Eduskunnan tulevaisuusvaliokunta 26.2.2025

Asia: Tulevaisuusvaliokunta keskiviikko 26.02.2025 klo 09.00 / O 9/2023 vp / Asiantuntija-pyyntö

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy kiittää mahdollisuudesta lausua tekoälyn hyödyntämisestä nousevien teknologioiden ja niiden vaikutusten ennakoinnissa.

Ymmärtääksemme miten tekoäly vaikuttaa teknologiaennakointiin, on syytä aloittaa ymmärtämällä mitä teknologiaennakointi on. **Teknologiaennakointi voidaan määritellä prosessiksi, jonka avulla pyritään systemaattisesti tunnistamaan, analysoimaan ja ymmärtämään teknologian tulevaa kehitystä ja sen vaikutuksia yhteiskuntaan, talouteen ja organisaatioihin.** Teknologiaennakointi ei ole vain todennäköisyyksien arviointia vaan sisältää myös aktiivisen näkökulman, jossa tunnustetaan, että päätökset tänään voivat vaikuttaa teknologian kehityssuuntiin tulevaisuudessa. Ennakointia voidaan käyttää erilaisten vaihtoehtoisten tulevaisuuspolkujen hahmottamiseen, suunnitteluun ja toteutukseen ollen näin vahvasti sidoksissa strategiseen päätöksentekoon, tutkimus- ja innovaatiopolitiikkaan sekä teknologiajohtamiseen. [1]

Teknologiaennakoinnin juuret ulottuvat yli sadan vuoden taakse, mutta systemaattinen lähestymistapa kehittyi toisen maailmansodan jälkeen sotilaallisten ja teollisten tarpeiden myötä. 1900-luvun alussa H.G. Wells ehdotti teknologian vaikutusten järjestelmällistä arviointia[2], mutta vasta maailmasotien jälkeen Yhdysvaltain puolustusalan tutkimuslaitokset, kuten RAND, kehittivät laadullisia ennakointimenetelmiä, kuten Delfoi-menetelmän ja skenaarioanalyysin, sotilasstrategian tueksi. 1960-luvulta lähtien teknologiaennakointi laajeni kansallisiin strategisiin ohjelmiin, erityisesti Japanissa ja Iso-Britanniassa, ja 1980-luvulta alkaen siitä tuli olennainen osa tutkimus- ja innovaatiopolitiikkaa. Euroopassa, esimerkiksi Saksassa ja Euroopan unionissa, ennakointia on hyödynnetty tutkimus- ja kehitysrahoituksen kohdentamisessa, ja monissa maissa se on integroitu pitkän aikavälin strategiseen suunnitteluun.[3]

Pohjautuen tieteen ja teknologian määrälliseen analyysiin, 2000-luvulla teknologiaennakointi on siirtynyt kohti datavetoisempaa analyysiä. Bibliometriikan, patenttianalyysien ja koneoppimismallien hyödyntäminen on tuonut uuden ulottuvuuden teknologian kehityksen mallintamiseen. **Teknologiaennakointi onkin siirtynyt asiantuntija-arvioiden varaan rakentuvasta analyysista monimenetelmäiseen ja yhä enemmän dataan perustuvaan tulevaisuuskuvien rakentamiseen.** Esimerkiksi VTT:llä, data- ja mallinnuspohjainen teknologiaennakointi on integroitunut osaksi asiantuntijaennakointia jo yli kymmenen vuoden ajan.

Kysyttäessä millaisia ratkaisuita tekoälyavusteiseen teknologianennakointiin maailmalla on käytössä, on hyvä huomioida, että tekoälypohjaisten menetelmien käyttö osana teknologiaennakointia ei ole uutta. Ensimmäiset koneoppimiseen perustuvat teknologian kehitystä mallintavat tiedejulkaisut julkaistiin VTT:lläkin vuonna 2014[4]. Kasvanut laskentakyky ja tietoaineistojen saatavuus ovat viimeisen 15 vuoden aikana muuttaneet teknologiaennakointia merkittävästi. **Erityisesti luonnollisenkielen analyysi on mahdollistanut teknologiaennakoinnin painopisteen siirtymisen tekstiaineistojen, kuten tieteellisiä julkaisujen, patenttihakemuksien, yritysraporttien, uutisvirtojen, ja sosiaalisen median, analysointiin.** Tavoitteena on ollut syvempi ymmärrys teknologian kehityksestä, ei vain sen

[1] Suominen, A. (2011). Notes on emerging technologies. TUCS Dissertations, University of Turku
[2] Wells, H. G. (1916). What is Coming?: A European Forecast. New York: Macmillan.
[3] Suominen, A. (2011). Notes on emerging technologies. TUCS Dissertations, University of Turku
[4] Yau, C. K., Porter, A., Newman, N., & Suominen, A. (2014). Clustering scientific documents with topic modeling. Scientometrics, 100, 767-786.

määrällisestä kasvusta. Tässä kehityksessä koneoppiminen on noussut keskeiseksi työkaluksi, sillä se mahdollistaa datan tehokkaan luokittelun ja tekstisisältöjen merkitysrakenteiden tunnistamisen.

Arvioitaessa tekoälyn hyödyntämistä teknologiaennakoinnissa, yleisin sovellus löytyy patenttianalyysistä. Patenttiaineistoja on pidetty yhtenä tärkeimmistä tietolähteistä, tiedejulkaisujen rinnalla, arvioitaessa teknologiakehityksen nykytilaa. Menetelmällisesti tekoälypohjainen teknologiaennakointi perustuu pitkälti luonnollisenkielen analyysiin ja koneoppimismenetelmiin, kuten regressiomalleihin, klusterointialgoritmeihin, sekä päätöspuihin. Kaikki edellä mainitut ovat perinteisiä data-analyysin menetelmiä, mutta integroituvat osaksi yleisesti tunnettuja ennakointimenetelmiä, kuten aikasarja-analyysiä, trendiekstrapolaatiota, tiekarttatyöskentelyä ja skenaariota. **Tekoälypohjaiset menetelmät eivät korvaa perinteistä ennakointia, vaan toimivat sitä täydentävinä analyysivälineinä. Näiden tekniikoiden yhdistäminen mahdollistaa monipuolisempien ennakointianalyysien tekemisen ja voi parantaa tulevaisuuden kehityskulkujen hahmottamista.**[5] Nostan alla viisi konkreettista esimerkkiä:

Teknologia ennakoinnin yksi keskeinen haaste on ollut **teknologisen emergenssin tunnistaminen**.[6] Emergenssin tunnistamisen tavoitteena ei ole vain havaita teknologian kasvua, vaan tunnistaa varhaiset, vaikeasti havaittavat signaalit uusista teknologisista kehityskuluista, jotka voivat tulevaisuudessa muodostua merkittäviksi innovaatioiksi. Tekoälyä hyödyntämällä on pyritty tunnistamaan, kuinka eri teknologiat lähentyvät toisiaan, mitä uusia tutkimusaiheita nousee esiin ja mitkä teknologia-alueet saavat kasvavaa huomiota[7]. Heikkojen signaalien tunnistamisessa tekoäly onkin osoittautunut hyväksi työkaluksi ”signaalien vahvistamiseen”.[8]

Toinen hyvä esimerkki on tekoälyn mahdollisuus **luoda ”kokemuksia” tulevaisuudesta**. Kun ajattelemme tulevaisuutta, käytämme samoja prosesseja kuin historian muisteluun.[9] Tekoälyn mahdollisuus luoda kokemuksellisia ympäristöjä, joissa sanalliset tulevaisuuden skenaariot muuntuvat ympäristöiksi, jotka voi kokea ja joiden kanssa voi olla vuorovaikutuksessa mahdollistaa tulevaisuuksien paremman muistamisen ja konkretisoinnin sidosryhmille aiempaan tehokkaammin[10].

Kolmantena esimerkkinä nostan esiin tekoälyn kyvyn **mallintaa ajallisia kehityskulkuja multimodaalisesti yhdistäen erilaisia tietolähteitä**, kuten tekstiä, kuvia ja aikasarjadataa. Uudet menetelmät, kuten ”Trajectory Chain-of-Thought”[11], mahdollistavat kehityskulkujen syy-seuraussuhteiden hahmottamisen ja tulevaisuuden ennakoinnin dynaamisemmin kuin perinteiset tilastolliset mallit. Multimodaalinen tekoäly voi yhdistää eri teknologioiden kehityskaaria, tunnistaa konvergenssia ja ennakoida mahdollisia murroskohtia analysoimalla sekä visuaalisia että tekstipohjaisia trendejä. Tämä mahdollistaa entistä monipuolisemman ja realistisemman tulevaisuuskuvien rakentamisen, jossa tekoäly ei vain jatka nykyisiä trendejä, vaan hahmottaa vaihtoehtoisia kehityspolkuja ja niiden keskinäisiä vaikutuksia.

---

[5] Muraro, V., & Salles-Filho, S. (2024). Big data, machine learning and uncertainty in foresight studies. foresight, 26(3), 436-452.
[6] Kts esim. Li, M., Porter, A. L., & Suominen, A. (2018). Insights into relationships between disruptive technology/innovation and emerging technology: A bibliometric perspective. Technological Forecasting and Social Change, 129, 285-296.
[7] Ashouri, S., Cole, C., Arnold, M., Hajikhani, A., & Tahvanainen, A. J. (2024). Emerging Trends Identification through Large Scale Data Analysis with Large Language Models. Available at SSRN 4867156.
[8] Mühlroth, C., Kölbl, L., & Grottke, M. (2023). Innovation signals: leveraging machine learning to separate noise from news. *Scientometrics*, *128*(5), 2649-2676.
[9] Lombard, E. (2023) Future Thinking: Insights from Neuroscience and Memory Studies. Alternative Futures Workshop
[10] Ferrer i Picó, J., Catta-Preta, M., Trejo Omeñaca, A., Vidal, M., & Monguet i Fierro, J. M. (2025). The time machine: future scenario generation through generative AI tools. Future Internet, 17(1), 48.
[11] Yu, E., Zhao, L., Wei, Y., Yang, J., Wu, D., Kong, L., ... & Tao, W. (2024, September). Merlin: Empowering multimodal llms with foresight minds. In European Conference on Computer Vision (pp. 425-443). Cham: Springer Nature Switzerland. (kts myös https://ahnsun.github.io/merlin/)

Neljänneksi esimerkiksi voidaan nostaa **maailmamallit, jotka pyrkivät ymmärtämään ja ennustamaan tulevaisuutta kokonaisvaltaisesti.** Näiden mallien ytimessä on ajatus siitä, että koneoppimisen avulla voidaan rakentaa järjestelmiä, jotka eivät pelkästään analysoi nykyhetkeä, vaan myös hahmottavat mahdollisia tulevaisuuksia. Maailmamallit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: toiset keskittyvät nykytilan ymmärtämiseen ja ympäristön sisäisten rakenteiden mallintamiseen, kun taas toiset pyrkivät ennustamaan tulevaisuuden tiloja ja niiden vaikutuksia päätöksentekoon. Näitä malleja hyödynnetään esimerkiksi autonomisessa liikenteessä, robotiikassa ja yhteiskunnallisissa simulaatioissa, joissa niiden avulla voidaan luoda dynaamisia skenaarioita ja ohjata järjestelmien toimintaa muuttuvissa olosuhteissa.[12] Tämä tekee maailmamalleista keskeisen työkalun teknologiaennakoinnissa, sillä niiden avulla voidaan rakentaa kompleksisia simulaatioita, joissa voidaan testata erilaisia teknologisia kehityspolkuja ja arvioida niiden vaikutuksia pitkällä aikavälillä.

Viimeisenä nostan esiin **agenttipohjaisen simuloinnin**, josta esimerkkinä Alteran Project SID[13], joka hyödyntää Minecraftia kokeellisena ympäristönä tekoälyagenttien oppimiseen ja vuorovaikutukseen. Project SID keskittyy monitoimijaoppimiseen, jossa tekoälyagentit kehittävät käyttäytymistään navigoimalla ja suorittamalla tehtäviä dynaamisessa hiekkalaatikkoympäristössä. Tämä mahdollistaa monimutkaisten järjestelmien, kuten päätöksenteon, resurssien hallinnan ja yhteistyöstrategioiden, kokeilemisen ja analysoinnin simuloidussa maailmassa. Agenttipohjaiset simulaatiot, kuten Project SID, tarjoavat uuden tavan testata teknologian kehitystä ja ennakoida tulevaisuuden skenaarioita kokeellisesti. **Tämä tekee niistä arvokkaita työkaluja teknologiaennakoinnille, sillä ne voivat paljastaa uusia ilmiöitä ja auttaa ymmärtämään, miten ihmiset voivat toimia yhdessä muuttuvissa ympäristöissä.**

Tekoälyavusteinen siirtymä perinteisestä määrällisestä analyysistä kohti sisällöllistä ymmärrystä on muuttanut teknologiaennakoinnin luonnetta merkittävästi. Se on mahdollistanut monimutkaisempien ilmiöiden hahmottamisen ja laajentanut ymmärrystämme tiedon synnyn rakenteista. Tekoälyn kehittyessä pystymme tunnistamaan yhä monimutkaisempia vuorovaikutusmekanismeja, joissa teknologian kehitys ei etene lineaarisesti, vaan kietoutuu yhteiskunnallisiin prosesseihin.[14]

Tämä kehitys korostaa teknologian sosiaalista rakentumista[15] – sitä, kuinka **teknologia ei ole irrallinen ilmiö, vaan syntyy ja kehittyy jatkuvassa vuorovaikutuksessa sosiaalisten, kulttuuristen, poliittisten ja historiallisten tekijöiden kanssa uuden tiedon ja teknologian tuotannon rinnalla.** Tekoälypohjaisella teknologiaennakoinnilla on mahdollista esimerkiksi luoda suunnitteluprosesseja, joissa jokaisen kansalaisen tulevaisuusvisiot voivat tulla osaksi kollektiivista tulevaisuuskuvaa[16]. Tekoälypohjainen teknologiaennakointi ei ainoastaan mahdollista osallistavaa tulevaisuusajattelua, vaan se tarjoaa myös välineitä konkreettisten skenaarioiden rakentamiseen. **Tekoälyn avulla voimme mallintaa vaihtoehtoisia kehityspolkuja ja tehdä tulevaisuuden epävarmuuksia näkyväksi yhteiskunnallisessa keskustelussa.**[17] Tekoälyllä voidaan näin luoda

---

[12] Ding, J., Zhang, Y., Shang, Y., Zhang, Y., Zong, Z., Feng, J., ... & Li, Y. (2024). Understanding World or Predicting Future? A Comprehensive Survey of World Models. arXiv preprint arXiv:2411.14499.
[13] kts. https://digitalhumanity.substack.com/p/project-sid-many-agent-simulations
[14] Yu, E., Zhao, L., Wei, Y., Yang, J., Wu, D., Kong, L., ... & Tao, W. (2024, September). Merlin: Empowering multimodal llms with foresight minds. In European Conference on Computer Vision (pp. 425-443). Cham: Springer Nature Switzerland. (kts myös https://ahnsun.github.io/merlin/)
[15] kts. esim. Klein, H. K., & Kleinman, D. L. (2002). The social construction of technology: Structural considerations. Science, Technology, & Human Values, 27(1), 28-52.
[16] Symons, J. (2024). I see therefore we are: the potential for aggregating individual future visions into a collective imaginary through artificial intelligence (AI). foresight.
[17] Trujillo-Cabezas, R. (2024). Exploring the link between foresight and artificial intelligence methods to strengthen collective future-building in contexts of social instability. foresight.

dynaamisia ja monimuotoisia skenaarioita, jotka tekevät tulevaisuudesta käsinkosketeltavamman. Sen sijaan että tarkastelisimme tulevaisuutta yksittäisten trendien tai ennusteiden kautta, voimme simuloida erilaisia mahdollisia kehityskulkuja ja näyttää konkreettisesti, miten eri päätökset tai teknologiset innovaatiot voivat muovata yhteiskuntaa pitkällä aikavälillä. Tämä lähestymistapa tukee ennakointia, joka ei vain kuvaile tulevaisuutta, vaan myös auttaa aktiivisesti ohjaamaan sitä.

Vaikka tekoäly tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia teknologiaennakointiin, se sisältää myös haasteita. Nostan näistä esiin kolme: Ensimmäinen on se, että **tekoäly mallintaa tulevaisuutta vain menneisyyden perusteella**. Sen analyysit pohjautuvat historialliseen dataan, mikä tarkoittaa, että se ei pysty tunnistamaan muutoksia, jotka eivät vielä näy tietoaineistoissa. Tämä tekee tekoälystä hyödyllisen silloin, kun kehitys on lineaarista ja jatkaa jo havaittuja trendejä. Teknologinen murros on kuitenkin harvoin suoraviivainen prosessi, ja keskeiset innovaatiot syntyvät usein odottamattomilla tavoilla ja ennakoimattomista suunnista. Tekoälyjärjestelmien kyky ennustaa tulevaisuutta on edelleen ihmistä heikompaa[18].

Toinen merkittävä haaste liittyy kielimalleihin, jotka **tekevät ennakoinnista liian vakuuttavaa**[19]. Suuri osa tekoälypohjaisesta ennakoinnista perustuu kielimalleihin, jotka tuottavat sujuvia ja loogisilta kuulostavia narratiiveja. Näiden tekstien vakuuttavuus ei kuitenkaan ole tae niiden paikkansapitävyydestä. Koska kielimallit perustuvat todennäköisyyksiin eivätkä ymmärrä sisältöä syvällisesti, ne voivat tuottaa uskottavan oloisia, mutta virheellisiä tai perusteettomia ennusteita. Tämä voi olla erityisen ongelmallista päätöksenteossa, jossa näennäisesti ”älykkäät” analyysit voivat vaikuttaa ohjaavan päätöksiä ilman, että niiden taustalla olevia oletuksia kyseenalaistetaan riittävästi.

Kolmas haaste liittyy teknologiaennakointiin sisäänrakennettuihin oletuksiin, erityisesti teknologian kasvumalleihin. Monet ennakointimallit nojaavat ajatukseen, että teknologia kehittyy lineaarisesti ja ennustettavasti, noudattaen esimerkiksi logistista kasvukäyrää. Todellisuudessa teknologinen kehitys on kuitenkin usein kaoottista ja epälineaarista, ja siihen vaikuttavat moninaiset yhteiskunnalliset, taloudelliset ja geopoliittiset tekijät. Uudet teknologiat eivät välttämättä leviä ennustetulla vauhdilla, ja toisaalta odottamattomat innovaatiot voivat mullistaa olemassa olevat kehityspolut nopeammin kuin osattiin ennakoida. **Tämä tekee teknologisten murrosten ennustamisesta haastavaa ja asettaa rajoitteita tekoälyn kyvylle ennakoida tulevaisuutta luotettavasti.**

Jos haluamme hyödyntää tekoälyä teknologiaennakoinnissa vastuullisesti, on tunnistettava sen rajoitteet ja kehitettävä järjestelmällisiä tapoja korjata sen harhoja. Tekoälyn analyysit ovat hyödyllisiä, mutta ne eivät ole erehtymättömiä, ja siksi niitä tulee täydentää ja haastaa muilla menetelmillä. On tärkeää, että emme sokeasti luota tekoälyn tuottamiin ennusteisiin, vaan arvioimme niitä kriittisesti ja etsimme tapoja parantaa niiden luotettavuutta. Ratkaisuja haasteisiin on kehitteillä. Esimerkiksi, voimme yhdistää tekoälyn ja poikkeamien analyysin. Sen sijaan, että tarkastelisimme vain tekoälyn tuottamia ennusteita, meidän tulisi analysoida myös sitä, mitä tekoäly ei osaa ennustaa. Tämä tarkoittaa, että **on tärkeää tarkastella järjestelmällisesti ne ilmiöt ja muutokset, jotka jäävät tekoälyn analyysien ulkopuolelle.** Näiden poikkeamien tunnistaminen voi auttaa hahmottamaan, missä tekoäly toimii hyvin ja missä sen ennusteisiin liittyy suuria epävarmuuksia.[20]

---

[18] Pratt, S., Blumberg, S., Carolino, P. K., & Morris, M. R. (2024). Can Language Models Use Forecasting Strategies?. *arXiv preprint arXiv:2406.04446*.

[19] kts esim Khan, A., Hughes, J., Valentine, D., Ruis, L., Sachan, K., Radhakrishnan, A., ... & Perez, E. (2024). Debating with more persuasive llms leads to more truthful answers. *arXiv preprint arXiv:2402.06782*.

[20] kts esim. Bresinsky, M., & Hager, E. (2024). ChatGPT for futures: how large language models can support the development of future scenarios using the Cone of Plausibility.

Toinen keskeinen kehityskohde on järjestelmien rakentaminen, jotka haastavat tekoälyn oletukset. **Tekoälyn ei tulisi vain jatkaa nykyisiä trendejä ja toistaa historiasta opittuja malleja, vaan sen pitäisi pystyä arvioimaan myös näiden trendien mahdollisia murtumispisteitä.** Tämä edellyttää järjestelmiä, jotka pystyvät tunnistamaan epäjatkuvuuskohtia[21] ja arvioimaan, missä teknologian kehitys voi poiketa vakiintuneista kaavoista.

Kolmas olennainen näkökulma on **ennakointimenetelmien moninaisuuden lisääminen.** Poliittisen päätöksenteon ja strategisen suunnittelun tulisi perustua monimenetelmäiseen tarkasteluun, jossa tekoäly toimii vain yhtenä osana kokonaisuutta. Perinteiset ennakointimenetelmät, kuten asiantuntija-arviot, skenaariotyöskentely ja aikasarja-analyysit, voivat tarjota arvokasta kontekstia tekoälyn tuottamille ennusteille. Näiden yhdistäminen mahdollistaa kokonaisvaltaisemman ja moniulotteisemman käsityksen tulevaisuuden kehityksestä.

Tekoäly on hyvä renki, mutta huono isäntä – sen tuottama analyysi voi täydentää päätöksentekoa, mutta sitä ei pidä nähdä ainoana totuuden lähteenä. Tekoäly ei poista tulevaisuuden epävarmuutta, vaan ainoastaan järjestää menneisyyden tietoa uudelleen. Siksi on ensiarvoisen tärkeää, että teknologiaennakointi perustuu monipuoliseen ja kriittiseen tarkasteluun, jossa tekoäly on yksi työkalu muiden joukossa.

Kaarinassa 24. helmikuuta 2025

Professori Arho Suominen
Tutkimusprofessori
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

[21] Tarkemmin epäjatkuvuuskohdista kts. Phillips, F., Hwang, G. G., & Limprayoon, P. (2016). Inflection points and industry change: Was Andy Grove right after all?. *Journal of Technology Management for Growing Economies*, 7(1), 7-26.