksessa voidaan käyttää ohjelmistorobotiikkaa, jolla käyttöliittymän toiminnot voidaan suorittaa automatisoidusti ja toistettavasti samalla tavalla kuin ihmiskäyttäjän ohjaamana. Yksi tunnetuimpia ohjelmistorobotiikan työkaluista on Selenium, jolla voidaan rakentaa toistettavia mittauskenaarioita web-sovellusten energiankulutuksen arvioimiseksi. Selenium-istunto ja sen ohjaama selain tyypillisesti joko pidetään käynnissä koko mittausistunnon ajan tai siirretään yksittäisten mittausajojen ulkopuolelle, koska istunnon alustaminen on verrattain raskas operaatio verrattuna yksittäisiin sivulatauksiin ja erityisesti yksittäisiin toimintoihin jo ladatulla sivustolla.

Mobiililaitteiden mittaaminen vaatii usein erityisjärjestelyjä. Sovelluksen automatisointi voi perustua esimerkiksi käyttöliittymäautomaatioon, ohjelmallisiin rajapintoihin tai sovellukseen lisättyihin ohjausmekanismeihin. Joissakin tapauksissa mittauksen koordinointi voidaan toteuttaa esimerkiksi asiakaspuolen koodilla, joka viestii mittausohjelmiston kanssa verkkoyhteyden yli.

PowerGoblin: mittausjärjestelyn koordinointityökalu

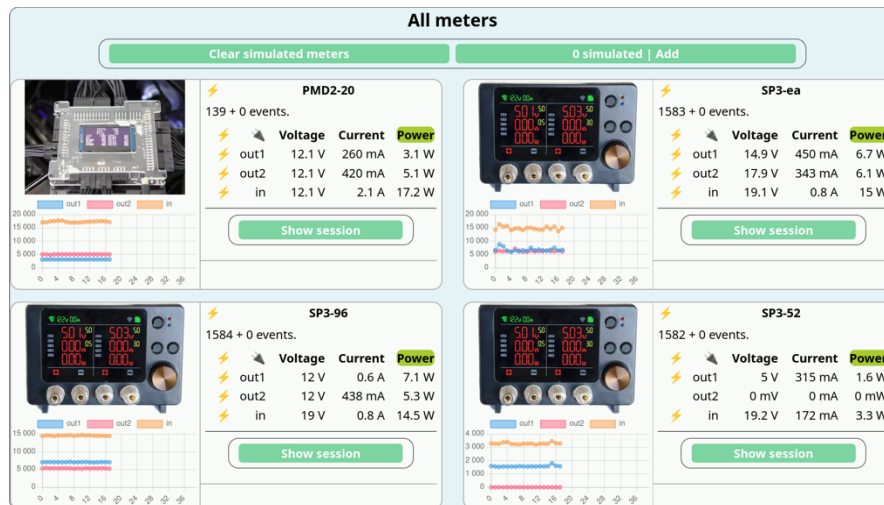
PowerGoblin on osana Visiiri-hanketta kehitetty avoimen lähdekoodin työkalu, jolla voidaan koordinoita energianmittausta, hallita mittareita ja laitteita, kerätä resurssidataa sekä analysoida ja visualisoida mittautuloksia. Mittausta koordinoidaan verkkopohjaisen protokollan kautta, mikä mahdollistaa mittadatan keräämisen eri laitteista käsin, mutta myös palvelurajapinnan mittauksen järjestämiseen siten, että mittaus on lopulta mittauskriptin hallittavissa. Työkalun hajautettu arkkitehtuuri skaalautuu monimutkaistenkin mittausjärjestelyjen toteutuksiin.

PowerGoblinin keskeiset konseptit mittauksen järjestämisen kannalta ovat mittausistunto, joka käsittää yhden tai useamman mittautapausta vastaavan mittauksen. Mittaus voidaan suorittaa useita kertoja mittausajoina, joiden tarkoitus on mahdollistaa tilastollinen analyysi ja tulosten vertailu. Tyypillisesti sama toiminto suoritetaan identtisesti useita kertoja mittautulosten vaihtelun arvioimiseksi. Mittauksen aikana syntyvä data tallennetaan aikaleimattuina tapahtumina, joita ovat esimerkiksi mittarien lukemat, resurssinkäyttödata sekä mittauksen ja mittausajojen aloitukset ja

lopetukset. Istunnon sulkemisen jälkeen raakadata käsitellään ja laaditaan visualisaatioiden kera mittausraportiksi.

Datan analysoinnissa voidaan käyttää tilastollisia menetelmiä ja visualisaatioita. Tilastollinen analyysi auttaa arvioimaan esimerkiksi mittauksen vaihtelua, keskiarvoja ja tulosten luotettavuutta. Mittaustyökalut tarjoavat myös automaattisia analyysiominaisuuksia ja visualisointeja helpottamaan tulosten tulkintaa.

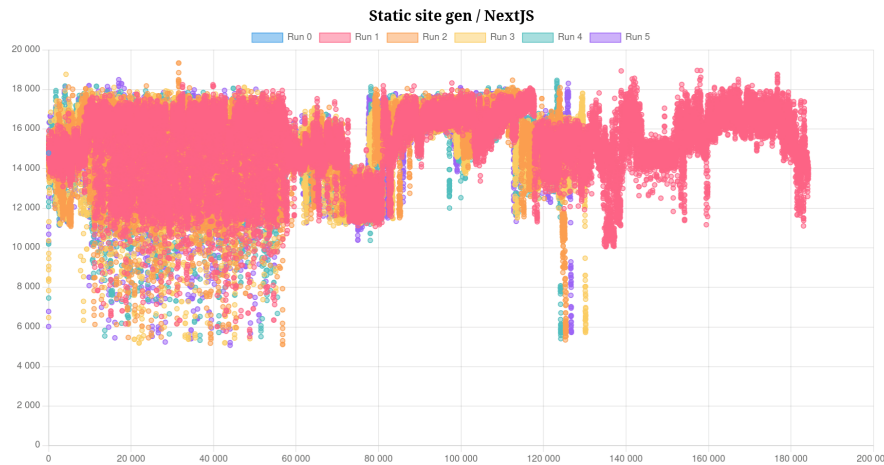
Energian ohella toinen tavanomainen mitattu suure on tehonkulutus ajan funktiona. Tuloksena syntyy käytännössä aikasarjadataa, jonka pistekaaviosta voidaan tunnistaa järjestelmän eri toimintavaiheita. Riittävän tarkalla mittarilla yksittäiset laskenta- ja levyoperaatiot, verkkoliikenne tai käyttöliittymän piirto voivat näkyä selvästi erottuvina kulutuspiikkeinä. Mittarin näytteenottotaajuus, tarkkuus ja mittaus tapa vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka yksityiskohtaista analyysiä voidaan tehdä.



PowerGoblinin mittarinäkymä

Mittausdatan analysointi

Mittausohjelmiston keräämä aikaleimallinen raakadata mittarien, resurssien kulutuksen ja mittauksen ohjauksen tapahtumista muodostaa perustan ohjelmiston energiankulutuksen analysoinnille.



Viiden mittausajon tehonkulutuksen pistekaavio.

Tehoarvoilla on myös epäsuoria vaikutuksia energiankulutuksen näkökulmasta. Järjestelmän hetkellinen maksimiteho vaikuttaa esimerkiksi laitteiston mitoitukseen, jäähtytykseen ja virransyötön suunnitteluun. Toisaalta modernit tietokonejärjestelmät pyrkivät siirtymään automaattisesti erilaisiin energiansäästötiloihin silloin, kun ohjelmistolla ei ole aktiivista kuormaa. Tämän vuoksi myös tyhjäkäynnin aikainen kulutus ja siirtymien nopeus ovat olennaisia analysoitavia ominaisuuksia.

Mittausdatasta voidaan laskea useita tilastollisia tunnuslukuja. Koska mittaukset toistetaan useita kertoja, voidaan arvioida myös mittausten luotettavuutta ja järjestelmän deterministisyyttä. Mikäli saman toiminnon energiankulutus vaihtelee merkittävästi mittausajojen välillä, voidaan järjestelmässä todeta olevan kuormitukseen, ajoitukseen tai resurssienhallintaan liittyviä epädeterministisiä tekijöitä.

Usein analyysissä mitataan myös erillinen baseline-tapaus eli järjestelmän tyhjäkäyntikulutus. Tämän avulla voidaan arvioida, kuinka suuri osa kokonaiskulutuksesta aiheutuu varsinaisesta ohjelmiston suorittamasta työstä. Erotus aktiivisen ja tyhjäkäyntitilan välillä antaa karkean arvion ohjelmiston aiheuttamasta lisäkuormasta.

Tuloksiin vaikuttavat monet mittausympäristön ominaisuudet, kuten mittarien tarkkuus, kalibrointi, taustakuorma ja käytetty laitteisto. Siksi absoluuttiset energiankulutusluvut eivät yleensä ole täysin yleistettäviä eri ympäristöihin. Käytännössä ohjelmistokehityksessä kiinnostavampia ovat usein suhteelliset erot eri toteutusten välillä, esimerkiksi algoritmien, ohjelmointikielten tai kirjastojen energiankulutuksessa. Vastaavasti pilvilaskentaa käyttävän järjestelmän suora mittaaminen on harvoin mahdollista. Modernit ohjelmistojärjestelmät ovat hajautettuja, globaaleja ja jatkuvasti muuttuvia. Energiankulutuksen ja ympäristövaikutusten arvioinnissa joudutaan usein yhdistämään



mittauksia, tilastollista analyysiä ja erilaisia laskennallisia malleja. Haluttu lopullinen tarkkuustaso on kompromissi tarkkuuden ja työn käytännöllisten seikkojen, kuten kustannuksen ja ajankäytön, välillä.

Mittausdatan perusteella voidaan myös arvioida ohjelmiston hiilijalanjälkeä (CO₂-ekvivalenssi, vuosittainen energiankulutus) yhdistämällä energiankulutus sähkön tuotantotapoihin, käyttöasteeseen ja infrastruktuuriin liittyviin tietoihin. Tällaiset arviot ovat hyödyllisiä esimerkiksi datakeskusten optimoinnissa ja suurten järjestelmien ympäristövaikutusten arvioinnissa.

Energiankulutuksen analysoinnissa voidaan yhdistää kaksi näkökulmaa: alhaalta-ylös-lähestymistapa tarkastelee yksittäisiä ohjelmistokomponentteja ja optimointeja, kun taas ylhäältä-alas-lähestymistapa arvioi koko järjestelmän ympäristövaikutuksia. Systemaattinen mittausdata auttaa tunnistamaan energiankulutukseen vaikuttavia ratkaisuja ja tekemään energiankäytöstä näkyvän osan ohjelmistokehitystä.

Lisätietoja:

Fyysiset, ohjelmistopohjaiset ja ennakoivat mittarit

Visiiri-portaali (Turun yliopisto)

<https://visiiri.tt.utu.fi/>

Khan, K. N., Hirki, M., Niemi, T., Nurminen, J. K., & Ou, Z. (2018). RAPL in Action: Experiences in Using RAPL for Power Measurements. ACM Transactions on Modeling and Performance Evaluation of Computing Systems, 3(2), Article 9.

<https://researchportal.helsinki.fi/en/publications/rapl-in-action-experiences-in-using-rapl-for-power-measurements/>

Fahad, Muhammad, et al. "A comparative study of methods for measurement of energy of computing." Energies 12.11 (2019): 2204.

<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/11/2204>

Energy measurement, modeling, and prediction for processors with frequency scaling (2014). https://www.tu-chemnitz.de/informatik/PI/forschung/publikationen/download/RRSMX_sc14.pdf



Performance and power modeling in a multi-programmed multi-core environment (2010) <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1837274.1837479>

Can we trust our energy measurements? A study on the Odroid-XU4 (2022). <https://arxiv.org/abs/2206.10377>

Ohjelmistokehitys ja prosessit

Guldner, Achim, et al. "Development and evaluation of a reference measurement model for assessing the resource and energy efficiency of software products and components—Green Software Measurement Model (GSMM)." Future Generation Computer Systems 155 (2024): 402-418.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X24000384>

Ailane, Mohamed Toufik, Carolin Rubner, and Andreas Rausch. "Green DevOps: A Strategic Framework for Sustainable Software Development." Computer Sciences & Mathematics Forum. Vol. 10. No. 1. MDPI, 2025. <https://www.mdpi.com/2813-0324/10/1/5>

PPTAM : Energy Aware CI/CD Pipeline for Container Based Applications. <https://arxiv.org/abs/2602.12081>

CO2 laskurit

Software Carbon Intensity (SCI) Specification

<https://sci.greensoftware.foundation/>

<https://www.websitecarbon.com/>

<https://www.openco2.net/en/co2-converter/>

<https://aws.amazon.com/sustainability/tools/console/>

7.5. Ohjelmistojen kestävyysvaikutukset

Kestävyysulottuvuudet

Kestävää kehitystä tarkastellaan usein Brundtlandin raportin [1] määrittelemien taloudellisen, sosiaalisen ja ekologisen näkökulmien kautta. Kestäviin ohjelmistoihin (ja kestävään ohjelmistotekniikkaan) keskittyvä Sustainability Design Alliance määrittelee näiden lisäksi yksilöllisen (Human sustainability,[2]) ja teknisen näkökulman (Technical sustainability,[3]). Seuraavassa taulukossa on kuvattu nämä ulottuvuudet ohjelmistojen näkökulmasta.

Ulottuvuus	Määritelmä	Ohjelmistoesimerkki
Ympäristö (ekologinen)	Ympäristöulottuvuus käsittelee luonnonvarojen käyttöä ja vastuullista hoitoa. Se sisältää kysymyksiä aina välittömästä jätteen tuotannosta ja energiankulutuksesta ilmastonmuutokseen liittyviin huolenaiheisiin.	Ohjelmistoratkaisujen energiankulutus, esim. AI:n vaatima laskenta
Taloudellinen	Taloudellinen ulottuvuus käsittelee rahoituksellisia näkökulmia ja	Ohjelmistoratkaisujen kustannustehokkuus

	liiketoiminnan arvoa. Se sisältää pääoman kasvun ja maksuvalmiuden, investointeihin liittyvät kysymykset sekä taloudelliset toiminnot.	asiakkaille ja tuottajille, esim. Apotti
Sosiaalinen	Sosiaalinen ulottuvuus käsittelee yksilöiden ja ryhmien välisiä suhteita. Esimerkiksi tämä näkökulma kattaa vastavuoroisen luottamuksen ja viestinnän rakenteet sosiaalisessa järjestelmässä.	Ohjelmistoratkaisujen vaikutukset yhteiskuntaan, esim. AirBnB
Yksilöllinen	Yksilöllinen ulottuvuus käsittelee yksilön vapautta ja toimijuutta (kykyä toimia ympäristössä), ihmisarvoa ja itsensä toteuttamista. Se sisältää yksilöiden mahdollisuuden menestyä, käyttää oikeuksiaan ja kehittyä vapaasti.	Yksilön hyvinvointi, esim. terveyssovellukset
Tekninen	Tekninen ulottuvuus käsittelee keinotekoisien järjestelmien (kuten ohjelmistojen) ylläpitämisen ja kehittämisen kykyä ajan myötä. Se viittaa ylläpitoon ja kehitykseen, resilienssiin sekä järjestelmämuutosten helppouteen.	Järjestelmien kyky kehittyä muuttuvien olosuhteiden ja vaatimusten mukaisesti, esim. käyttöjärjestelmät



Ohjelmistojen vaikutuksia arvioitaessa on tärkeää määritellä, mitä ulottuvuutta halutaan tarkastella, sillä ulottuvuuksiin liittyviä vaikutuksia mitataan hyvinkin eri tavoin. Esimerkiksi sosiaalista tasa-arvoisuutta mitataan hyvinkin eri tavalla kuin vaikkapa datakeskuksen vedenkulutusta.

Esimerkki ohjelmistojen vaikutuksista – Airbnb

Havainnollistetaan seuraavaksi ohjelmistojen tiedostettuja ja tiedostamattomia (kestävyys)vaikutuksia Airbnb-sovelluksen kautta. Airbnb on kansainvälinen alusta ja sovellus, joka yhdistää majoitusta tarjoavat ihmiset matkailijoihin. Se mahdollistaa yksityisten asuntojen, huoneiden tai elämysten lyhytaikaisen vuokraamisen. Airbnb hoitaa varausprosessin, maksuliikenteen ja tarjoaa turvaa sekä majoittajille että vieraille. Lähtökohtaisesti Airbnb:llä on esim. seuraavia vaikutuksia:

- Vapaana olevan asunnon vuokraaminen (taloudellinen)
- Autenttinen asumiskokemus (sosiaalinen)
- Turhan hotellikapasiteetin karsinta (ekologinen)

Airbnb:n laajempia vaikutuksia on tutkittu myös näiden lisäksi esim. Wachsmuthin ja Weislerin artikkelissa. "Airbnb and the rent gap: Gentrification through the sharing economy". Artikkelissa tutkittiin

Airbnb-palvelun taloudellisia ja sosiaalisia vaikutuksia. Asuntojen omistajille Airbnb tuo pitkäkestoista vuokraustoimintaa suuremmat tuotot poistaen vuokra-asuntoja markkinoilta ja siten nostaa pitkäaikaisen vuokrauksen kuluja. Kärjistäen voisi sanoa, että alueen asukkaat maksavat matkailijoiden hotelleja halvemmalla majoitukset. Tämä on noussut suureksi puheenaiheeksi mm. Rovaniemellä, jossa talvinen matkailusezonki on sekoittanut vuokramarkkinat. Airbnb myös keskiluokkaistaa (gentrification) alueita ja saattaa vaikuttaa epätasa-arvon lisääntymiseen.

Ohjelmistojen suunniteltaessa onkin hyvä kartoittaa mahdollisia kestävyysvaikutuksia, jotta tällaisilta suunnittelemattomilta yllätyksiltä vältyttäisiin.

Ymmärryksen lisääminen SusAF -kehiksen avulla

SusAF - Sustainability Awareness Framework - on Sustainability Design Alliance'n luoma lähestymistapa ohjelmiston, palvelun tai järjestelmien mahdollisten kestävyysvaikutusten tunnistamiseen jo suunnitteluvaiheessa. SusAF on kysymyspohjainen lähestymistapa, joka pyrkii löytämään mahdollisia vaikutuksia kysymysten avulla. Kysymykset itsessään pyrkivät laajentamaan ajattelua normaalin



ajattelun ulkopuolelle. SusAF kattaa kaikki yllä esitetyt ulottuvuudet ja tarjoaa kysymyksiä viiteen eri aihepiiriin kussakin ulottuvuudessa oheisen taulukon mukaisesti. Luonnollisesti muitakin aihepiirejä voisi olla eri ulottuvuuksissa.

Ulottuvuus	Aihepiirit
Ympäristö (ekologinen)	Materiaalit ja resurssit (material and resources), maaperä ja vesi (soil and water), energia (energy), biodiversiteetti (biodiversity), logistiikka (logistics)
Taloudellinen	Arvo (value), asiakkuudenhallinta (CRM), toimitusketju (supply chain), hallinto (governance), innovaatio (innovation)
Sosiaalinen	Yhteisöllisyyden tunne (sense of community), luottamus (trust), osallisuus ja monimuotoisuus (inclusiveness), tasa-arvo (equity), osallistuminen (participation)
Yksilöllinen	Terveys (health), elinikäinen oppiminen (life-long learning), yksityisyys (privacy), turvallisuus (safety), toimijuus (agency)
Tekninen	Ylläpidettävyyys (maintainability), käytettävyyys (usability), mukautuvuus (adaptability), turvallisuus (security), skaalautuvuus (scalability)

Aihepiirit koostuvat yhdestä tai useammasta kysymyksestä, joiden tarkoitus on saada pohtimaan ohjelmiston (tai palvelun tai järjestelmän) mahdollisia vaikutuksia. Oheissa esimerkit kahdesta sosiaaliseen ulottuvuuteen liittyvästä aihepiiristä.

Luottamus tarkoittaa vahvaa uskoa jonkun tai jonkin luotettavuuteen, totuudenmukaisuuteen tai kyvykkyyteen.

Miten tuote tai palvelu voi muuttaa käyttäjien ja järjestelmän omistavan yrityksen välistä luottamusta?

Osallisuus ja monimuotoisuus viittaavat sellaisten ihmisten mukaan ottamiseen, jotka muuten saattaisivat jäädä ulkopuolelle tai tulla syrjäytetyiksi.

Miten tuote tai palvelu voi vaikuttaa siihen, miten ihmiset näkevät muut ihmiset?

Millaisia vaikutuksia sillä voi olla käyttäjiin, joilla on erilainen tausta, ikäryhmä, koulutustaso tai muita eroavaisuuksia?

Kun vaikutuksia pohditaan, on hyvä pyrkiä sitomaan ne tarkasteltavan ohjelmiston, palvelun tai järjestelmän toimintoihin. Esimerkiksi Airbnb:n kohdalla tämä tarkoittaa vaikkapa yksityisen asiakkaan huoneen vuokraamista järjestelmän kautta. Mahdolliset vaikutukset



voivat olla positiivisia tai negatiivisia, kuten alla esitetystä kuvassa on Airbnb-esimerkki. Tyypillisesti erilaisia ohjelmistoja, palveluita ja järjestelmiä tarkasteltaessa pyritään löytämään vain positiivisia vaikutuksia, mutta on erittäin tärkeää pohtia myös negatiivisia vaikutuksia, kuten aiemmin esitetty Airbnb-esimerkki osoittaa.

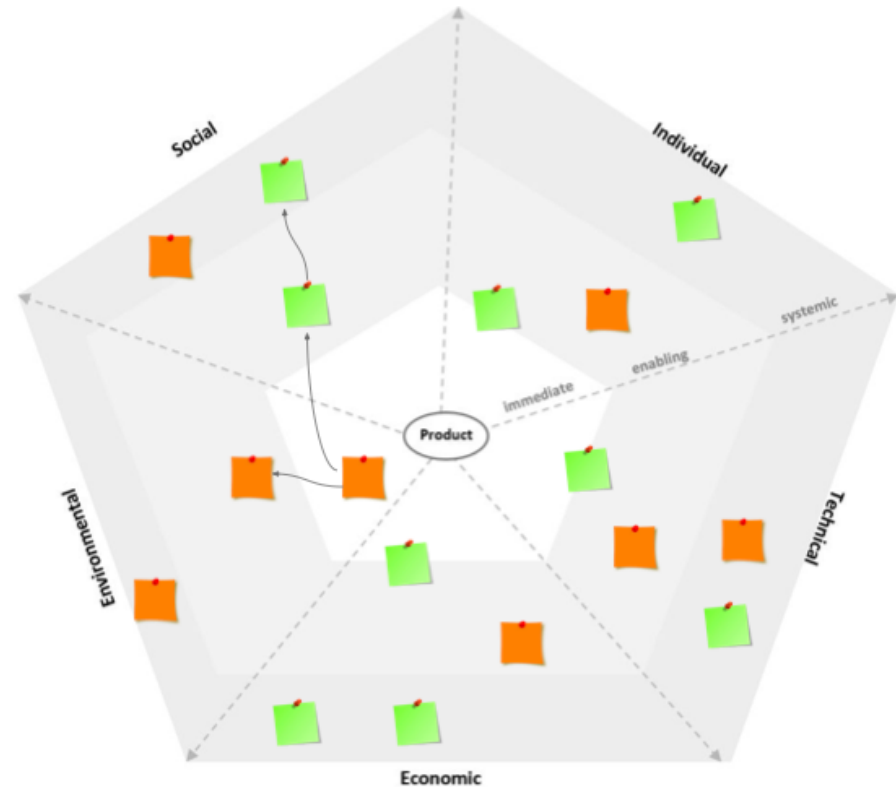
SusAF:n tarkastelua tehtäessä ja kysymyksiin vastauksia pohdittaessa löydetään useita mahdollisia vaikutuksia. Kaikki näistä vaikutuksista eivät kuitenkaan ole yhtä tärkeitä. Vaikutukset eroavat niiden todennäköisyyden ja vaikuttavuuden osalta. Luonnollisesti ohjelmistoa (tai palvelua tai järjestelmää) kehittäessä kiinnostavimpia ovat suurella todennäköisyydellä tapahtuvat ja suuren vaikuttavuuden omaavat vaikutukset. Tuskin Airbnb:täkään olisi yleisesti hyväksytty, jos olisi ollut tiedossa, että järjestelmä nostaa vuokria isoissa kaupungeissa 10% asukkaiden osalta.



Vaikutukset eivät myöskään ole itsenäisiä, riippumattomia, vaan vaikutukset voivat olla sidoksissa toisiinsa. Yllä esitetyssä esimerkissä kehittäjien tuskastuminen saattaa johtaa tyytymättömyyteen ja lopulta jopa irtisanoutumiseen. SusAF-kehyksessä näitä sidoksia kutsutaan vaikutusketjuiksi. Tärkeintä näiden ketjujen osalta on lähinnä käsitys mikä johtaa mihinkin vaikutukseen. Ketju itsessään ei tarkoita, että jokin vaikutus tapahtuu varmasti vaan kuten vaikutuksilla, niin myös vaikutusketjuilla on esiintymistodennäköisyys. Jotkin sidokset ovat vahvempia kuin toiset.

Vaikutusten visualisointi SusAD-kuvaajan avulla

SusAF-kehiksen avulla löydetään mahdollisia ohjelmiston, palvelun tai järjestelmän vaikutuksia. Nämä vaikutukset voidaan esittää listana positiivisia ja negatiivisia vaikutuksia ja niiden ketjuja, joilla on tietty esiintymistodennäköisyys ja vaikuttavuus. Lista itsessään on jo lopputulos, mutta vieläkin ymmärrettävämmäksi vaikutukset saa visualisoimalla ne SusAD-kuvaajan avulla.



SusAD-kuvaaja koostuu yllä mainituista viidestä kestävyysulottuvuutta kuvaavista osista ja näiden osien alueelle sijoitetuista positiivisista ja negatiivisista vaikutuksista ja niiden ketjuista. Yksittäinen vaikutus voi johtaa yhteen tai useampaan muuhun vaikutukseen joko samalla tai eri ulottuvuudella. SusAD-kuvaajassa pohditaan myös vaikutusten ajallista näkökulmaa.

Aikajänne	Merkitys ja esimerkki
Suora, Välitön	Suoralla vaikutuksella tarkoitetaan välitöntä vaikutusta tarkasteltavassa kohteessa. Esim. Airbnb-sovelluksen käyttö mobiililaitteella vie energiaa
Epäsuora	Epäsuoralla vaikutuksella tarkoitetaan vaikutusta, joka tapahtuu muussa kohteessa, kun tarkasteltavaa kohdetta käytetään. esim. listaamalla huoneiston Airbnb-palveluun, sen käyttö pitkäaikaiseen vuokraukseen estyy.
Rakenteinen, Systeeminen	Rakenteisella tai systeemisellä vaikutuksella tarkoitetaan vaikutuksia, jotka näkyvät yhteiskunnassa ja/tai ihmisten käytöksessä, kun järjestelmän käyttö yleistyy. Esim. vuokramarkkinat muuttuvat, kun huoneita/huoneistoja siirretään Airbnb-järjestelmään.

Ajallisen näkökulman huomioiminen on mahdollisia vaikutuksia tarkasteltaessa erittäin tärkeää, sillä monesti ohjelmistoja, palveluita ja järjestelmiä kehitettäessä pohditaan vain suoria vaikutuksia ja unohtetaan vaikutukset muihin järjestelmiin tai jopa yhteiskuntaan. Luonnollisesti systeemiset muutokset vievät pidemmän ajan ja todennäköisyydet niille ovat pienempiä ja huonommin ennustettavissa kuin vaikkapa suorien vaikutusten.

Vinkkejä SusAF-kehiksen käyttöön ymmärryksen lisäämiseksi

SusAF-kehiksen käyttö vaatii hieman totuttelua, vaikka kokonaisuus onkin varsin yksinkertainen. Alla muutama kehiksen käyttöä helpottava vinkki.

1. Rajaa tarkasteltava kohde ja ymmärrä ominaisuudet

SusAF-analyysi lähtee aina tarkasteltavan kohteen ymmärryksestä ja tarkastelun rajaamisesta. Rajauksessa on hyvä pohtia mihin osiin järjestelmää voidaan oikeasti vaikuttaa. Koska analyysissä tarkastellaan ohjelmistoa, palvelua tai järjestelmää, on hyvä ymmärtää kyseisen kohtaan ominaisuudet/toiminnot. Tyypillisesti vaikutukset ovat seurausta näistä ominaisuuksista.



2. Pohdi analyysin laajuus

SusAF-analyysi vie aikaa ja resursseja, ja ensimmäisellä kerralla SusAF-analyysiä ei tarvitse tehdä kaikkien ulottuvuuksien osalta. Jos kiinnostus on vaikkapa järjestelmän teknisissä ja ekologisissa vaikutuksissa, niin silloin analyysi on hyvä aloittaa niistä. Tyypillisesti tärkeimmät ulottuvuudet tuottavat ne vaikuttavimmat ja todennäköisimmät vaikutukset. Myöhemmin tarkastelua voi laajentaa muihin ulottuvuuksiin.

3. Kaikki vaikutukset eivät ole yhtä tärkeitä

Tarkasteltavan kohteen eri vaikutusten todennäköisyys, vaikuttavuus ja jopa ajallinen näkökulma eroavat huomattavasti. Koska mahdollisia vaikutuksia löytyy tyypillisesti kymmeniä tai satoja, on erittäin tärkeää kategorisoida vaikutukset niiden kriittisyyden mukaan. Kriittisimpien vaikutusten kautta löydetään tärkeimmät kehityskohteet.

4. Kaikkea ei voi visualisoida

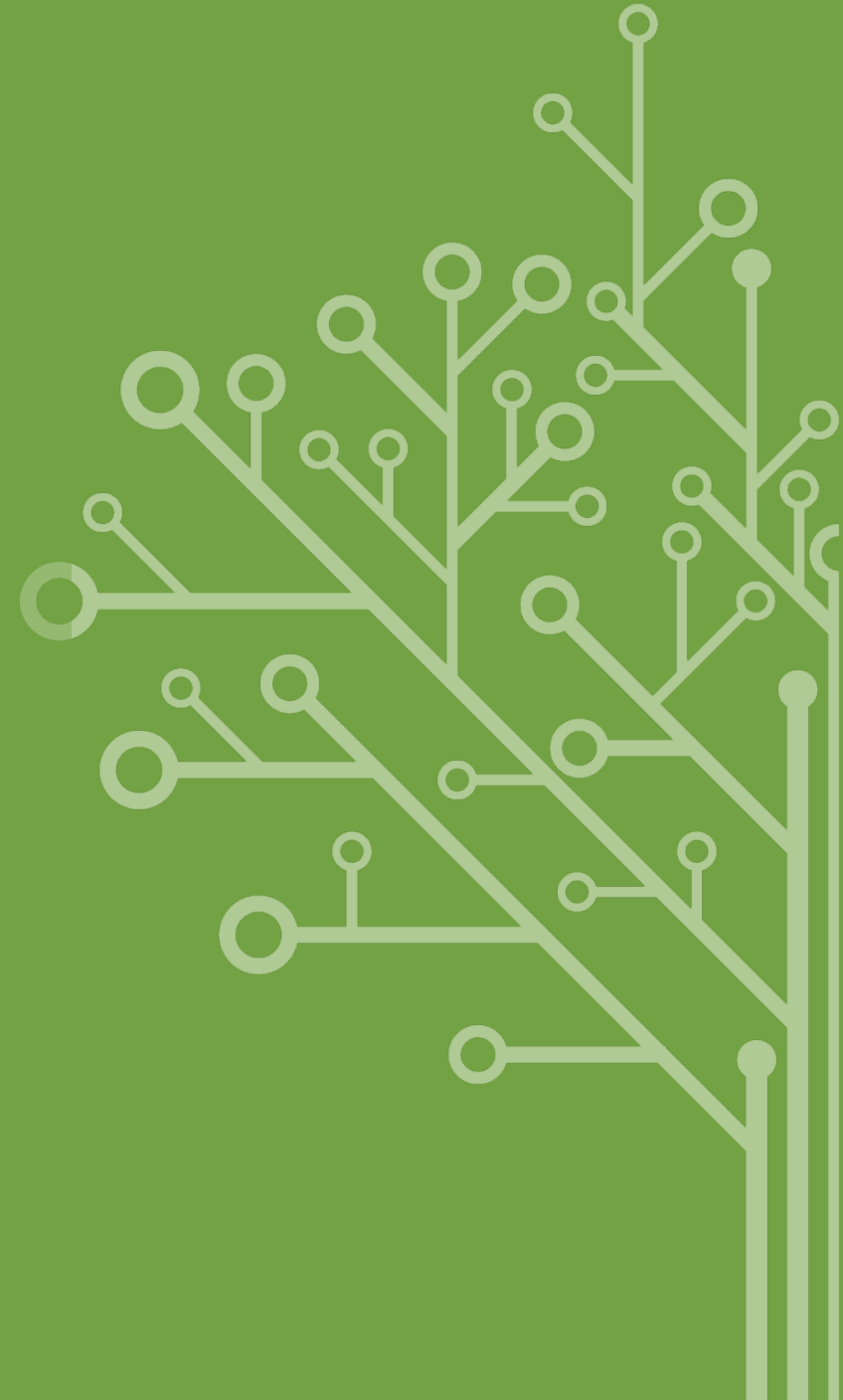
Vaikka SusAD-kuvaaja antaa hyvän yleiskuvan vaikutuksista, liiallinen vaikutusten sisällyttäminen kuvaajaan tekee siitä hankalasti tulkittavan. Siksi onkin tärkeää keskittyä kuvaajassa kriittisimpiin vaikutuksiin. Toisaalta kuvaajia voidaan tehdä erikseen kullekin tarkasteltavalle kohteen ominaisuudelle.

Lähteet

- [1] Brundtland, G. H. (1987). *Our common future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University Press.
- [2] Goodland, R. (n.d.). Sustainability: Human, social, economic and environmental. In *Encyclopedia of global environmental change* (Vol. 5, pp. 489–491). John Wiley & Sons, Ltd.
- [3] Penzenstadler, B. (2013). What does sustainability mean in and for software engineering. In *Proceedings of the 1st International Conference on ICT for Sustainability (ICT4S)* (Vol. 94).

8

Kestävyyssajattelu



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

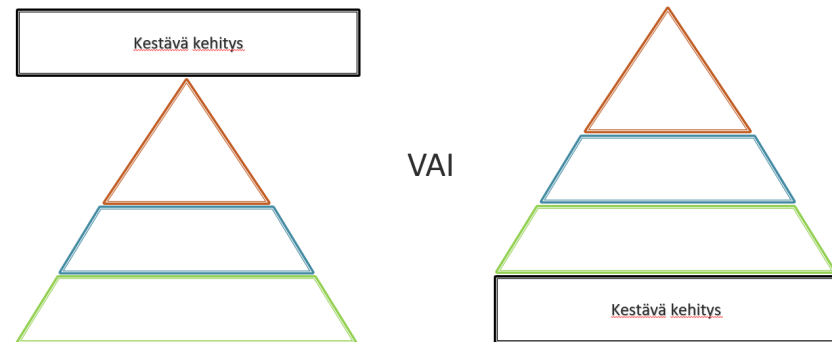
8. Kestävyyssajattelu

Tässä luvussa saat perusymmärryksen ajattelutyökaluista, joita kestävän kehityksen ymmärtämisessä käytetään. Tulet huomaamaan, että jotkut näistä ovat intuitiivisia, siinä missä toiset vaativat totuttelua ja harjaantumista. Osaa näistä ajattelutavoista saatat jo käyttää, koska ICT-alalla systeemiajattelu tulee luonnostaan, perustuuhan ala erilaisiin järjestelmiin ja niiden ymmärtämiseen.

Kestävän kehityksen ymmärryksessä todennäköisesti tärkein askel on ajattelutavan muutos, joka tapahtuu, kun osaat ottaa kestävyden huomioon. Oppimalla kestävyssajattelun periaatteet voit soveltaa niitä ja niiden perusteella oppia päättämään kuinka pitkälti jokin asia on kestävän kehityksen mukainen. Tämänkaltaisen ajattelu vaatii luonnollisesti tietopohjan kestävästä kehityksestä. Tämän lisäksi on ymmärrettävä jonkin verran peliteoriaa, systeemiajattelua ja tulevaisuusajattelua.

8.1. Aloita kestävyys mielessä

Kestävä kehitys on lähtökohta, se on ajattelutapa ja näkökulma, tämä on kestävyssajattelun ensimmäinen periaate. Kun katsotaan kansainvälistä työtä kestävän kehityksen parissa, se perustuu pitkälti Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) kestävän kehityksen tavoitteisiin, sekä kansallisiin tavoitteisiin esimerkiksi ilmastonmuutoksen torjunnassa tai köyhyyden vähentämisessä. Siksi kestävä kehitys on helppo mieltää tavoitteeksi ja tavoitteita tarvitaan myös, ne toimivat virstanpylväinä, indikaattoreina kestävyys siirtymän etenemisestä.



Kestävä kehitys on perusta, jolle rakennetaan. Taloa rakentaessa perusta luodaan ensin ja talo rakennetaan sen päälle, eikä perustaa voi jälkikäteen rakentaa. Sama pätee kestävään kehitykseen, siksi se on lähtökohta.



ICT-alalla tämä periaate näkyy eritoten tuotteiden ja palveluiden suunnittelussa. Ohjelmistoissa hyvänä vertailukohtana toimii tietoturva. Kun uusi ohjelmisto suunnitellaan ja ohjelmoidaan, on tietoturva otettava huomioon alusta lähtien, koska turvattoman järjestelmän tekeminen tietoturvalliseksi on jälkikäteen mahdoton tehtävä. Sama pätee pitkälti kestävyteenkin, ohjelmisto on alusta asti suunniteltava energiatehokkaaksi, käytöltään helpoksi ja teknisiltä ratkaisuiltaan kevyeksi suorittaa. Samalla tulee ottaa huomioon muut tämän luvun periaatteet, softa ei ole tyhjiössä, vaan erilaisten systeemien kanssa vuorovaikutuksessa. Lisätietoa ohjelmistokehitys-luvusta.

Laitteiden osalta puhutaan ekosuunnittelusta ja tällöin pitää ottaa huomioon koko elinkaari, lähtien materiaalivalinnoista ja päätyen kierrätettävyyteen. Ennen kuin yhtäkään laitetta on valmistettu, on syytä olla tiedossa mitä raaka-aineita ja komponentteja käytetään. Kiertotalouden periaatteiden mukaisesti on hyvä tietää myös, miten tulevan laitteen materiaalit voi kierrättää sen käytöstä poiston jälkeen. Laitteen pitkäikäisyys on hyvä varmistaa tekemällä siitä kestävä ja varmistamalla käyttöjärjestelmän riittävän pitkä päivitysten saatavuus. Käyttövaiheessa myös energiatehokkuus käytössä otetaan huomioon. Lisätietoa laite-luvusta.

8.2. Ajattelun syvyys ja leveys

Kykenemme pitkälti ajattelemaan sen mukaan, minkä laajuinen tietopohja ja ymmärrys maailmasta meillä on. Tämä ajatus on hyvä pitää mielessä, kun on tekemisissä kompleksin, systeemisen ja moniulotteisen aiheen parissa, kuten kestävä kehitys.

Ajattelun syvyys kuvaa erityisalaa, jonka tunnet, jota olet opiskellut, tai jonka kanssa teet töitä. Se voi olla myös harrastuksesi tai muu vapaa-ajan kiinnostuksen kohde, johon olet tutustunut syvästi. Syvä tieto on useimmiten erikoistunutta ja pistemäistä, ja mitä syvemmälle siinä menee, sitä pienempiä yksityiskohtia siitä ymmärtää. Suurimmalla osalla ihmisistä on yksi syvän tiedon alue, joskin ehtii hankkimaan näitä enemmänkin. Usein viitatus teorian mukaan syvä tiedon hankkiminen vaatii noin 10 000 tuntia tietoista harjoitusta.

Ajattelun leveys taas kuvaa pinnallisempaa tietoa eri aihealueista. Suurimmalla osalla meistä, etenkin nykyisenä informaatioähkyn aikakautena, on paljon asioita, joista olemme kuulleet pinnallisesti sosiaalisesta mediasta, lukeneet artikkelin tai nähneet dokumentin. Ajattelun leveyteen kuuluvat myös peruskoulutus, yleissivistys ja



elämäkokemukset. Yleensä mitä lähempänä olet omaa syvä tiedon aluetta, sitä vähemmän pinnallista tietosi on.

Syvä tiedon paradoksi on, että mitä enemmän tiedät jostain aiheesta, sitä enemmän ymmärrät kuinka vähän lopulta tiedät. Pinnallinen tieto taas voi aiheuttaa liiallista itsevarmuutta, mistä käytetään nimitystä Dunning-Kruger-vaikutus.

Näiden kahden ulottuvuuden lisäksi on tärkeää tunnistaa kolmas alue: asiat, joita emme tiedä olevan olemassa. Olemme siis tietämättömiä omasta tietämättömyydestämme. Tätä aluetta on todellisuudessa huomattavasti enemmän kuin kaikkea sitä, mitä tiedämme tai mistä edes tiedämme, ettemme tiedä.

8.3. Kestävyyssajattelu on systeemistä

Yleinen ihmisajattelu on usein kausaalista, jossa oman toiminnan kautta maailmasta tulee erilaisia lopputulemia. Tämän kautta peilaamme myös maailman muutenkin toimimaan tällä tavalla. Tietyt asiat toki toimivatkin näin, kuten liukuhihnateollisuuden prosessit tai tietokoneen käyttöjärjestelmät, joissa tietystä toiminnosta seuraa odotettu jatko tai lopputulema. Kun toimimme monimutkaisissa

systemeissä, kuten sosiaalisissa ympäristöissä, asiat eivät toimi näin yksinkertaisesti. Esimerkiksi ekosysteemin saastumisella voi olla yllättäviä vaikutuksia, kuten sammakkojen sukupuolen vaihtuminen atrasiini-saastumisen seurauksena. Sama pätee sosiaalisiin ympäristöihin, joissa mikä tahansa sanottu asia voi kantautua kenen tahansa korviin ja sillä voi olla odottamattomia vaikutuksia.

8.4. Systeemiajattelun työkaluja

Systeemiajattelussa on kourallinen hyödyllisiä työkaluja, jotka ovat pitkälti erilaisia tapoja nähdä maailma. Sen kontekstissa puhutaan synteesisestä tavasta tutkia maailmaa, kun perinteisesti on keskitytty analyttiseen tapaan nähdä maailma. Systeemiajattelu ei ole korjaava analyttiselle ajattelulle, vaan sitä täydentävä tapa tehdä havaintoja maailmasta. Systeemit ovat keskenään vuorovaikutuksessa olevia järjestelmiä, eli mikä tahansa asioiden tai ilmiöiden joukko ei itsessään muodosta systeemiä. Systeemiä määrittävät nimenomaan sen vuorovaikutussuhteet.

Vanhan sanonnan mukaan "et näe metsää puilta", todellisuudessa on hyödyllistä että pystyt näkemään sekä erilaiset puut, joita kasvaa ja tarvittaessa myös niiden muodostaman metsän, ekosysteemin, jossa



ne kasvavat. Tämän vuoksi on tärkeää omata molemmat tavat tutkia ympäristöä. Sama pätee myös talousjärjestelmiin, kuten markkinat, sosiaaliin järjestelmiin kuten työyhteisöt ja teknisiin järjestelmiin, kuten tietojärjestelmät. Kestävä kehitys löytyy näiden erilaisten, kompleksien systeemien vuorovaikutuksesta, jossa minimoidaan negatiiviset vaikutukset ja maksimoidaan positiiviset vaikutukset.

Systemiä määrittävät yhtä paljon sen jäsenten keskinäiset suhteet, kuin sen yksittäisten jäsenten ominaisuudet. Tästä ICT-alan järjestelmät ovat hyvä esimerkki. Tietojärjestelmän algoritmit ja tietorakenteet itsenäisesti ovat pääosin melko yksinkertaisia matemaattisia malleja ja tietojärjestelmien ominaisuudet määrittyvä, eli emergoivat tai nousevat, niiden vuorovaikutuksesta keskenään. Tämä on mahdollista vain, kun osilla on vuorovaikutuksia, joista nämä pääsevät syntymään. Mitä pidemmälle digitalisaatio on edennyt, sitä monimutkaisemmiksi erilaiset ICT-järjestelmät ovat kehittyneet ja sitä monimutkaisempia ovat myös niiden vuorovaikutukset. Asiat eivät ole siiloissa, vaan vaikuttavat toisiinsa monin tavoin. Hyvä esimerkki ovat haavoittuvuudet järjestelmissä. Yksittäinen haavoittuvuus yleisesti käytetyssä järjestelmässä voi aiheuttaa valtavia vaikutuksia monien eri alojen toimintaan. Hyvä esimerkki tästä on haavoittuvuus, joka johti ransomwarehyökkäykseen Maerskin toiminnanohjausjärjestelmässä ja levisi yhtä vaille kaikkiin sen toisiinsa peilatuista datakeskuksista ympäri

maailmaa. Verkkokatko yhdessä datakeskuksessa ja sen säästyminen ransomwarelta pelasti maailman yhden suurimmista laivaajista ransomwaren uhriksi joutumiselta.

Tämä esimerkki osoittaa myös miksi on tärkeää ymmärtää niin osia, kuin niiden muodostamia kokonaisuuksiakin. Maerskin tapauksessa yksi osa kokonaisuutta pelasti päivän, joskin onnekaasti, joten varautuminen tämänkaltaisiin tilanteisiin on tärkeää. Sama pätee myös järjestelmien ilmasto- ja ympäristövaikutuksiin, jotka ovat usein epäsuoria tai rakenteellisia vaikutuksia, jotka syntyvät ihmisten käyttäytymisen muutoksista ICT-järjestelmien seurauksena. Rakenteellisista vaikutuksista hyviä esimerkkejä ovat sosiaaliset mediat, joiden käyttö yleistyi valtavaa vauhtia 2010-luvulla ja syrjäytti monet perinteisemmät yhteisöllisyyden muodot sosiaalisessa kanssakäymisessä.

Viimeinen systeemijattelun työkalu perustuu pohjimmiltaan fysiikan perusaksioomiin. Energia ei katoa, se vain muuttaa muotoaan. Kausaalisessa ajattelussa on tapana katsoa lineaarisesti asioita, kun todellisuudessa lähes kaikki luonnossa perustuu kiertokulkuihin, tästä enemmän systeemijattelun esimerkeissä. Talousjärjestelmämme on pitkään toiminut lineaarisella periaatteella, jossa raaka-aineita hankitaan luonnosta ja elinkaaren päässä tavara päättyy jätteeksi ja

hävitykseen tai kaatopaikalle. Tästä ajattelusta ollaan siirtymässä luonnonmukaisempaan kiertotalous-ajatteluun, jossa kaikki jätteenä lähtevä hukka minimoidaan ja kierrätys niin laitteiden, komponenttien kuin raaka-aineidenkin tasolla maksimoidaan. Tästä enemmän laiteluvussa.

8.5. Esimerkki: Takaisinkytkentä

Esimerkkinä tyypillisestä systeemeissä emergoituvasta ilmiöstä on takaisinkytkentä. Takaisinkytkennässä ilmiö aiheuttaa vaikutuksia, jotka vahvistavat ilmiön itsensä syitä ja siten ilmiö alkaa ruokkia itseään, voimistuen kiihtyvästi. Tämä tapahtuu ilmastonmuutoksen yhteydessä, kun lämpeneminen sulattaa enemmän jäätä, joka heijastaa lämpösäteilyä. Tämä lisää jäättömän meren pinnan määrää, joka tummana sitoo lämpöä. Nämä aiheuttavat lisää lämpenemistä, joka aiheuttaa lisää jään sulamista, tämä synnyttää itseään ruokkivan kehän. Takaisinkytkentä-mekanismin kautta pienetkin muutokset voivat laittaa käyntiin isoja vaikutuksia.

8.6. Esimerkki: Ravinteiden kierto luonnossa, typpi

Typpikierto on tyypillinen esimerkki siitä, miten ravinteet kiertävät ekosysteemeissä niin, että hukkaa ei juuri synny. Typpi on ilmakehän yleisin kaasu ja erilaisina yhdisteinä erittäin tärkeä monille orgaanisille prosesseille. Se on myös pääasiallinen ainesosa yleisimmin käytetyissä NPK-lannoitteissa. Typen kierto on kuvattu yksinkertaistettuna kuvassa 11. Käytännössä maaperän bakteerit sitovat typpeä ilmakehästä maaperään ja jo kierrossa oleva typpi pääosin kiertää lahottajilta takaisin maaperään. Lisäksi eläinten ulosteet sisältävät typpeä, jota kautta se myös palautuu maaperään. Sen yleinen muoto tässä kierrossa on ammoniumin, josta muu maaperän bakteerikanta pystyy muokkaamaan nitriittejä ja nitraatteja, joita kasvit käyttävät ravinteina. Kasveista se päättyy kasvissyöjiin ja sitä kautta lihansyöjiin. Sitä myös vapautuu takaisin ilmakehään.

Tämänkaltaiset kierrot ovat luonnossa oletusarvoinen tapa toimia ja ne häiriintyvät ainostaan kun systeemin homeostaasi muuttuu merkittävästi. Tämä voi johtua luonnollisista syistä, kuten erilaiset luonnonmullistukset tai geologiset poikkeustilanteet, jotka mullistavat laajojakin alueita. Nykyään yhä useammin häiriöt ekosysteemien



kierroissa ovat ihmistoiminnan aiheuttamia. Niitä tulee mm. ylilannoituksesta, geenimuunnelluista kasveista, rikkamyrkyistä ja tuholaistorjunta-aineista. Pölyttäjätuho on jo tutuksi tullut esimerkki systeemisestä vaikutuksesta, joka torjunta-aineiden käytöllä on ollut.

Kiertoajattelun tuomista ihmisen teolliseen toimintaan kutsutaan biomimiikaksi. Kiertotalouden idea on mallintaa luonnon kiertoja teollisuuteen, siten että hävikki jää mahdollisimman pieneksi, kaikki mahdollinen kierrätetään ja jätteistä tehdään sinistä taloutta, eli ne kierrätetään joko raaka-aineeksi tai polttoaineeksi. Tässä on omat ongelmansa ICT-alalla, kuten monet muovilaadut, joiden kierrättäminen on mahdotonta ja laitteissa käytettyjen ainesosien kirjo ja myrkyllisyys. Lisätietoa laiteluvussa.

Jos haluat leikkiä systeemillä, jossa yksinkertaisista osista emergoituu monimutkaisia kokonaisuuksia, voit pelata John Conwayn game of life peliä täällä: <https://playgameoflife.com/>

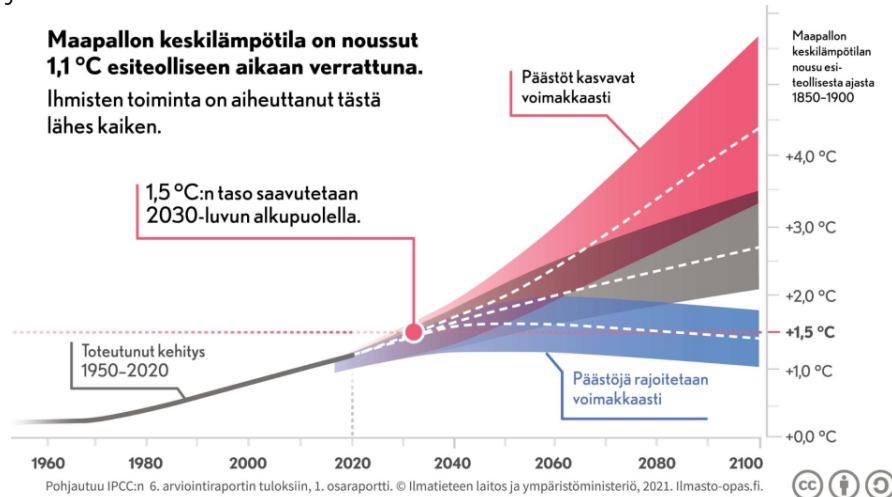
8.7. Kestävyyssajattelu on aikaorientoitunutta

Kuten varmaan olet kuullut, internetissä kaikki sanonnat tulevat alun perin joko Abraham Lincolnilta, Albert Einsteinilta tai Winston

Churchillilta. Viimeisimmän näistä mainitaan sanoneen, että jos emme opi historiasta, tulemme toistamaan sen virheet yhä uudestaan. Menneisyys itsessään on meidän näkökulmastamme jo mennyttä, eikä siihen voi vaikuttaa, mutta siitä voi oppia. Historia on täynnä esimerkkejä siitä, että teemme samoja virheitä yhä uudestaan, emmekä suostu oppimaan varoittavista esimerkeistä. Kestävä kehitys vaatii kuitenkin näistä virheistä oppimista ja asioiden tekemistä uudelleen paremmilla premisseillä. Menneisyydestä oppiminen vaatii perehtymistä ja kykyä katsoa asioita mahdollisimman objektiivisesti. Toinen yhtä tärkeä tekijä on tulevaisuus. Kestävä kehitys jo nimensä mukaisesti on tulevaisuusorientoitunutta, siinä ollaan luomassa jotain parempaa myöhemmälle, josta myös Brundtlandin raportin kuuluisa määritelmä puhuu, kun se viittaa tuleviin sukupolviin. Kaksi hyvää työkalua tulevan huomioimiseen ovat trendien ymmärtäminen ja tulevaisuuden tutkimuksen metodit. Trendit kertovat usein yksittäisen ilmiön ja lyhyen aikavälin arvioita, kun taas tulevaisuuden tutkimuksessa rakennetaan skenaarioita, jotka voivat koskea laajempia kokonaisuuksia, esimerkiksi IPCC käyttää sen metodeja ilmastonmuutosennusteisiin, kuten viereisestä kuvasta nähdään.

Trendien osalta kuuluisimpia käytettyjä malleja, etenkin teknologian osalta, ovat Gartnerin hype-käyrät, jotka kuvaavat missä kohden hype-sykliä eri teknologiat ovat menossa. Esimerkkinä on kuitenkin

ruotsalaistutkimuksen laskelma ICT-alan kiihtyvälle sähkökäytölle koska se on hyvä esimerkki laskennallisesta trendistä. Laskennallinen trendi perustuu ekstrapolointiin datan perusteella, jolloin voidaan antaa jonkinlainen ennuste siitä, mitä tulee tapahtumaan, jos trendi jatkuu.



Kansainvälisen ilmastopaneelin kuudennen arviointiraportin mukaisia skenaarioita päästöjen määrän mukaisiin lämpenemisennusteisiin.

Skenaariotyöskentely on monimutkaisempaa ja siitä kiinnostuneiden kannattaa tutustu paremmin aiheen julkaisuihin. Tulevaisuuden

tutkimuskeskus Turun yliopistosta on julkaissut ilmaisen oppikirjan aiheesta ja Sitra käyttää sen metodeja paljon hyödykseen, joten tietoa on saatavilla. Perusteiltaan skenaarioissa on kyse jonkin ilmiökentän tai systeemin tarkastelusta, merkittävimpien muuttujien tunnistamisesta ja potentiaalisten muutosten löytämisestä tulevaisuudesta näiden muuttujien eri arvoilla. Lisäksi tulevaisuuden tutkimuksessa puhutaan esimerkiksi signaaleista. Yksi tällainen ICT-kentällä on Facebookin uudelleenbrändäys Metaksi. Tämän kokoluokan pörssiyrityksen nimenvaihdos tällä tavoin on lähes ennen näkemätöntä.

8.8. Rajattomat pelit ja rajaton ajattelu

Yksi hyvä tapa mallintaa etenkin sosiaalisia interaktioita, mutta myös monia luonnossa tapahtuvia vuorovaikutuksia on peliteoria. Peliteoria yksinkertaistaa sosiaalisia vuorovaikutuksia ja mallintaa ihmisten käyttäytymistä erilaisissa tilanteissa. Peliteoreettisia pelejä voivat olla niin sosiaaliset interaktiot, kuin taloudelliset tilanteetkin. Peliteorian kuuluisin yksittäinen peli on vangin ongelma (Prisoner's dilemma), joka kuvaa monissa taloudellisissa interaktioissa esiintyvää tilannetta

Idea alkuperäisen vangin ongelma pelin taustalla oli yksinkertainen. Kaksi rikollista on vangittuna yhteisestä rikoksesta. Heitä pidetään



eristyksissä toisistaan ja heillä on mahdollisuus joko todistaa toisen olevan rikollinen tai pysyä hiljaa. Jos molemmat pysyvät hiljaa, molemmat saavat yhden vuoden tuomion, jos toinen todistaa ja toinen on hiljaa, saa todistaja vapautuksen ja hiljaa ollut kolmen vuoden tuomion. Jos molemmat todistavat, molemmat saavat kahden vuoden tuomion. Päätökset tehdään aidosti itsekseen ja yksittäisen pelin todennäköisesti paras strategia on aina todistaa toista vastaan. Yleisessä muodossa nämä vaihtoehdot on pisteytetty samankaltaisin painotuksin.

Pelin strategia muuttuu heti, kun sitä pelataan enemmän kuin yhden kerran. Suurin osa taloudellisista ja sosiaalisista interaktioista toistuu ja jos näissä aina ajaa omaa etuaan, voi käydä niin, että toinen pelaaja ei halua pelata enää. Suurin osa ihmisistä esimerkiksi ei osta tuotteita yritykseltä yhden ikävän kokemuksen jälkeen, vaan vaihtaa yritystä, jota käyttää. Sama pätee ystäviin, jotka pettävät. Tämän vuoksi yhteistyön tekeminen ja sellaisten tulosten hakeminen, joissa molemmat voittaa, on ensiarvoisen tärkeää, jos haluaa toimia kestävästi.

Elämä ei kuitenkaan ole näin yksinkertaista, se on jaettavissa rajallisiin ja rajattomiin peleihin. Rajalliset pelit ovat sellaisia, joissa on selkeät säännöt, sekä rajattu peliaika ja -kenttä. Hyvä esimerkki tämmöisestä

pelistä on useimmat joukkueurheilulajien pelit, kuten jalkapallo tai jääkiekko. Näissä on selkeät säännöt voittamiselle ja häviämislle, pelikenttä tai kaukalo ja määritelty peliaika.

Mielenkiintoisempia ovat kuitenkin rajattomat pelit. Rajattomissa peleissä ei ole määriteltyä, selkeitä sääntöjä, pelikenttää tai peliaikaa. Ensimmäinen esimerkki rajattomasta pelistä tämän käsitteen keksijältä oli ihmiselämä, joka selkeästi toimii kuten rajaton peli, vaikkakin se joskus väijäämättä päättyy. Rajattomia pelejä on kuitenkin muitakin, kuten monet sosiaaliset piirit, markkinat ja kestävä kehitys. Rajattomissa peleissä toimivin strategia on lähes aina yhteistyön tekeminen. Niissä voittaminen ei ole tärkein päämäärä, vaan pelissä mukana pysyminen, esimerkiksi yrityksen pysyminen markkinoilla. Jos haluamme pysyä mukana yhteisessä pelissä, jonka nimi on maapallo, on meidän kyettävä yhteistyöhön.

Peliteoriaan saa erinomaisen johdatuksen Richard Dawkinsin BBC dokumentaarista Nice Guys Finish First, jossa puhutaan erilaisista valintatilanteista cangin dilemma pelin kautta.



8.9. Esimerkki peliteorian tärkeydestä: yhteismaan tragedia

Yhteismaan tragedia on alun perin yhteisten laidunmaiden käytön kohdalla huomattu ongelma. Laidunmaa uusiutuu vain tietyn verran ja kestää tietyn määrän lampaita. Jos jokainen pitää siellä sovitun määrän lampaita, se pysyy uudistuskykyisenä. Jokaisella on kuitenkin insenttiivi lisätä oman karjansa määrää ja yksittäinen lisäys ei juuri heiluta tasapainoa. Jos kaikki toimivat näin, laidun heikentyy ja lopulta sen kantokyky pienenee. Tämä on pienoiskoossa esitettyä se tilanne, mikä kohtaa ilmakehää ja valtameriä.

8.10. Kestävyyssajattelu on itsenäistä ajattelua

Toinen internetin usein lainaama henkilö Albert Einstein on kertoman mukaan sanonut, että emme voi ratkaista ongelmaa siinä ajatusmallissa, jossa se on syntynyt. Emme voi ratkaista lineaaritalouden ongelmia ellemmme pysty muuttamaan ajatustapaamme kiertotalouden mukaiseksi. Mutta miten seeprat ja leijonat liittyvät tähän asiaan?

Seeprojen naamioväri kohden niiden luontaista elinympäristöä on olematon, ja niiden naamioituminen tapahtuu niiden omaa ryhmää vastaan. Tämä on myös syy sille, miksi seeproja ei voi tutkia yksittäisinä. Tämä huomattiin, kun tutkijat laittoivat seeprojen kylkeen eri värisiä täpliä, koska halusivat seurata yksittäisiä eläimiä. Ensimmäisen yön jälkeen täplän saaneet seeprat olivat kaikki joutuneet leijonan ruuaksi, koska ne erottuivat ryhmän yhteisestä naamioväristä.

Ihmiset naamioituvat myös ryhmiin, joskus jopa pukeutuen samalla tavalla, tätä varten on olemassa erilaisia etikettejä. Samoin toimivat eräät alakulttuurit, joissa on omat tyyliinsä. Yleensä kuitenkin ihmisten naamioituminen ryhmiin tapahtuu ideologioiden ja mielipiteiden kautta. Näillä on omat arvonsa ja tapansa, joiden rikkominen on sisäryhmää kohtaan tabu. Poikkeavien mielipiteiden esittäminen voi johtaa äärimmäisiin asioihin, kuten julkiseen häpäisemiseen, etenkin sosiaalisen median aikakaudella. Rohkeutta ajatella itsenäisesti kuitenkin tarvitaan.

Paras esimerkki tästä on käsihygienian leviäminen lääkärien keskuuteen. Ennen bakteerien löytämistä, 1800-luvun puolivälissä, unkarilainen lääkäri Ignaz Semmelweis huomasi, että kuolintodennäköisyys synnytyksen jälkeisiin tauteihin oli



lääkäriopiskelijoiden avustamissa synnytyksissä moninkertainen kätilöiden tekemiin nähden. Erona näillä ryhmillä oli, että lääkäriopiskelijat tekivät myös ruumiinavauksia eivätkä pesseet käsiään sen jälkeen. Semmelweis teoretisoi, että ruumiinavauksesta jäi opiskelijoiden käsiin ruumispartikkeleita, jotka aiheuttivat vaaran synnyttävälle äideillä. Hän huomasi, että käsien pesu klooratulla lime-liuoksella vähensi synnytyskuolemia dramaattisesti.

Ongelmana oli, että lääkäriammattin harjoittajat ajalla, jolloin bakteereita ei tunnettu, eivät halunneet uskoa löydökseen, koska se soti yleistä käsitystä ja vakiintuneita tapoja vastaan. Semmelweisin idea hylättiin ja hän sai ideastaan osakseen pilkkaa ja muiden lääkäreiden halveksunnan, joutuen käytännössä ulkopuoliseksi ammattikunnassaan. Vasta kun Louis Pasteur löysi bakteerit ja kehitti infektio-teoriansa, Semmelweisin tulokset saivat arvoisensa paikan lääketieteen historiassa.

Tämä tapahtuma, joka koskee niinkin itsestään selvää asiaa kuin käsien pesu lääkärin ammatissa, on joskus ollut kiistanalainen. Samoin vastustusta omina aikoinaan ovat herättäneet niin kotien sähköistäminen, autojen turvavyöt kuin internetkin. Monet muistavat 1980-90-luvuilla nörtin olleen käytännössä joukon ulkopuolelle joutumista kuvaava termi. Kuinka monia hyviä ideoita ja toimivia

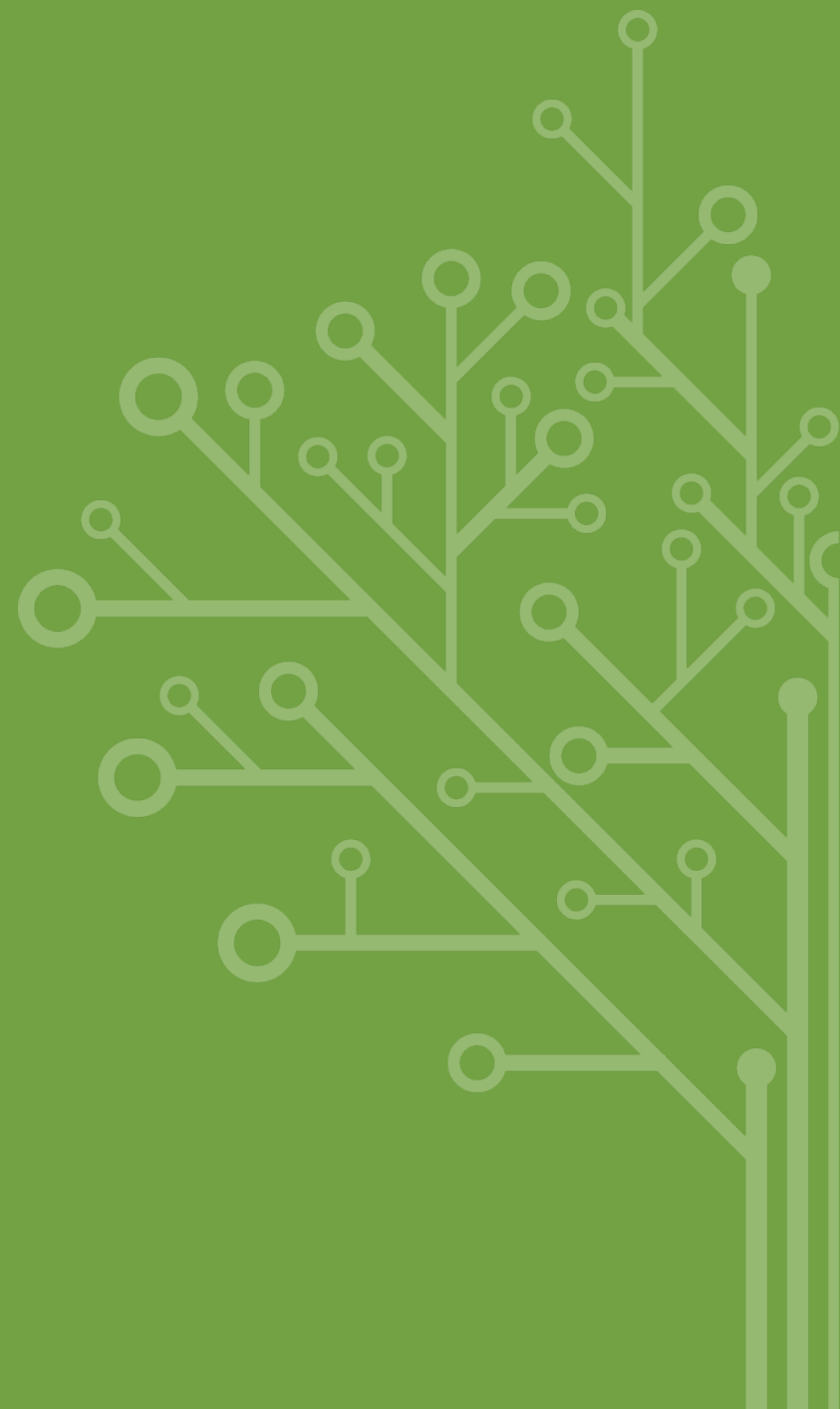
ratkaisuja on jäänyt toteuttamatta vain, koska ne rikkovat liian pahasti konsensuksen? Kestävä kehitys tarvitsee itsenäistä ajattelua ja vapaata ideoiden vaihtoa tuomitsemattomassa ilmapiiressä, vain tällä tavoin radikaalit ideat voivat mullistaa nykyiset paradigmat.

Kestävyyssajattelun viisi teesiä

- Kestävä kehitys ei ole tavoiteltava, se on ajattelutapa
- Kestävyys on skaalautuva ominaisuus
- Kestävyys on tasapaino, negatiiviset ja positiiviset vaikutukset
- Kestävyys on systeemistä, vaikutukset suoraa, epäsuoraa ja rakenteellisia
- Kysymys: Miten voin tehdä tämän asian kestävämmän?

9

Yhteenveto



VISIIRI.



Euroopan unionin
osarahoittama

9. Yhteenveto

Tämä oppimateriaali on kulkenut ICT:n ympäristövaikutusten läpi datakeskuksista ja matkaviestinverkoista laitteisiin, ohjelmistoihin ja tekoälyyn. Kantava ajatus on ollut alusta lähtien sama: digitaalinen ei tarkoita aineetonta. Jokaisen digipalvelun taustalla on energiaa kuluttava infrastruktuuri, globaalit laiteketjut ja elinkaari, joka alkaa raaka-aineiden louhinnasta ja päättyy sähköiseen jätteeseen. Vaikutus on piilossa, mutta se on todellinen ja kasvava.

Kokonaiskuvan hahmottamisessa keskeistä on jalanjäljen ja kädenjäljen välinen suhde. ICT on samanaikaisesti merkittävä ympäristökuormittaja ja tehokas väline kuorman vähentämiseen muualla yhteiskunnassa. Kädenjäljen potentiaali on arvioitu jopa kymmenkertaiseksi suhteessa ICT:n omaan jalanjälkeen, mutta tämä potentiaali ei realisoidu automaattisesti. Se edellyttää, että digitaaliset ratkaisut todella korvaavat fyysisiä prosesseja tai tehostavat resurssien käyttöä mitattavasti. Yritys tarvitsee molemmat: pienemmän jalanjäljen omassa toiminnassaan ja suuremman kädenjäljen ratkaisuisaan, eikä näitä pidä asettaa vastakkain.

Elinkaariajattelu on materiaalin läpileikkaava työkalu. Laitteiden osalta suurin osa ympäristövaikutuksista syntyy jo ennen kuin laite ehtii käyttöön: valmistus, raaka-aineiden louhinta ja globaalit toimitusketjut painavat enemmän kuin käytönaikainen sähkölasku. Tämä tekee hankinnasta ympäristöpäätöksen, usein merkittävämmän kuin mikään myöhempi optimointi. Tarpeeseen hankkiminen ja laitteiden pitäminen käytössä pidempään ovat valintoja, joilla on vaikutusta. Sama logiikka pätee ohjelmistoihin: arkkitehtuurivaatimukset, datamäärät ja resurssitehokkuus kannattaa miettiä ennen ensimmäistäkään koodiriviä, ei jälkikäteen korjattavana ominaisuutena.

Datakeskukset ovat ICT:n energiankulutuksen näkyvin osa, ja niiden merkitys kasvaa tekoälyn ja pilvilaskennan myötä. Energiatehokkuuden parantaminen, uusiutuvan energian käyttö, hukkalämmön hyödyntäminen ja läpinäkyvä raportointi ovat käytännön keinoja, joita parhaat toimijat jo toteuttavat. Suomessa viileä ilmasto, laajat kaukolämpöverkot ja uusiutuvan energian saatavuus luovat poikkeuksellisen hyvät edellytykset ympäristösuorituskykyisille datakeskuksille. Matkaviestinverkoissa radioverkko on edelleen suurin energiankuluttaja, ja energiategokkuuden parantaminen on alan tärkein välitön ympäristöteko. Ohjelmistojen energiankulutus taas on pitkään jäänyt aliarvioituun rooliin, vaikka kehittäjien tekemillä



valinnoilla, kuten algoritmeilla, arkkitehtuurilla ja datan käsittelytavoilla, on suora vaikutus siihen, kuinka paljon laskentaa palvelu lopulta vaatii.

Mittaaminen on edellytys kaikelle muulle. Ilman vertailukelpoista dataa vaikutuksia ei voi johtaa, tavoitteita ei voi asettaa eikä parannuksia voi todentaa. Tämä pätee niin datakeskusten PUE- ja REF-arvoihin kuin ohjelmistojen energiankulutukseenkin. Mittaamisen ensimmäinen askel ei ole mittarin valinta vaan määritelmä: mitä lasketaan mukaan ja millä rajauksella. Ilman tätä luvut eivät ole vertailukelpoisia, ja väitteet vihreydestä jäävät helposti epätarkoiksi.

Green ICT ei ole IT-osaston erillishanke vaan koko organisaation asia. Hankinta, johto, talous ja kehitystiimit sekä jokainen laitevalintoja tekevä työntekijä vaikuttaa kokonaisuuteen. Tutkimus osoittaa johdonmukaisesti, että organisaatiot saavat parempia tuloksia, kun Green ICT kytketään osaksi liiketoimintastrategiaa. Johdon sitoutuminen on ratkaisevaa, ei siksi että johto tekisi tekniset päätökset, vaan siksi että ilman selkeitä tavoitteita ja mittareita hajautetut päätökset optimoituvat väriin asioihin.

Säätelyn suunta on selvä ja vaatimukset kiristyvät. EU:n energiatehokkuusdirektiivi, ekosunnitteluasetus, yritysten kestävyysraportointivelvoitteet ja datakeskusten raportointikehys

muodostavat yhdessä kehikon, jonka painoarvo kasvaa jatkuvasti. Parhaassa asemassa ovat ne organisaatiot, jotka eivät odota velvoitteiden voimaantuloa, vaan rakentavat tietoisuutta, mittaavat lähtötason ja integroivat Green ICT:n osaksi omaa strategiaansa jo nyt.

Visiiri-hankkeen keskeisin viesti tiivistyy yhteen kysymykseen, jonka jokainen voi esittää omassa työssään: miten voin tehdä tämän asian kestävämmän? Vastaukset löytyvät mittaamalla, omistajuutta selkeyttämällä ja kestävyys mielessä pitämällä, ei vain kertaluonteisena projektina, vaan pysyvänä ajattelutapana.

Löydät lisää syventävää materiaalia eri osa-alueilta VISIIRI-hankkeen sivuilta: tieke.fi/green-ict-visiiri



VISIIRI – Vihreän siirtymän ICT- ekosysteemi

Green ICT -hanke VISIIRI luo kokonaiskuvan Suomen ICT-alan vaikutuksista ilmastoon ja ympäristöön. Hanke tukee ICT-alan vihreää siirtymää yhdistämällä alan toimijat valtakunnalliseen ekosysteemiin, joka mahdollistaa parhaiden käytäntöjen jakamisen ja suomalaisen teollisuuden ja akateemisten toimijoiden kohtaamisen.

Hanke kehittää menetelmiä ICT-alan ympäristövaikutusten mittaamiseen ja tuottaa ympäristötietoisuutta lisääviä koulutusmateriaaleja yritysten käyttöön.

Ympäristötietoisuuden lisääminen pienentää ICT-alan hiilijalanjälkeä, ja samaan aikaan kädenjälki suurenee.

Samalla vihreä bisnes luo Suomeen edelläkävijyyttä, joka avaa mahdollisuuksia kansainvälisillä markkinoilla.

Hanke on saanut rahoitusta vihreän siirtymän valtakunnallisesta EAKR-teemakokonaisuudesta. Rahoitus on myönnetty Pohjois-Suomen elinvoimakeskusten kautta.

Hankeaika

01.04.2024–31.05.2026

Lisätietoja

tieke.fi/green-ict-visiiri

