

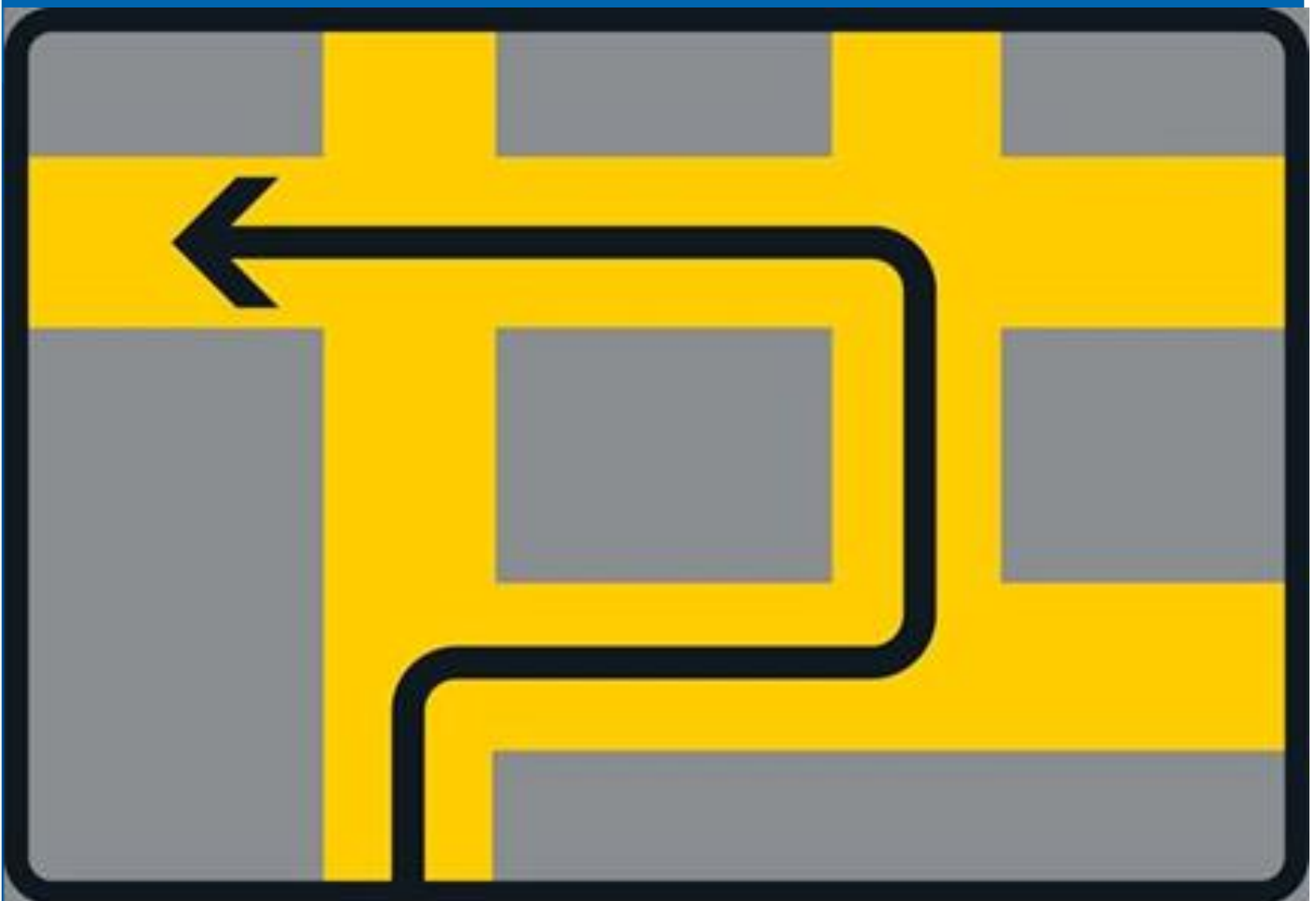


Väylävirasto  
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisuja  
2/2022

## Väyläverkon resilienssi

Analyttinen tarkastelu





Lauri Ojala, Pekka Leviäkangas

# **Väyläverkon resilienssi**

Analyyttinen tarkastelu

Väyläviraston julkaisuja 2/2022

Verkkajulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-317-938-7

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

puh. 0295 343 000

**Lauri Ojala, Pekka Leviäkangas: Väyläverkon resilienssi – Analyttinen tarkastelu.** Väylävirasto Helsinki 2022. Väyläviraston julkaisuja 2/2022. 74 sivua ja 2 liitettä. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-938-7.

**Avainsanat:** Väyläverkon resilienssi, resilienssi, mittaus, ylläpito, hankearviointi

## Tiivistelmä

Tämä raportti käsittelee väyläverkoston resilienssiä. Se on yleisselvitys, joka nojautuu tuoreeseen tutkimuskirjallisuuteen sekä aihepiiristä julkaistuun kansainväliseen ja kotimaiseen dokumentaatioon. Raportissa esitetään

- väyläverkon resilienssin kehittämisen konteksti yleisesti ja Suomessa,
- resilienssin eli häiriösietokykyisen väyläverkon merkitys,
- resilienssin keskeiset määritelmät ja indikaattorit, ja
- väyläverkon resilienssin mittaamisen ja hallinnan menetelmiä sekä niiden soveltuvuutta Suomen väyläverkkoon.

Raportti on suunnattu erityisesti liikennejärjestelmän parissa työskenteleville julkisen ja yksityisen sektorin asiantuntijoille ja organisaatioille, joiden tehtävänä on liikenneinfrastruktuurin rahoitus, suunnittelu, rakentaminen, ylläpito ja päätöksenteko.

Resilienssin määritelmiä on useita, mutta täsmällistä ja yleispätevää määritelmää sille ei ole. Termillä tarkoitetaan yleensä järjestelmän kykyä vastustaa sen toimivuudelle haitallisia ilmiöitä sekä sen kykyä toipua niistä nopeasti ja mahdollisimman vähin vaurioiden. Resilienssi voidaan nähdä myös käänteisarvona haavoittuvuudelle, joka muodostuu seuraavista osista: altistuminen, herkkyyden ja sietokyky.

Keskeisiä kysymyksiä, joihin tämä selvitys pyrkii osin vastaamaan, ovat seuraavat:

- Mikä on kohteen tarkastelutaso ja tarkastelun ajallinen ulottuvuus?
- Resilienssin luonne: tarkastellaanko äkillisiä tapahtumia vai hitaasti etenevää järjestelmän toimivuuden rapautumista? Myös kerrannaisvaikutukset (dominoefektit), osajärjestelmien keskinäisriippuvuudet ja erilaiset hybridiuhat ovat tärkeitä näkökulmia.
- Kuinka suuri tai kriittinen järjestelmän toimintakyvyn romahdus tai aleneminen voi olla, ja keihin tai mihin haittavaikutukset kohdistuvat?
- Miten ja kuinka nopeasti toivutaan normaalitasoiseen toimintaan tai riittävän lähelle sitä?
- Millä tavoin [väyläverkon] resilienssiä voidaan arvioida ja kehittää?

Väyläverkon toimivuus on yhteiskunnan toiminnan keskeinen edellytys, samalla kun tunnistettujen kriittisten keskinäisriippuvuuksien määrä kasvaa. Esimerkiksi henkilö- ja tavaraliikenne ovat täysin riippuvaisia energian saannista ja toimivista tietoliikenneyhteyksistä ja -palveluista. Keskinäisriippuvuuksien häiriöitä voimistavien vaikutusten ehkäisy on tärkeää kokonaisresilienssin hallinnassa.

Suomessa ei juuri ole vaikutuksiltaan katastrofaalisia sään tai yhteiskunnan ääri-ilmiöitä. Siksi väyläverkon resilienssin vahvistamisen toimenpiteet liittyvät meillä pääosin väylästä kulumisen ja vuodenaikojen vaihtelun aiheuttamien vaurioiden

sekä rakenteiden epänormaalin rapautumisen estämiseen osana ns. ”kovan resilienssin” ylläpitoa.

Suomen liikennehallinnon osaaminen, prosessit, johtaminen ja jopa taloudelliset resurssit, eli ns. ”pehmeä resilienssi” ovat Euroopan kärkitasoa. Edellytykset entistä tehokkaampaan ja vaikuttavampaan resilienssin hallintaan ovat siis hyvät, jos se tie halutaan valita. Tämä tie vaatii liikennehallinnon toimien lisäksi myös koulutus- ja tutkimuspanostuksia.

Resilienssi-käsitteen jalkauttaminen väyläverkon hallintaan, hankesuunnitteluun ja erityisesti rahoitushakuihin myös Suomessa on oleellista, sillä käsite on vakiintunut kiinteäksi osaksi alan kansainvälistä terminologiaa. Sisällöllisesti teema on Suomessa hyvin hallussa, mutta itse käsitteen käyttöön ja hyödyntämiseen tulee kiinnittää huomiota.

**Lauri Ojala, Pekka Leviäkangas: Resiliens av transportinfrastruktur – En analytisk studie.** Trafikledsverket. Helsingfors 2022. Trafikledsverkets publikationer 2/2022. 74 sidor och 2 bilagor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-938-7.

## Sammanfattning

Denna beskrivande studie är baserad på den senaste forskningslitteraturen och annan publicerad dokumentation om transportinfrastrukturens resiliens. Syftet är att presentera:

- sammanhanget för transportnätets resiliens i allmänhet och i Finland,
- betydelsen av en resiliens transportinfrastruktur för samhällen,
- de viktigaste definitionerna och indikatorerna för transportinfrastrukturens resiliens, och
- metoder som används att mäta och kontrollera resiliensen hos transportnätverken och evaluera deras lämplighet för de finländska förhållandena.

Rapporten riktar sig särskilt till experter och organisationer inom den offentliga och privata sektorn som arbetar med finansiering, planering, byggande, underhåll av transportsystem och beslutsfattande rörande detsamma.

Det finns flera definitioner av resiliens, men någon exakt definition finns ej. Termen syftar vanligtvis på ett systems förmåga att motstå fenomen som är skadliga för det och att snabbt och med minsta möjliga skada återhämta sig från dem. Begreppet kan också ses som det omvända till termen sårbarhet som består av följande komponenter: exponering, känslighet och tolerans. Nyckelfrågorna som denna rapport delvis försöker besvara är t.ex. det följande:

- Vilken är nivån på observation (t.ex. ett [del]system, samhälle) och tidsdimensionen?
- Resiliens mot vad? Plötsliga händelser vs. långsam förvittring? Motverka hybridhot? Hur skall man hantera systemiska kritiska ömsesidiga beroenden och dominoeffekter?
- Hur stora är handikappen av en oönskad händelse och för vem/vilka är de betydande?
- Hur snabbt återhämtar sig systemet från en oönskad händelse till en normal nivå?
- Hur kan resiliensen hos transportnätverket bedömas och utvecklas?

En fungerande transportinfrastruktur är en central förutsättning för att samhället ska fungera samtidigt som antalet kritiska ömsesidiga beroenden ökar. T.ex. person- och godstransporter är så gott som helt beroende av energiförsörjning och väl fungerande teleförbindelser och tjänster. Därför är det viktigt att motverka de förstärkande effekterna av ömsesidigt beroende.

Det förekommer knappast några katastrofala extremväder eller motsvarande sociala fenomen i Finland. Därför är åtgärderna för att stärka transportinfrastrukturens resiliens främst relaterade till förebyggande av skador orsakade av normalt slitage och onormal vittring av konstruktioner som en del av arbetet att upprätthålla s.k. "hård resiliens".

---

Kompetens, processer, ledning och till och med ekonomiska resurser hos finländska transportadministration, dvs. den "mjuka resiliensen" är på toppnivå i Europa. Förutsättningarna för en effektivare hantering av resiliens är därför goda om den vägen ska väljas. Utöver trafikadministrationens verksamhet kräver dess underhåll även satsningar inom utbildning och forskning.

Den snabba implementeringen av begreppet resiliens inom styrning och projektplanering av transportinfrastruktur jämte finansieringsansökningar är också viktigt i Finland, eftersom konceptet har blivit en integrerad del av branschens terminologi, t.ex. inom EU och i många andra internationella sammanhang. Innehållsmässigt är temat mycket väletablerat inom branschen i Finland, men det är inte själva användningen av begreppet.



**Lauri Ojala, Pekka Leviäkangas: Resilience of transport infrastructure – A conceptual analysis.** Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2022. Publications of the FTIA 74 pages and 2 appendices. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-938-7

## Abstract

This report focuses on resilience of transport infrastructures. It relies on recent academic and professional literature and other trustworthy documentation, and discusses the:

- context of transport network resilience, both in general and in Finland in particular;
- importance of a resilient transport infrastructure for the society;
- main definitions and indicators of transport infrastructure resilience, and
- methods for measuring and controlling the resilience of transport infrastructure networks and their applicability to Finnish conditions.

The report targets at public and private sector experts and organizations working in transport system financing, planning, construction, maintenance, and decision-making.

There are several definitions of resilience, but none universal nor exact. The term usually refers to the ability of a system to resist phenomena that are harmful to it, and to recover from adverse impacts with the least possible damage. The concept of resilience can also be seen as the inverse of vulnerability, which, in turn, comprises the following components: exposure, sensitivity, and tolerance. The key questions in this context are the following:

- What are the appropriate levels of analysis and time horizon under consideration?
- Resilience to what? Is the focus on sudden events or on slower degrading processes? Also cascading effects, systemic interdependencies and hybrid threats are valid issues.
- How substantial is the incapacity/disability caused by an adverse event, and to who or which are the groups, activities or organizations particularly affected?
- How quickly is the system able to recover from an adverse event to an acceptable performance level, and what needs to be done to facilitate the recovery?
- How can resilience of transport infrastructures be assessed, developed and managed?

A well-performing transport infrastructure is a key prerequisite for the society. At the same time, critical interdependencies are ever more present. For example, passenger and freight transport are completely dependent on energy supply and reliable telecommunications systems and services. Preventing the amplifying effects of interdependencies in cases of crises and malfunctions is of high importance.

There are few identifiable extreme weather or social phenomena in Finland that could be of catastrophic scale. Therefore the measures to strengthen resilience of

transport infrastructure mainly concern the mitigation of technical degradation of critical structures and networks, that is, referring to 'hard resilience'.

The competencies, processes, managerial tools and even financial resources of transport administration in Finland ("soft resilience") are adequate, and at the top level in Europe. The preconditions for effective resilience management are therefore well established. Maintaining good soft resilience requires investments also in education and research.

The concept of resilience is now widely used in the EU and worldwide, and it has become an essential attribute when prioritising infrastructure projects and funding. Even though resilience is well diffused in the practices of Finnish transport infrastructure management, the utilisation and operationalisation of the concept as a key decision-making and fund-directing argument is still inadequate. Better national adoption of the concept is called for.

---

## Esipuhe

Liikennetekniikan vaihtuvan opintojakson vieraileva yhdysvaltalainen luennoitsija oli 1990-luvun alussa vaikuttanut Helsingin seudun joukkoliikennejärjestelmästä. Erityisesti hän kehui järjestelmän resilienssiä. Teekkarit oppivat tuolloin, että resilienssiä järjestelmä toimii, vaikka sen jossain osassa olisi häiriö.

Keväällä 2021 iso konttilaiva tukki Suezin kanavan kuudeksi päiväksi. Pääsyä kanavan läpi jonotti yli 400 laivaa, koska vaihtoehtoista reittiä ei käytännössä ole. Väyläverkon puutteellisesta resilienssistä aiheutui kuukausien häiriöt logistisiin järjestelmiin, mikä näkyi osittain tyhjinä hyllyinä suomalaisissakin kaupoissa.

Väyläviraston vastuulla ovat Suomen valtion tiet, rautatiet ja vesiväylät. Virastossa heräsi vuonna 2020 ajatus selvittää, miten väyläverkkojen kokonaisuuden resilienssiä voisi arvioida ja kehittää. Vastaavaa selvitystä ei aiemmin ole tehty Suomen väyläverkosta. Tavoitteena oli löytää analyttisiä keinoja, joita voisi hyödyntää väyläverkon ja sen kehittämisen arvioinnissa.

Logscale oy on toteuttanut vuonna 2021 projektin Väyläverkon resilienssi – Analyttinen tarkastelu, jonka tulos tämä raportti on. Raportin ovat kirjoittaneet logistiikan professori Lauri Ojala sekä väylä- ja liikennetekniikan professori Pekka Leviäkangas. Raportin työstössä heitä ovat avustaneet KTM Alekski Paimander ja tekn. yo. Ilona Kairinen.

Työtä ovat ohjanneet Väylävirastosta Jari Gröhn, Tapio Ojanen, Arto Muukkonen ja Vesa Männistö.

Helsingissä tammikuussa 2022

Väylävirasto  
Liikenneverkkojen suunnittelu

## Sisältö

1	JOHDANTO.....	12
1.1	Työn taustaa .....	12
1.2	Selvityksen tarkoitus.....	15
1.3	Metodologia.....	15
1.4	Raportin rakenne ja kohdeyleisö.....	16
2	VÄYLÄVERKON RESILIENSSI: KESKEISET MÄÄRITELMÄT .....	17
2.1	Resilienssin määrittelyminen .....	17
2.2	Resilienssi, haavoittuvuus ja kestävyys.....	20
2.3	Vaarat, riskit ja joustavuus.....	21
2.4	Resilienssin ulottuvuudet ja periaatteet .....	23
2.5	Monimutkaiset keskinäiset riippuvuudet .....	27
2.5.1	Väyläverkon keskinäisriippuvuuksien havainnollistus .....	27
2.5.2	Väyläverkon suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon keskinäisriippuvuudet.....	28
3	MITÄ ON VÄYLÄVERKON RESILIENSSI? .....	30
3.1	Resilienssi mihin? .....	30
3.2	Sääolojen vaikutuksia infrastruktuuriin .....	31
3.3	Ilmasto- ja sääolojen vaikutus väyläverkon resilienssiin erityisesti Suomen tilanteessa.....	32
3.4	Kriittinen infrastruktuuri ja hybridiuhat .....	34
3.5	Yhteenveto .....	37
4	VÄYLÄVERKON RESILIENSSIN MITTAAMISEN JA HALLINNAN MENETELMIÄ.....	39
4.1	Yleisesti väyläverkon resilienssin mittaamisesta.....	39
4.2	Mittaamisen teoriasta väyläverkkojen resilienssiin liittyen.....	41
4.2.1	Metrologia .....	41
4.2.2	Verkko- eli graafiteoria.....	41
4.2.3	Väyläverkon resilienssin laadullinen mittaaminen .....	42
4.3	Esimerkkejä väyläverkon resilienssin mittareista.....	43
4.3.1	Äärisään riski-indikaattori Extreme Weather Risk Indicator (EWRI).....	43
4.3.2	Maailmanpankin ja Kioton yliopiston kehittämä tieprojektin resilienssimittaristo. ....	45
4.4	Resilienssin viitekehyksiä .....	46
4.4.1	Käsitteelliset lähestymistavat .....	46
4.4.2	Kansallisia konteksteja .....	47
4.4.3	Kvantitatiiviset lähestymistavat .....	47
4.4.4	Resilienssiin läheisesti liittyviä standardeja .....	48
4.5	Yhteenveto .....	49
5	LIIKENNEJÄRJESTELMÄN RESILIENSSIN ARVIOINNIN KONTEKSTI SUOMESSA .....	51
5.1	Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma ja muut keskeiset ohjausasiakirjat.....	51
5.2	Haasteet resilienssin suunnittelussa .....	52
5.2.1	Hyöty-kustannusmallin päivittäminen resilienssin huomioimiseen ..	53
5.2.2	Resilienssin sisällyttäminen hankearviointiin .....	53
5.2.3	Kustannustyyppien eriyttäminen tai tarkempi jako.....	55

---

5.3	Resilienssin mittarit ja periaatteet .....	57
5.3.1	Väylästäön kunto .....	57
5.3.2	Väylästäön ja liikkumispalveluiden yhteenkytkeytyvyys .....	58
5.3.3	Liikenneverkon peittävyys .....	58
5.4	Resilienssi-käsite kansainvälisessä hankerahoituksessa .....	62
5.5	Yhteenveto .....	64
6	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	65
6.1	Resilienssin määritelmiä ja ulottuvuuksia .....	65
6.2	Väyläviranomaisen toimintavaihtoehtoja .....	66
6.3	”Kova” ja ”pehmeä” resilienssi .....	66
6.4	Mittaristojen kehittäminen resilienssin arviointiin .....	67
6.5	Resilienssin sisällyttäminen hankearviointiin .....	68
6.6	Resilienssi-käsitteen merkitys hankerahoituksessa ja viestinnässä .....	69
	LÄHDELUETTELO .....	70

#### LIITTEET

- Liite 1 Henkilö-, tavara-, energia- ja tietovirtojen perusinfrastruktuurin keskinäisriippuvuuksia havainnollistava HETI©-malli
- Liite 2 Kuvion 14 selitteet

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn taustaa

Liikenteen väyläinfrastruktuurin toimintavarmuus ja sietokyky erilaisia uhka- ja vahinkotekijöitä vastaan on noussut esiin erityisesti kahdesta näkökulmasta. Yhtäältä tietoisuus ilmastonmuutoksen ja sitä seuraavien äärisääilmiöiden vaikutuksesta liikenneinfrastruktuuriin on lisääntynyt ja merkkejä äärisääilmiöiden yleistymisestä on jo havaittu.

Toisaalta 2000-luvun alkuvuosikymmeninä on ollut käynnissä nopea ja yhä nopeutuva teknologinen murros, joka tulee vaikuttamaan syvällisesti niin liikkumiseen, liikennevälineisiin kuin liikenteen käyttövoimiin. Keskeisenä teknologisenä muutosalajina on tieto- ja viestintätekniikan ja niiden sovellusten nopeasti laajeneva käyttö liikkumisen ja liikenteen palveluksessa. Tämän lisäksi erityisesti ilmastonmuutoksen ja ympäristösääntelyn kautta paine siirtyä fossiilittomaan liikenteeseen kasvaa, mikä tulee muuttamaan liikenteen käyttövoimia kaikissa liikennemuodoissa.

Kaikki nämä muutokset liittyvät kiinteästi liikennejärjestelmien toimivuuteen sekä väyläverkon ohjaukseen, suunnitteluun, rakentamiseen ja rahoitukseen. Muutokset vaikuttavat myös liikennevälineiden ja liikenteen käyttövoimien markkinoihin sekä käyttövoimien jakeluinfrastruktuuriin ja -palveluihin.

Samalla liikenneinfrastruktuurin rahoitus suhteessa vaadittuihin väyläverkon ylläpito- ja korjauskustannuksiin on pitkään ollut tarvetta pienempi. Tämä kehitys on ollut havaittavissa lähes kaikissa kehittyneissä maissa, ja hyvin selvästi myös Suomessa.

Rahoitusvaje on johtanut väyläverkoston rapautumiseen, korjausvelan kasvuun ja sitä kautta entistä haavoittuvampaan verkkoon. Tämä kehitys on nostanut resilienssin – eli kyvyn sietää häiriöitä ja palautua niistä - yhdeksi tulevien vuosien ja vuosikymmenten oleelliseksi teemaksi väyläverkkojen ylläpidossa ja kehittämisessä.

Eräänä lisänäkökulmana on myös ihmisten aiheuttamat – joko tietoiset tai tiedostamattomat – vahingot väyläverkolle tai sen toimivuudelle. Onnettomuudet, terrorismi, vandalismi ja piittaamattomuus ovat niin ikään riskejä, joiden vaikutukset väyläverkon kuntoon ja toimivuuteen eivät kuitenkaan ole yhtä vakavia kuin edellä mainitut äärisääilmiöt ja verkoston kunnon rapautuminen.

OECD:n International Transport Forumin (ITF 2016) mukaan varautuminen väyläverkon kohtaamiin riskeihin ja uhkatekijöihin, erityisesti ilmastonmuutokseen ja äärisääilmiöihin liittyen, olisi aloitettava viipymättä. Samalla kunnossapidon merkitys korostuu sietokykyä lisäävänä strategisena toimenpiteenä. Tämän lisäksi raportissa esitettiin lukuisia muitakin toimenpiteitä ja varautumisstrategioita.

”Liikenneinfrastruktuuri on ensimmäinen sosiaalisen kytkeytymisen väline”, todetaan vastaavasti IDRRIM:n (The Institute for Roads, Streets and Infrastructures for Mobility) raportissa (IDRRIM 2017). Varsinkin tieinfrastruktuurin kriittinen rooli on tunnistettavissa, kun huomioidaan liikennesuorituksen jakautuminen, verkkojen

kattavuus ja yhdistävyys kaikkien liikennemuotojen osalta – väheksymättä muiden verkkojen merkitystä.

Esimerkkinä voi mainita myös vuoden 2019 G20-kokouksen Japanissa, jossa infrastruktuurien resilienssiin liittyvät kysymykset olivat vahvasti esillä. Erityisesti painotettiin riittäviä panostuksia liikenneverkkojen toimintavarmuuteen ja resilienssiin, koska nähtiin että liikenneverkkojen sietokyky ja kestävyys oli kytkeytynyt koko yhteiskunnan sietokykyyn ja kestävyyteen (Evans ym. 2019; ks. myös Maailmanpankin (2019) [julkaisu](#) aiheesta).

Kun väyläverkon osa lakkaa toimimasta tarkoitetulla tavalla ja palvelutasolla, ovat seuraukset sekä välittömät että välilliset. Välittömiin seurauksiin lukeutuvat kuljetusten ja matkojen viiveet ja niistä aiheutuneet lisäkustannukset. Välillisiin kustannuksiin lukeutuvat tuotannonmenetykset, erilaiset sählinkikustannukset, sekä mahdolliset jälkiseuraamukset kuten sopimussakot ja erilaiset hallintokustannukset. Näillä kaikilla on merkitystä kansantalouden tehokkuuteen mutta myös yleiseen luottamukseen väylillä tapahtuvien kuljetusten ja matkojen toimintavarmuuteen. Mikäli luotettavuus kyseenalaistetaan, on seurauksena erilaisten varausten ja preemioiden lisääminen esimerkiksi kuljetuskustannuksiin.



*Kuvio 1. Liikennejärjestelmään kytkeytyvät nykyään paikannusjärjestelmät, turvallisuusjärjestelmät, erilaiset matkustajien ja operaattoreiden palvelujärjestelmät, kalustojen hallinta, tiedonvälitysjärjestelmät, liikenteenohjausjärjestelmät, maksujärjestelmät, sekä liikennemuotoja toisiinsa kytkevät järjestelmät (ETSI1 päiväämätön); tämän lisäksi tulevat ihmisten ja laitteiden IoT (Internet of Things), jotka kytkeytyvät niin ikään liikennejärjestelmään, sekä uusien käyttövoimien jakeluinfrastruktuurit (esim. sähkö).*

<sup>1</sup> ETSI on yksi Euroopan standardointiorganisaatioista. Muita ovat CENELEC ja CEN.

Tieto- ja viestintätekniikka (TVT) on yhä kiinteämmin kytkeytynyt perinteiseen väyläverkostoon. Voidaan sanoa, että TVT on jo integroitunut väyläverkostoihin siinä määrin, että niistä on tullut väylien hallinnan kriittinen osa. Kyberuhat, -rikollisuus ja -terrorismi muodostavat täten yhden haavoittuvuuden dimension, joka on otettava huomioon väylien resilienssiä rakennettaessa ja parantaessa. Liikenteen automaation ja digitalisaation lisääntyessä tulee kyberturvallisuudesta yhä tärkeämpi resilienssin elementti (Kuvio 1).

Kaikkiin väyläverkostoon kohdistuvat uhat ovat myös liikenneturvallisuusuhkia. Kun väylien ja niiden muodostaman verkon toimintakyky alenee tai romahtaa, niin vaarantuu liikenneturvallisuuskin. Esimerkiksi EU:n 7. puiteohjelman EWENT<sup>2</sup>-hanke arvioi, että EU-27-alueella äärisääilmiöiden aiheuttamat kustannukset liikenne-sektorille olisivat yli 12 mrd. EUR vuodessa (vuoden 2010 hintataso). Suurin osa näistä on tieliikenteen onnettomuuskustannuksia (Nokkala ym. 2012).

Toimiva väyläverkko ei ole kuitenkaan pelkästään tekninen kysymys. Se on myös yhteiskunnan toimivuutta ja ennustettavuutta heijasteleva tekijä. On epäuskottavaa puhua vaikkapa osaamistaloudesta ja tietoyhteiskunnasta elleivät perusrakenteet, kuten väyläverkosto, ole asianmukaisessa kunnossa ja kaikissa ennakoitavissa olosuhteissa luotettavia.

Väyläverkko palvelee koko yhteiskuntaa ja kaikkia sen eri käyttäjäryhmiä; se mahdollistaa ihmisten ja ajoneuvojen liikkuvuuden sekä yksityisen ja julkisen sektorin toimijoiden materiaalien ja palveluiden sujuvan saatavuuden (Kuvio 2).

**TOIMINNAN TASO**

		Väyläverkon käyttäjät ajoneuvoineen, eli koti- ja ulkomaiset yksityishenkilöt ja yritykset sekä julkisen sektorin toimijat					
Ajoneuvo-, kalusto- ja matkustajavirta	Ylärakenteet ja infrastruktuuri-palveluista vastaavat tahot (liikenteenohjausjärjestelmät, suprastruktuuri)	Kunnat ja osin yksityinen sektori	Valtio ja valtionyhtiö Fintraffic Tie Tieliikenneviranomaiset	Valtionyhtiö Fintraffic Raide Asemien omistajat Väylävirasto, Senaatti, kunnat, VR, yksityiset	Valtionyhtiö Fintraffic VTS Merivoimat, RVL Vesiväylien omistajat Väylävirasto Jäänmurto: Arctia	Kunnalliset satamayhtiöt Teollisuus-satamat Yksityiset satama-operaattorit	Valtionyhtiö Fintraffic ANS Valtio (Finavia), kuntia
	”Kova” perusinfrastruktuuri	Kunnat	Valtio yleisten teiden omistajana (Väylävirasto, ELY:t)	Valtio rataverkon omistajana (Väylävirasto)	Valtio yleisten vesiväylien omistajana (Väylävirasto); vesiväylien muut omistajat	Kunnalliset yhtiöt, teollisuus-satamat	Valtio (Finavia), kuntia
		Katuverkko	Maantiet	Rautatiet	Vesiväylät	Satamat	Lentokentät ja ilmatila

Kuvio 2. Pelkistys Suomen väyläverkosta sekä sen keskeisistä sidosryhmistä ja käyttäjistä. Fintraffic Oy:n liikenteenohjaustoimintaa, lentokenttiä hallinnoivaa Finavia Oy:tä sekä jäänmurto- ja vesiväyläpalveluja tuottavaa Arctia Oy:tä lukuun ottamatta muita lukuisia infrastruktuuripalveluiden tuottajia ei ole sisällytetty kuvioon.

<sup>2</sup> EWENT, [Extreme Weather impacts on European Networks of Transport](#)



Selvityksen kohteena olevan aiheen merkityksen voi tiivistää seuraavasti:

Yhteiskunta, jonka liikenne ja perusrakenne ovat häiriöherkkiä, ei ole toimiva eikä tehokas.

## 1.2 Selvityksen tarkoitus

Toimeksiannon mukaisesti tämän selvityksen tarkoituksena on:

1. esittää väyläverkon resilienssin kehittämisen konteksti yleisesti ja Suomessa,
2. tarkastella sietokykyisen (resilientin) väyläverkon merkitystä,
3. esittää väyläverkon resilienssin keskeiset määritelmät ja indikaattorit,
4. arvioida väyläverkon resilienssin mittaamisen ja hallinnan menetelmiä ja soveltuvuutta Suomeen, ja
5. havainnollistaa, miten po. menetelmiä voidaan käyttää todellisissa kohteissa.

Yllä olevaa jaottelua on käytetty myös työn jäsentelyssä, mutta hieman eri järjestyksessä.

Raportti on luonteeltaan kartoittava yleisselvitys, joka pyrkii myös esittämään menetelmiä, työkaluja ja mittareita, joita voitaisiin hyödyntää kehitettäessä erityisesti Suomen väyläverkon resilienssiä. Osa näistä toimii myös ehdotuksina harkittavaksi jatkoselvittelyä varten.

## 1.3 Metodologia

Käsillä oleva selvitystyö perustuu kirjallisuuteen ja julkaistuun dokumentaatioon väyläverkon resilienssistä ja sietokyvystä. Materiaali voidaan jakaa karkeasti ottaen kolmeen kategoriaan:

- tieteellinen, vertaisarvioitu kirjallisuus, joka on pääsääntöisesti kerätty alan tutkimusartikkeleista
- ns. harmaa kirjallisuus, johon kuuluvat vertaisarvioimattomat raportit ja julkaisut, kuten konsulttiraportit, hallinnon eri tasojen tuottamat julkaisut, sekä kolmannen sektorin (esim. kansalaisjärjestöt) tuottama materiaali;
- mediasta kerätty aineisto, kuten uutiset.

Materiaalia on kuitenkin hyödynnetty vain luotettaviksi katsotuista lähteistä, eikä esimerkiksi blogeista, mielipidekirjoituksista tai täysin tunnistamattomista lähteistä.

## 1.4 Raportin rakenne ja kohdeyleisö

Raportti jakaantuu seuraaviin päälukuihin:

### 1. Johdanto

### 2. Väyläverkon resilienssi: keskeiset määritelmät

- Resilienssin ja sitä lähellä olevien käsitteiden avaaminen ja täsmentäminen

### 3. Resilientin (sietokykyisen) väyläverkon merkitys

- Väyläverkon resilienssin merkitys yhteiskunnan toiminnalle
- Väyläverkon systeemiset keskinäiset riippuvuudet ja niiden kytkös resilienssiin

### 4. Mitä on väyläverkon resilienssi?

### 5. Väyläverkon resilienssin mittaamisen ja hallinnan menetelmiä

- Kuvaus indikaattoreista, mittareista, mittaamisesta ja näiden soveltuvuudesta Suomeen
- Esimerkkejä menetelmien käytöstä todellisissa kohteissa

### 6. Johtopäätökset

- Havaintojen synteesi
- Suositukset jatkotoimiksi

Raportti on suunnattu ennen muuta liikennejärjestelmän parissa työskenteleville julkisen ja yksityisen sektorin asiantuntijoille ja organisaatioille, joiden tehtävänä on liikenneinfrastruktuurin rahoitus, suunnittelu, rakentaminen, ylläpito ja näihin liittyvä päätöksenteko.

## 2 Väyläverkon resilienssi: keskeiset määritelmät

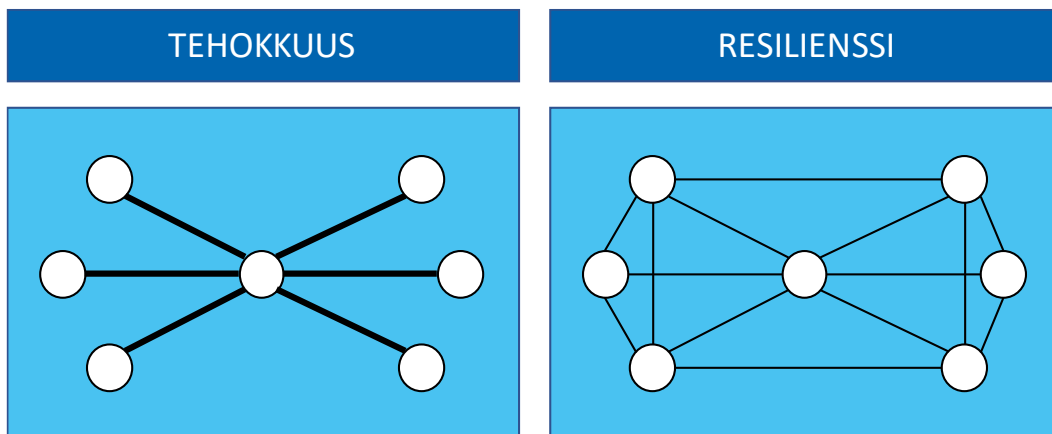
### 2.1 Resilienssin määritteleminen

Resilienssi (engl. resiliency, resilience), on käsitteenä lähtöisin kaukaa (lat. resilio), mutta sen tutkimus johtaa juurensa esim. psykologiaan. Yleisesti termillä ymmärretään kykyä sietää traumoja, stressitilanteita, kriisejä ja kykyä palautua näiden aiheuttamista vahingoista (Hyvönen ym. 2019).

Resilienssi väyläinfrastruktuuriin liittyvänä käsitteenä on tullut keskusteluun lähinnä ilmastonmuutokseen sopeutumisen myötä. On nähty, että väyläinfrastruktuuriin kohdistuu monenlaisia uhkatekijöitä, jotka pitää ottaa väylästäön suunnittelussa, rakentamisessa, ylläpidossa ja hallinnassa huomioon.

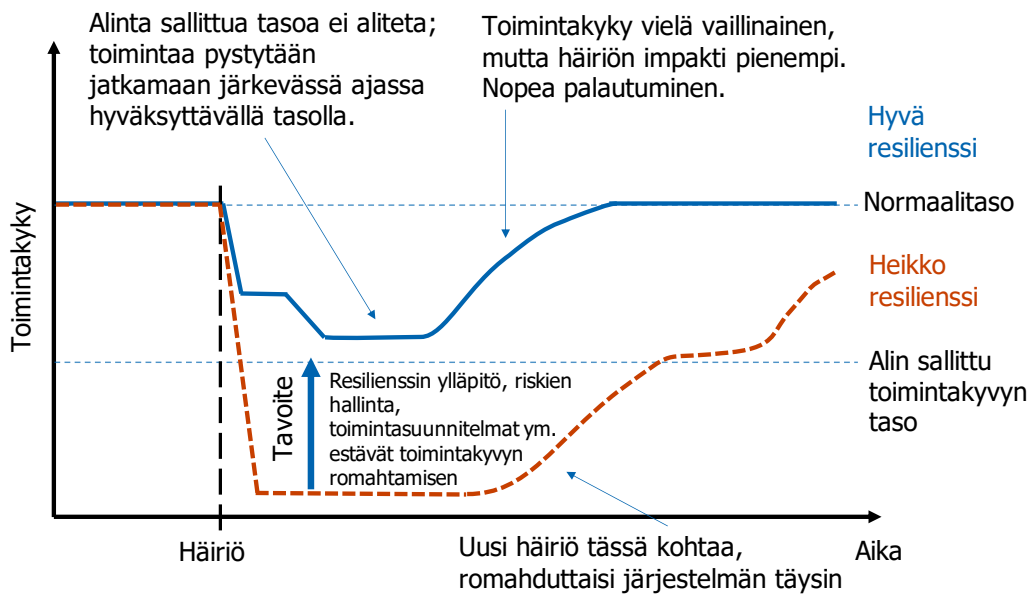
Olemassa olevan väyläverkon rakenne ja yhteenkytkeytyvyys vaikuttaa oleellisesti resilienssin tasoon. Tätä havainnollistaa Kuvio 3, jossa viittä paikkakuntaa yhdistävää liikenneverkkoa voidaan kehittää ja jäsentää eri tavalla riippuen siitä, onko päätavoitteena verkon tehokkuus vai kestävyys.

Tehokkaassa verkossa painopisteenä on kapasiteetin kehittäminen, mikä yleensä johtaa investointien keskittämiseen pääväyliin. Joustavassa eli resilienssissä verkossa prioriteetti on linkkien määrä, mikä mahdollistaa vaihtoehtoisia reittejä, jos yksi tai useampi näistä syystä tai toisesta katkeaisi. Valtakunnan tasolla verkostoja tulisikin kehittää samanaikaisesti tehokkaiksi ja resilienteiksi.



*Kuvio 3. Väyläverkon tehokkuus ja resilienssi yksinkertaisena havainnollistuksena. Lähde: mukailen Rodrigue (2020).*

Resilienssiä havainnollistetaan usein kaaviolla, jossa toimintakyvyn alentumista tai suoranaista romahtamista kuvataan ajan funktiona (Kuvio 4).



Kuvio 4. Havainnollistus resilienssistä systeemistä, joka kykenee vastustamaan haitallisia ilmiöitä ja toipumaan nopeasti (mukaillen Linkov ym. 2014).

Resilienssiin liittyvät oleellisesti kysymykset:

- **Kuinka suuri on haitallisen tapahtuman aiheuttama toimintakyvyn romahdus tai haitta?**
  - Resilientti systeemi, kuten väyläverkosto, ei romahda täysin toimintakyvyttömäksi, vaikka sen rajatun osan, kuten yksittäisen sillan, toimintakyky menetettäisiin, vaan sillä on kyky vastustaa haitallisia ilmiöitä ja pitää yllä jonkinasteista toimintakykyä;
- **Kuinka nopeasti romahduksesta toivutaan normaalitaseeseen toimintaan tai lähelle normaalitasea?**
  - Resilienttiin systeemiin kuuluu oleellisesti nopea toipumiskyky.

Resilienssin rinnalle on noussut käsite "toiminnan jatkuvuus" (engl. business continuity), joka on hyvin lähellä resilienssin käsitettä.

Systeemit, järjestelmät, ovat usein toisiinsa kytkeytyneitä. Tällöin yhden järjestelmän heikko resilienssi saattaa heikentää kokonaisjärjestelmän toimintakykyä. Esimerkiksi liikenteenohjausjärjestelmän lamautuminen heijastuu koko liikennejärjestelmän toimintaan.

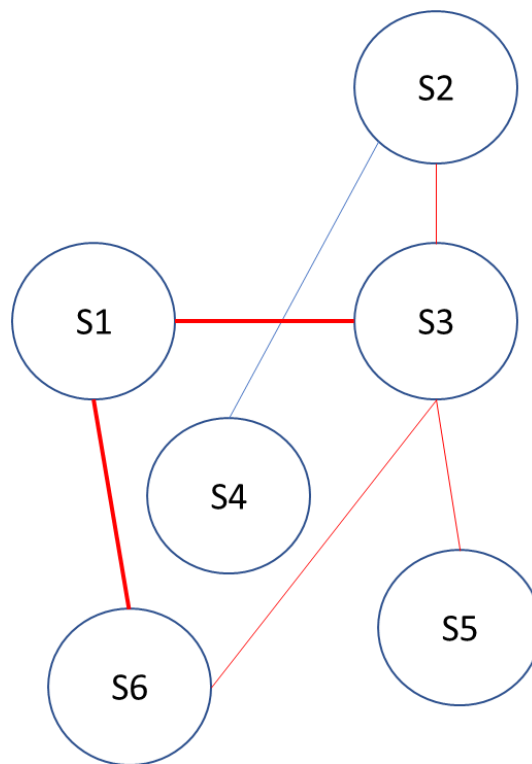
Mitä tiiviimmin osajärjestelmät ovat toisiinsa kytkeytyneitä, sitä haavoittuvammpi kokonaisjärjestelmä voi muodostua. Näin on erityisesti silloin, kun osajärjestelmien toimivuuden välillä on vahva keskinäisriippuvuus. Tällainen keskinäisriippuvuus voi syntyä esimerkiksi yhteisten tieto- tai liikenteenohjausjärjestelmien kautta. Toisaalta laaja järjestelmä voi myös parantaa resilienssiä, jos se tarjoaa vaihtoehtoja tapoja toimia – kuten nopeasti käytettäviä vaihtoehtoisia reittejä – myös häiriötilanteissa.

Tyypillisesti juna- ja lentoliikenteen järjestelmät ovat erittäin pitkälle integroituja. Usein integroituneet järjestelmät mielletään tehokkaiksi, mutta niiden sietokyky

saattaakin olla heikompi, ellei kytkeytyminen ole joustavaa vaikkapa niin, että kytkenät ovat toisiaan korvaavia.

Koska useat nykyaikaiset järjestelmät ovat kytkeytyneitä toisiinsa, puhutaan **systemisestä resilienssistä**. Kytkenät eivät ole välttämättä pelkästään teknisiä, vaan myös taloudellisia ja sosiaalisia (ks. Kuvio 5).

Resilienssiä voidaan tarkastella myös erilaisilla aika-akseleilla. Useimmiten resilienssi mielletään sietokyvyksi äkillisiä, iskunomaisia haitallisia tapahtumia vastaan. Resilienssi voi kuitenkin olla luonteeltaan myös pitkäkestoista sitkeyttä, kun haitalliset ilmiöt ovat olemukseltaan pitkävaikutteisia, toimintakykyä hiljalleen rapauttavia. Esimerkiksi korjausvelan kasvaminen ja liikenneväylästä kunnan heikentyminen alentavat väylästä resilienssiä, eli sen sietokyky alenee, kun ilmasto ja liikennekuormitus rapauttavat sitä.



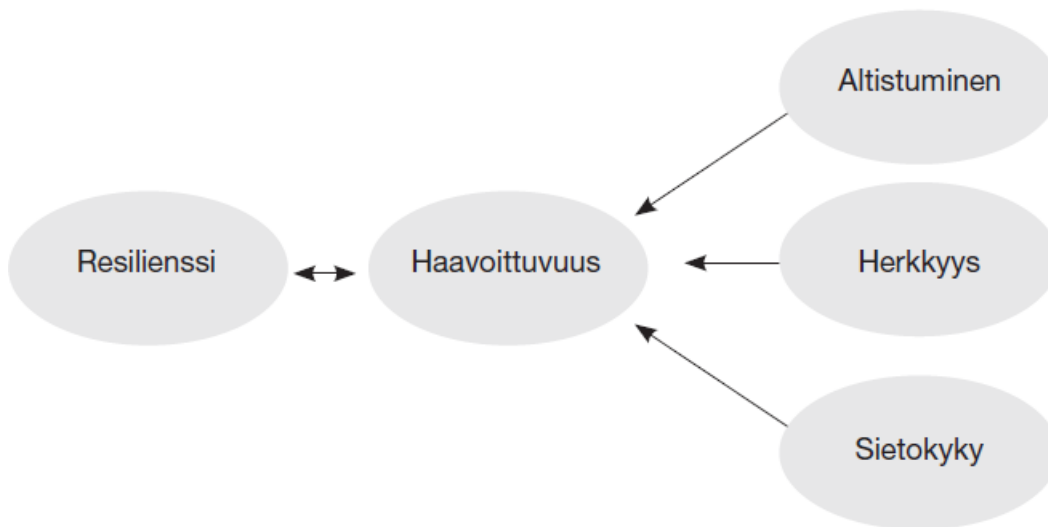
*Kuvio 5. Toisiinsa kytkeytyneet järjestelmät: osajärjestelmän S1 toimintakyvyn estyessä tai vaikeutuessa, ainakin osajärjestelmien S3 ja S6 toiminta kärsii; osajärjestelmät S2, S4 ja S5 voivat mahdollisesti osin toimia riippuen S3:n toimivuudesta ja osajärjestelmien integraation asteesta.*

Fyysinen väyläinfrastruktuuri on pitkäikäistä ja sen elinkaari on yleensä huomattavasti pitempi kuin sitä palvelevan telematiikan ja tietojärjestelmien. Väylien toiminta- ja palvelukyvyyn on kuitenkin oltava riittävä koko niiden elinkaaren ajan. Tästä syystä väyliä pitääkin tarkastella erityisen pitkällä aikajänteellä. Tämä periaate lähtee jo väylien ja niihin liittyvien rakenteiden suunnittelusta päätyen aina elinkaaren loppupään ylläpitoon. Silta, jonka elinikä on 100 vuotta, kohtaa noin 10 %:n todennäköisyydellä sääilmiöitä, joiden toistuvuus on kerran vuosituhannessa.

## 2.2 Resilienssi, haavoittuvuus ja kestävyys

Resilienssi voidaan määrittää useilla tavoilla. Se voidaan ymmärtää esimerkiksi toimintavarmuutta lähellä olevaksi käsitteeksi. Viime kädessä resilienssin määrittely on osin semanttinen kysymys, ja tärkeintä onkin ymmärtää eri käsitteiden keskinäiset riippuvuudet.

Resilienssi voidaan lukea haavoittuvuuden käänteisarvoksi, joka puolestaan muodostuu osatekijöistä altistuminen (exposure), herkkyys (susceptibility) ja sietokyky (coping capacity) (Kuvio 6).



Kuvio 6. Resilienssin käsite ja sen rakentuminen (muokattu lähteestä: Leviäkangas & Aapaoja 2015).

Disaster Reduction Institute (UNISDR 2009) on määritellyt muuttujat seuraavasti:

- **haavoittuvuus:** yhteisön, järjestelmän tai omaisuuden piirre, joka tekee siitä alttiin häiriön aiheuttamille vahingoille
- **altistuminen:** häiriöalueella olevat ihmiset, omaisuus, järjestelmä tai jokin muu elementti, joka voivat vahingoittua
- **herkkyys:** ominaisuus tai tila vastaanottaa ja kokea häiriö ja sen vaikutukset.
- **sietokyky:** Ihmisen, organisaation tai järjestelmän kyvykyys tai resurssit vastaanottaa häiriö ja hallita sen aiheuttamia epäsuotuisia oloja ja hätätapauksia.

Haavoittuvuus voidaan määrittää esimerkiksi seuraavasti (Molarius ym. 2014):

$$\text{haavoittuvuus} = \frac{(\text{altistuminen} \times \text{herkkyys})}{\text{sietokyky}} \quad (1)$$

Ilmaisu kertoo, että herkkyys yhdistettynä altistumiseen nostaa haavoittuvuutta, mutta sietokyvyn lisääntyminen alentaa sitä.

Käsitteenä haavoittuvuus sisältään yhtäältä pitkän aikavälin näkökulman, kuten ilmastomuutokset, ja toisaalta äkilliset ilmiöt, kuten luonnonmullistukset (Füssel 2007). Olipa kyseessä kumpi näkökulma tahansa, on selvää, että molemmat vaikuttavat resilienssiin.

Haemmerli ja Renda (2010) toteavat, että infrastruktuurin haavoittuvuuden arviointi tarkoittaa ”järjestelmällistä tarkastelua laitteiden, järjestelmien, rakenteiden, sovelluksien ja niiden välisten riippuvuuksien suhteen”. On myös ilmeistä, että haavoittuvuuden arvioinnin tulee kattaa kaikki eri infrastruktuurin suunnitteluvaiheet ja koko elinkaari, mikä tekee siitä sangen vaikean tehtävän.

Toisin kuin haavoittuvuus niin resilienssi tulee ymmärtää positiivisena ja näin ollen osaltaan haavoittuvuuden vastakohtana tai käänteisarvona (Walker ym. 2011).

Tällöin

$$\text{resilienssi} = \frac{1}{\text{haavoittuvuus}} \quad (2)$$

josta seuraa, että

$$\text{resilienssi} = \frac{\text{sietokyky}}{(\text{altistuminen} \times \text{herkkyys})} \quad (3)$$

Tästä johtuen resilienssi ja sietokyky käsitellään usein synonyymeina, vaikka eivät sitä aivan täsmällisesti ottaen olekaan. Yleispiirteisessä keskustelussa tällä erolla ei ole merkitystä, mutta täsmällisessä ja ammattimaisessa kontekstissa käsitteiden ero on syytä pitää mielessä.

## 2.3 Vaarat, riskit ja joustavuus

**Vaara** tai **uhka** (engl. hazard) voi olla joko haitallinen luonnonilmiö (äärisäät, myrskyt, luonnonmullistukset) tai ihmisen aiheuttama (ilkiivalta, terrorismi, huolimattomuus, inhimilliset erheet ja väärät päätökset). Vaara tai uhka toteutuessaan saa aikaan vahinkoa: onnettomuuksia, omaisuusvahinkoja, henkilövahinkoja, jne. (UNISDR 2009). **Riski** puolestaan on todennäköisyys sille, että vaara tai uhka toteutuu ja vahingoittaa vaikutusympäristöään.

Riskin määrittely voidaan jakaa kuitenkin kahteen käsitteellisesti erilaiseen tilanteeseen: riski voi olla vaaran seurausten todennäköisyys tai itse vaaran ilmaantumisen todennäköisyys. Silloin kun vaaran seuraukset tunnetaan ja voidaan arvioida, ei ole käytännössä merkitystä kumpaa tapausta tarkoitetaan. Jos taas vaaran toteutumisen haitat ovat osin tuntemattomia ja vaikeasti arvioitavia, on erittelyllä suurempi merkitys (Leviäkangas ym. 2013).

Tällöin

$$\text{riski} = \text{vaara} \times \text{haittojen todennäköisyys} \quad (4)$$

tai

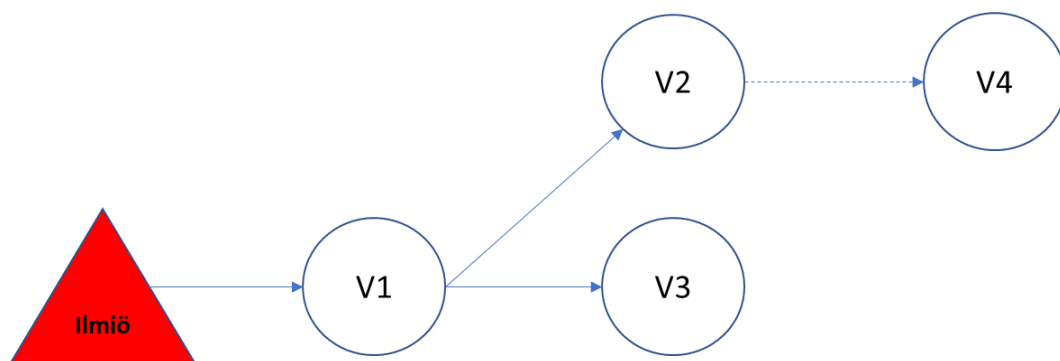
$$\text{riski} = \text{vaaran ilmaantumisen todennäköisyys} \quad (5)$$

Tämä käsitteellinen rakenne tarkoittaa sitä, että riskien hallintaan liittyy aina oleellisesti todennäköisyyksien puntarointi.

Riskit voivat olla kasautuvia, kertautuvia tai toisistaan eri tavoin riippuvia tai ehdollisia. Esimerkiksi tulvien seurauksena voidaan havaita kertautuvia, samanaikaisia haittoja: maanalaiset sähköverkot lamaantuvat, vesi- ja viemärintiijärjestelmä peittää ja liikenneinfrastruktuuri murenee.

Vaikka tämä on periaatetasolla useinkin selvää ja ymmärrettävää, ovat erilaiset olosuhdetekijät lähes poikkeuksetta määrittämässä riskien riippuvuussuhteita ja vaikutuksia. Tällöin riskienhallinta voi olla enemmänkin kohdekohtaista kuin yleisellä tasolla toimivaa (ks. Kuvio 7).

**Joustavuus** (engl. flexibility) tarkoittaa riskille altistuvan kohteen kykyä mukautua tilanteissa, joissa vaara realisoituu ja aiheuttaa potentiaalista haittaa. Joustavuus voidaan lukea erääksi sietokyvyn attribuutiksi tai osatekijäksi. Joustavuutta voidaan nimittää myös **mukautumiskyvyksi** (engl. adaptability) jota termiä käytetäänkin paljon esimerkiksi ilmastonmuutokseen mukautumisen yhteydessä. Joustava ja mukautumiskykyinen järjestelmä/systeemi kykenee muuttamaan toimintaansa siten, että haittavaikutukset jäävät vähäisemmiksi. Joustava systeemi on siis myös sietokykyisempi ja resilientti.



*Kuvio 7. Haitallinen ilmiö saa aikaan haittavaikutuksen V1, jonka seurauksena tapahtuvat vaikutukset V2 ja V3; V2 seurauksena voi haitta V4 olla mahdollinen.*

Resilienssin kannalta on oleellista eliminoida, vaimentaa ja lyhentää vaikutusketjuja. Esimerkiksi Saksan Nordrhein-Westfalenin alueen tulvista heinäkuussa 2021 aiheutui lopulta elintarvikepulaa, jätehuolto-ongelmia, terveysongelmia ja moninaista yhteiskunnallista vahinkoa. Liikenneyhteydet olivat paikoin täysin poikki, koska teitä ja siltoja huuhtoutui tulvan mukana, joten pelastustoimintaa ja hätäapua hoidettiin helikopterein. Monia kyliä ja yhteisöjä eristyi liikenneyhteyksien ulottumattomiin. Veden- ja sähkönsaanti katkesivat (Kuvio 8).

Merkelin hallitus osoitti sittemmin 30 miljardia euroa vahinkojen korjaamiseen. Esimerkiksi tässä tapauksessa vahinkojen eliminointia ja vaimentamista olisi ollut ainakin teoriassa mahdollista tehdä suojarakenteilla, tulva-altailla ja tehokkailla ennakkovarointijärjestelmillä. Haitallisia laajempia kerrannaisvaikutuksia olisi voitu katkaista esimerkiksi nopeilla väliaikaismajoitusratkaisuilla.





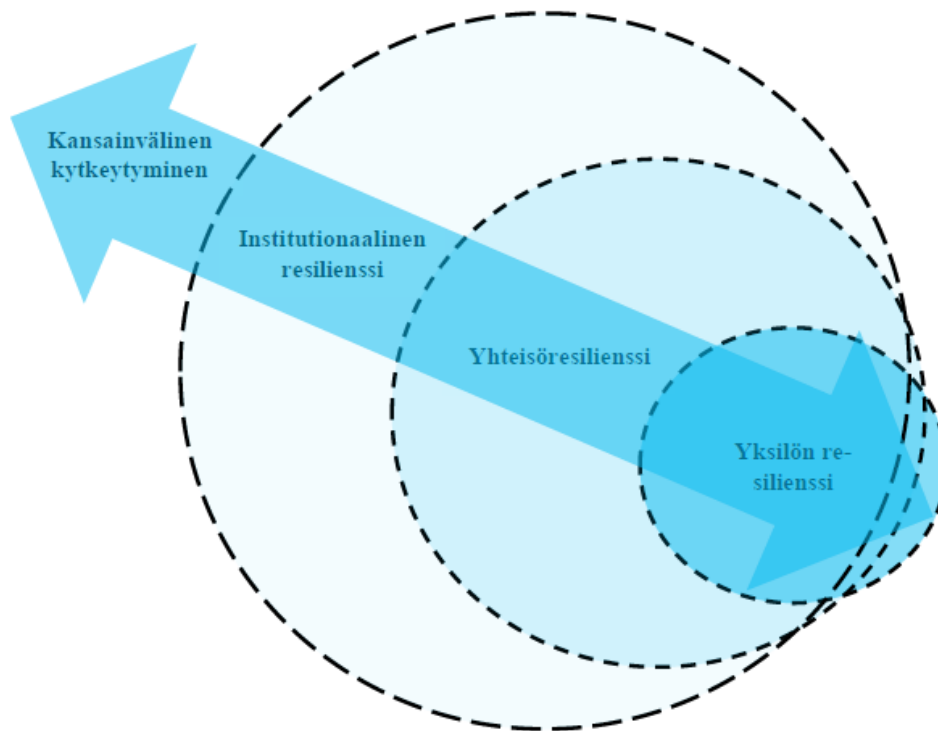
*Kuvio 8. Saksan heinäkuun 2021 tulvien jäljet näkyvät ja vaikutukset tuntuvat pitkään (kuvat: DW).*

## 2.4 Resilienssin ulottuvuudet ja periaatteet

Väyläverkon ja erityisesti sen resilienssin osalta on syytä eritellä ne systeemin osat ja tasot, joiden mittaaminen ja arviointi edellyttää osin toisistaan poikkeavia lähestymistapoja (ks. esim. Taulukko 1). Näiden lisäksi on huomioitava myös ajallinen ulottuvuus, koska esimerkiksi väyläverkon kulumisen tapahtuu pitkän ajan kuluessa. Toisaalta yllättävät sääolot tai muut muutokset väyläverkon toiminnallisuudessa (esimerkiksi sähkökatkosten aiheuttamat häiriöt) voivat tapahtua hyvinkin nopeasti.

Vaikka erilaisten nopeiden ja intensiivisten ilmiöiden kuten äärisateiden vaikutukset menevät nopeasti ohitse, niin toistuvina tällaisilla ilmiöillä voi olla väyläverkon elinkaarta ratkaisevasti lyhentävä vaikutus. Käytännössä vaikkapa tien elinkaaren lyhentäminen 10 %:lla tarkoittaa suurin piirtein vastaavaa lisää pitkällä aikavälillä väyläkustannuksiin.

Yhteiskunnan kokonaisresilienssiä käsiteltäessä tyypillisesti eritellään yksilöiden, yhteisöjen ja yhteiskunnan rakenteiden – instituutioiden – resilienssiä. Näihin ulottuvuuksiin voidaan vielä lisätä kansainväliset rakenteet ja vuorovaikutukset (Kuvio 9).



*Kuvio 9. Yhteiskunnallisen resilienssin neljä ulottuvuutta (Hyvönen ym. 2019).*

Myös liikennejärjestelmän resilienssiä voidaan tarkastella liikennejärjestelmän eri osien kautta:

- matkustajat, kuljettajat → ajotaidot ja asenteet, vireystila, terveys, henkilökohtaiset ominaisuudet, tilannetietoisuus, jne.
- ajoneuvot → turvallisuusteknologiat ja -varusteet, yleiskunto ja -laatu
- liikenneinfrastruktuuri → kunto, turvalaitteet ja suojarusteet, suunnitteluratkaisut, jne.

Tällaista järjestelmätason erittelyä ei ole toistaiseksi tiettävästi julkaistu.

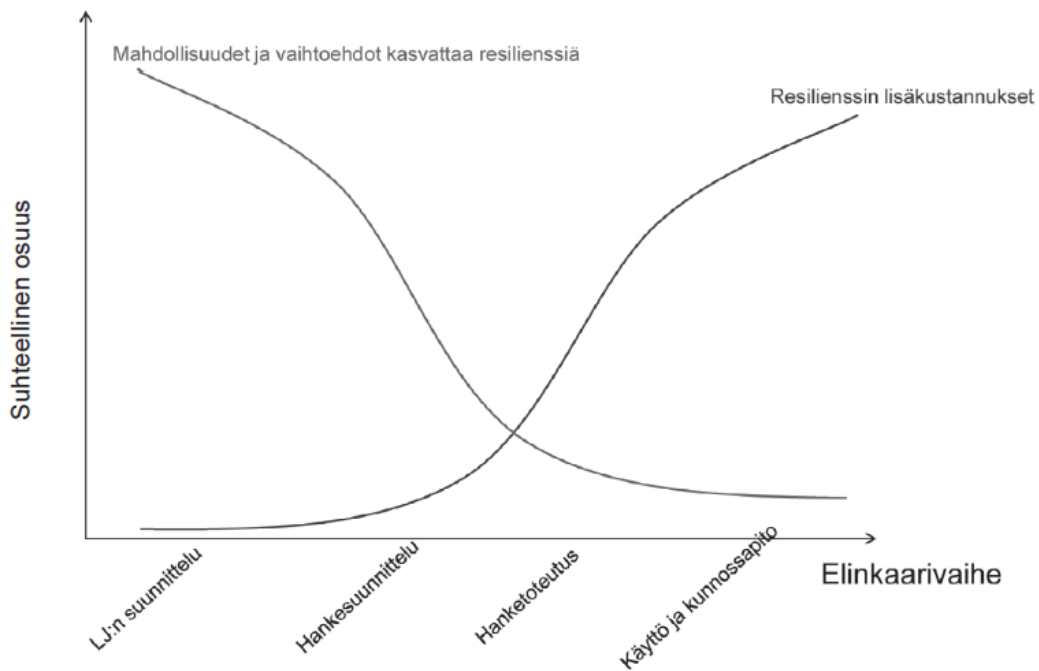
Leviäkangas ja Aapaoja (2015) tarkastelevat liikennejärjestelmän väylästä alla esitetyn taulukon mukaisesti. Taulukolla pyritään yksinkertaistaen ja suoraviivaisesti erittelemään väyläverkon eri osia ja elementtejä, jotta resilienssiä voitaisiin paremmin hallita. Verkon resilienssiä voidaan tehokkaasti kehittää vain osittamalla sitä loogisesti.

*Taulukko 1. Liikenteen väylästä ja esimerkkejä sen täydentävistä rakenteista ja järjestelmistä sekä solmupisteistä (Leviäkangas & Aapaoja, 2015).*

Väylärakenteet	Täydentäviä rakenteita	Täydentäviä järjestelmiä	Solmupisteitä
Tiet	Sillat, tunnelit	Valaistus, viitoitus, kuivatus, älyliikenteen sovellukset, liikennekeskukset	Maaliikenneterminaalit, bussiasemat, rajanylityspaikat, satamat
Radat	Sillat, tunnelit	Informaatiojärjestelmät, sähköjärjestelmä, turvallisuusjärjestelmät, liikenteenohjauskeskukset	Terminaalit, asemat, satamat, ratapihat
Vesiväylät	Satamarakenteet, sulut, kanavat	Pojjut, viitoitus, VTS-keskukset	Satamat
Ilmailu	Liittyvät maaliikenneväylät ja asemat	Lennonohjaus, turvatarkastukset	Lentoasemat
Kevyen liikenteen väylät	Sillat, tunnelit	Valaistus, viitoitus, kuivatus	Asemat, kauppakeskittymät

Resilienssin suunnittelun ja hallinnan peruseriaatteena voidaan pitää tarkasteltavan järjestelmän tarkoituksenmukaista osittamista ja osajärjestelmien keskinäisiä riippuvuuksia ja suhteita. Toisaalta myös elinkaaren analysointi resilienssin hallinnan näkökulmasta on oleellista erityisesti liikenneväylästä tapauksessa ja siten yksi johtava periaate.

Kuten kaikissa liikenneväylästä elinkaaren hallinnan kysymyksissä, ovat suurimmat vaikutusmahdollisuudet hankkeen elinkaaren alkupäässä, eli silloin kun väylästä suunnitellaan (Leviäkangas & Michaelides 2014). Tällöin mahdollisuudet vaikuttaa resilienssin varmistamiseen lisäkustannuksiin ovat suurimmat. Jos jo olemassa olevaan väylästä joudutaan tekemään sen resilienssiä parantavia muutoksia, jotka olisi voitu huomioida jo suunnitteluvaiheessa, voi näiden toteuttaminen olla jälkikäteen hyvinkin kallista. Tässäkin mielessä resilienssin ennakoiva huomioiminen jo hankkeiden suunnitteluvaiheessa on tärkeää (Kuvio 10).



Kuvio 10. Pelkistetty havainnollistus resilienssin varmistamisen vaikutusmahdollisuuksista ja kustannuksista hankkeen elinkaaren aikana (mukaien Leviäkangas & Michaelides 2014).

Resilienssin hallintamielessä kyse on riskien ennakkoinnin, niihin reagoinnin ja tuleviin riskeihin sopeutumisen tavoista. Taulukko 2 havainnollistaa tätä ajattelua. Esimerkiksi ilmastonmuutoksen näkökulmasta kaikki taulukon vaiheet edustavat jo pitkälti sopeutumisvaihetta (koska ilmastonmuutos toteutunee joka tapauksessa).

Taulukko 2. Riskienhallinnan ja väylien hallinnan vaiheet elinkaaren omaisesti vasemmalta oikealle luettuna.

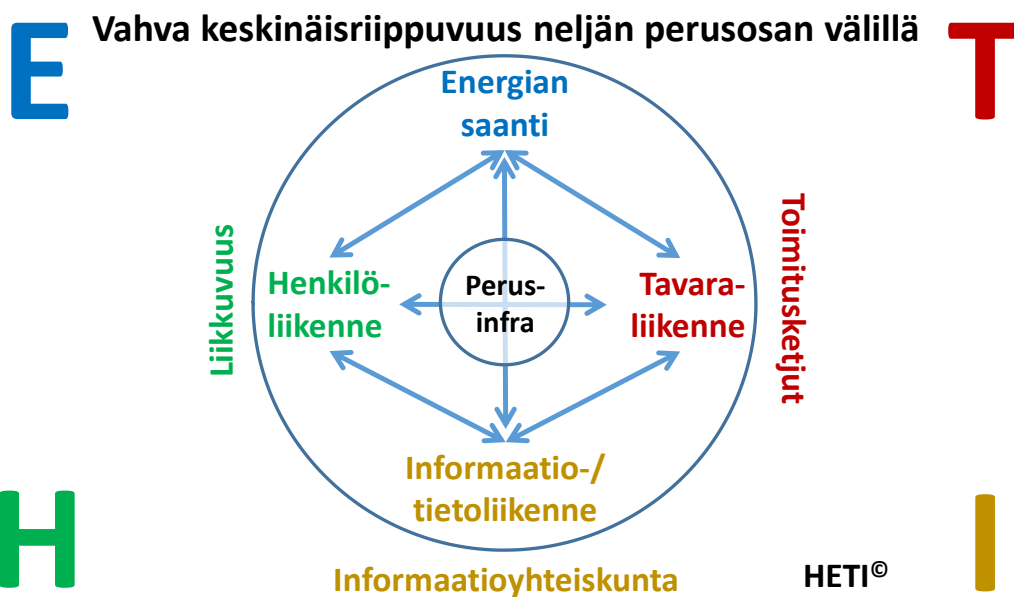
Riskien hallinta	Riskien tunnistaminen ja ennakointi	Riskeihin varautuminen	Riskeihin reagointi	Riskeihin sopeutuminen
Väylien tekninen hallinta	Verkkosuunnittelu, liikennejärjestelmäsuunnittelu ja hankkeiden yleissuunnittelu	Hankkeiden toteutussuunnittelu, rakentaminen	Kunnossapitojärjestelmät, korjaushankkeet	Kunnossapitojärjestelmät
Väylien taloudellinen hallinta	Investointiohjelmat, pitkän aikavälin rahoitusraamit	TTS-budjetointi, vuosibudjetointi	Perustienpidon määrärahoitus	Riskivaraukset, perustienpidon rahoitus

## 2.5 Monimutkaiset keskinäiset riippuvuudet

### 2.5.1 Väyläverkon keskinäisriippuvuuksien havainnollistus

Väyläverkon laatu, toimintavarmuus ja palvelukyky – niin muodoin myös resilienssi – koostuu useasta taustatekijästä. Taustalla on luonnollisesti itse fyysisen väyläverkon kokonaisuus ml. sen laatu ja kytkeytyvyys.

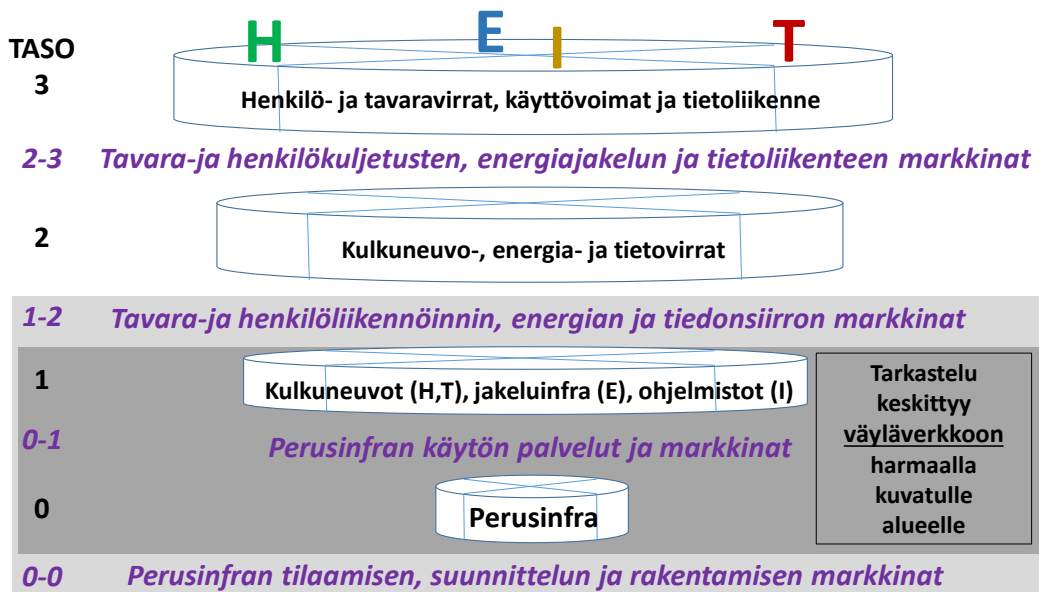
Henkilö- ja tavaraliikenne on täysin riippuvainen riittävästä energian saannista käyttövoimasta riippumatta sekä hyvin riippuvainen toimivista tietoliikenneyhteyksistä ja -palveluista. Tätä kuvastavat HETI<sup>©</sup>-mallin lohkot E (energiajakelun rakenteet ja markkinat) sekä I (tietoliikenteen rakenteet ja markkinat).



Kuvio 11. Henkilö (H)- ja tavaraliikenteen (T) sekä Energia (E)- ja Informaatiovirtojen (I) perusinfrastruktuurin keskinäisriippuvuuksia havainnollistava pelkistetty ns. HETI<sup>©</sup>-malli.

Tämä selvitys keskittyy erityisesti liikenteen väyläverkkoon, joka muodostaa perustan sekä henkilö- että tavaraliikenteen liikkuvuudelle yhteiskunnassa. Kriittiseen perusinfrastruktuuriin kuuluvat myös mm. energianjakelun ja tietoliikenteen verkot.

Tarkastelun rajausta havainnollistaa tätä tarkoitusta varten laadittu HETI<sup>©</sup>-malli (Kuvio 11 ja Kuvio 12), ja siinä esitetyt tasot 0 ja 1. Niiden päällä tai kautta liikkuvat mm. ajoneuvovirrat, perusinfrastruktuurin käytön sekä niillä liikennöinnin markkinat (tasot 2 ja 3 sekä tasojen välillä olevat vaiheet 1–2 ja 2-3).



Kuvio 12. Henkilö- ja tavara-, energia- ja tietoliikenteen perusinfrastruktuurin ja niiden varassa toimivien palveluiden ja markkinoiden havainnollistus (HETI©-malli; H = Henkilöliikenne; E = energian jakelu; T = tavaraliikenne; I = informaatiovirrat, tietoliikenne).

## 2.5.2 Väyläverkon suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon keskinäisriippuvuudet

Tärkeimpiä tekijöitä väyläverkon suunnittelun ja toteutuksen sekä ylläpidon osalta ovat seuraavat:

- **inhimillinen pääoma**, eli yleiset laatutekijät, jotka liittyvät osaamiseen ja tiedon soveltamiseen sekä alan sosiaaliseen pääomaan
  - koulutus; eri tasoilla tapahtuva tietotason nosto ja ylläpito; esim. korkeakoulu- ja toisen asteen koulutus
  - pätevyysvaatimukset; sertifikaatit ja vastaavat
  - tiedonhallinta; menetelmät, osaamisen johtaminen
  - toimijoiden yhteispeli ja selkeät pelisäännöt
- **aineellinen pääoma**
  - laitteet ja työkalut; koneet, ohjelmistot
  - materiaalit; esim. rakennusmateriaalit
- **taloudellinen pääoma**
  - rahamääräiset panostukset; esim. väyläverkon budjetin taso
  - rahoituksen jousto; esim. lisäinvestoinnit tarvittaessa

Karkeasti yleistäen voidaan sanoa, että minkä tahansa taustatekijän ollessa puutteellinen on sillä perustaa heikentävä vaikutus.

Toinen näkökulma liittyy teknologiaan ja erilaisten osajärjestelmien kytkeytymiseen toisiinsa. Esimerkiksi liikenteenohjauskeskus ei toimi ilman sähköä ja tietoliikenneyhteyksiä. Fyysisen ja digitaalisen infrastruktuurin kytkeytyessä yhä voimak-

kaemmin toisiinsa, tulee sietokyvyn hallinnasta monimutkaisempaa ja vaativampaa. Inhimillisten pääomatekijöiden merkitys taustalla korostuu tässä kontekstissa: kompleksisia järjestelmiä suunnittelemaan ja käyttämään tarvitaan korkeaa osaamista.

Kolmantena seikkana voidaan nostaa esiin organisointi ja eri organisaatioiden muodostamat yhteistoimintaverkostot. On useita esimerkkejä siitä, kuten hirmumyrskyjen<sup>3</sup> ennakointi ja hoito ja koronapandemian hoidon alun sekava organisointi, että eri toimijoiden vastuut, valtuudet ja toimintakyky ovat alentaneet sietokykyä.

Myös liikenteen infrastruktuurin sietokyvyn hallinnassa tulee kiinnittää huomiota organisatorisiin valmiuksiin kriisin kohdatessa ja siitä toivuttaessa. Suomessa selkeitä toimijoita, joiden tulee hallita oman mandaattinsa lisäksi yhteispeli eri suuntiin, ovat ainakin

- väylänpitäjät ja väyläviranomaiset
- pelastustoimi
- liikenteenhallinnasta vastaavat tahot
- poliisi

Näiden lisäksi voidaan tunnistaa liittyviä tahoja ainakin seuraavasti:

- liikennöitsijät ja operaattorit
- kriittiset toimitusketjut (esim. kuljetuksista riippuvat suuryritykset)
- huoltovarmuus- ja muut turvallisuustoimijat.

---

<sup>3</sup> Esim. Katrina Yhdysvaltojen eteläosissa vuonna 2005, joka mittavien muiden vahinkojen lisäksi tuhosi kolmanneksen New Orleansin satamasta.



## 3 Mitä on väyläverkon resilienssi?

### 3.1 Resilienssi mihin?

Väyläverkon suunnittelun ja toteutuksen sekä ylläpidon osalta on tarpeen tunnistaa ne tilanteet ja riskit, joita varten verkon resilienssiä halutaan vahvistaa, ja millä ja aikajänteellä nämä toteutuvat.

Tätä aihetta eli ”resilienssiä mihin?” sivutaan useammassakin kohtaa toisaalla tässä raportissa, mutta oheinen kuvio havainnollistaa asetelmaa (Kuvio 13).

Mikäli väyläverkkoa kohtaa nopea esimerkiksi sääolojen, tietoliikenneongelmien, laajamittaisen terroriteon tai (suur)onnettomuuden aiheuttama häiriö, edellyttää tällaiseen tilanteeseen erilaista varautumista kuin hitaammin etenevät väyläverkon toimivuutta uhkaavat häiriöt.

Nopeissa tilanteissa toimivaltaisia viranomaisia ovat Suomessa mm. pelastustoimi, poliisi, Rajavartiolaitos, Puolustusvoimat sekä Liikenne- ja viestintävirasto Traficom (ml. Kyberturvallisuuskeskus sen osana). Väylävirastolla on tällaisissa tilanteissa omat tehtävänsä, jossa viranomaisyhteistyön sekä olemassa olevien varautumis-sopimusten merkitys korostuu.

VAIKUTUS	Nopeat muutokset (päiviä, viikkoja)	Hitaat muutokset (kuukausia, vuosia)	Hyvin hitaat muutokset (5+ vuotta)
<b>Katastrofaalinen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tsunami tai suuri tulva</li> <li>Suuri maanjäristys</li> <li>Suuri tulivuorenpurkaus</li> <li>Globaali IT-häiriö</li> </ul> Palautumisaika jopa vuosia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suuri kuivuus, eroosio</li> <li>Suurimittainen, hidas ympäristövahinko (esim. ikiroudan sulaminen)</li> </ul> Palautumisaika jopa vuosia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Merkittävä merenpinnan nousu</li> <li>Massiivinen ympäristökatastrofi</li> </ul> Palautuminen mahdollista?
<b>Suuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suuronnettomuus</li> <li>Iso tietoliikennehäiriö</li> <li>Avaruussään häiriöt</li> <li>Iso terroriteko</li> </ul> Palautumisaika viikkoja, kk	<ul style="list-style-type: none"> <li>Väylärakenteiden epänormaali rapautuminen (sillat, tunnelit ym.)</li> <li>Lisääntyvä 0 °C ”sahaus”</li> </ul> Palautumisaika kuukausia	<ul style="list-style-type: none"> <li>Väylärakenteiden ”normaali” rapautuminen (sillat, tunnelit...)</li> </ul> Palautumisaika vuosia
<b>Pieni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Myrskytuhot (tuuli)</li> <li>Paikallinen tulva</li> <li>Helle (ratakiskot, tiet)</li> <li>Onnettomuustilanne</li> </ul> Palautumisaika päiviä, viikko	<ul style="list-style-type: none"> <li>Normaalit vuoden-aikojen vaihtelun aiheuttamat vauriot</li> </ul> Palautumisaika päiviä, viikko	<ul style="list-style-type: none"> <li>Väylästäön normaali kuluminen</li> </ul> Palautumisaika kuukausia

Kuvio 13. Esimerkinomaisia havainnollistuksia vaikutukseltaan ja aikajänteeltään erilaisista väyläverkostoa ja sen toimintaa uhkaavista tilanteista. Lista ei ole tyhjentävä, ja eräiden ilmiöiden vaikutukset voivat olla kuviossa esitetyjä voimakkaampia ja/tai nopeampia (esim. avaruussään häiriöt, meteoriitit).

Suomessa ei juuri tavata vaikutukseltaan katastrofaalisia sään tai ihmisen toiminnan ääri-ilmiöitä, jotka kuviossa ylimpänä. Tämän vuoksi väyläverkon suunnittelun, toteutuksen ja erityisesti ylläpidon osalta resilienssin vahvistamisen toimenpiteet sijoittuvat meillä pääosin Kuvio 13:n oikean alakulman neljään ruutuun (Vaikutus: Pieni ja Suuri; Aikajänne: Hitaat ja Hyvin hitaat muutokset).



## 3.2 Sääolojen vaikutuksia infrastruktuuriin

On nähtävissä, että ilmastonmuutos voi häiritä yhä enemmän kriittisiä järjestelmiä, nostaa käyttökustannuksia, pahentaa infrastruktuurin rahoitusvajetta ja aiheuttaa merkittäviä heijastusvaikutuksia yhteiskuntiin ja talouteen (Leviäkangas & Michalides 2014).

Perusinfrastruktuurin osa-alueiden (liikenneverkot ja -rakenteet, tietoliikenneverkot, energiaverkot ja -tuotantolaitokset, talot, rakennettu ympäristö ylipäätään) haavoittuvuudet eri ilmastoriskityypeille vaihtelevat kuitenkin varsin paljon, ja erot samanlaisenkin perusinfrastruktuurin osalta ovat suuret maapallon eri puolilla. Hyvin harva infrastruktuurin osa-alue jää täysin ilmastonmuutoksen lähivuosikymmeninä mukanaan tuomien vaikutusten ulkopuolelle. Joissakin maissa lämpöön liittyvät sähkökatkot voivat pahentua ja aiheuttaa verkon häiriintymisen. Esimerkiksi lentoliikenne voi häiriintyä, koska sekä lentokoneet että lentokentät ylittävät lämpöön liittyvät kynnsarvot yhä useammin.

	Kuljetukset					Tele-kommunikaatio			Energian tuotanto							
	Lentokentät	Rautatie	Maantie	Sisävesi	Satamat	Langaton infrastruktuuri <sup>1</sup>	Kiinteä infrastruktuuri <sup>2</sup>	Datakeskukset	Tuotanto			Siirto				
									Lämpövoimalaitokset <sup>3</sup>	Tuuli voimalat	Aurinkovoimalat	Vesivoimalat	Putkisto ja sähköverkko	Sähköasemat <sup>4</sup>		
Merenpinnan nousu					A											
Jokien tulviminen	C	D	E													
Myrskyt	C				A	F										
Kuivuus									G	G						
Kuumuus (ilma ja vesi)												I			J	
Maastopalot																
<b>Riskitaso</b>	<b>Matala riski</b>							<b>Korkea riski</b>								

1 = Tuki- ja radioasemat; 2 = Maan päällä ja alla olevat kaapelit; 3 = Ml. ydinvoima, kaasu ja öljy; 4 = Ml. muuntimet

*Kuvio 14. Väyläverkon kannalta keskeisten infrastruktuurityyppien riski altistua globaalisti ilmastonmuutokseen vaihtelee suuresti tyypeittäin ja sijainnin mukaan. Riski = mahdolliset tulevat taloudelliset tappiot, jotka aiheutuvat altistumisesta äärisääliin. Lähde: McKinsey (2020; selitteet ja lisätiedot avattu liitteessä 3).*

Näiden erojen ymmärtäminen on tärkeää onnistuneen suunnittelun kannalta. Tätä havainnollistaa McKinseyn vuonna 2020 laatima ”lämpökartta”, joka tutkii mahdollisen tulevan keskeytyksen riskiä tyypillisestä altistumisesta ilmastoriskiin vuoteen 2030 mennessä (Kuvio 14). Kuvion ulkopuolelle on jätetty eräitä muita perusinfrastruktuurin osia, kuten vesi- ja jätehuoltoverkot, joiden toiminnalla voi olla suoria yhteyksiä myös liikenneverkkoon esimerkiksi vakavissa tulvatilanteissa.

Useimmat siinä esitetyt sään ääri-ilmiöt esiintyvät kuitenkin varsin lievinä Suomessa, mutta niiden intensiteetti ja taajuus lisääntyvät lähivuosikymmeninä myös täällä.

OECD:n International Transport Forumin raportti (ITF 2016) erittelee varsin yksityiskohtaisesti eri säätekijöiden vaikutuksia liikenneinfrastruktuuriin eri osiin ja komponentteihin, muun muassa tieinfrastruktuuriin, siltoihin, satamiin, ja ratoihin. Esimerkinomainen yhteenveto raportin erittelyistä on esitetty taulukossa 3. Eri ilmastoalueilla sääilmiöt ovat luonnollisesti intensiteetiltään ja frekvenssiltään erilaiset. Suomen kannalta oleellimmat tekijät on esitetty lihavoituna.

*Taulukko 3. Ilmastonmuutoksen ja äärisäiden vaikutuksia liikenneinfrastruktuureihin (ITF 2016). Suomen kannalta oleellimmat tekijät lihavoitu.*

Ilmastotekijä, sääilmiö	Vaikutukset				
	Tiet	Radat	Sillat	Satamat ja vesiliikenne	Lentokentät ja ilmailu
<b>Kuumuus</b>	<b>Asfaltin pehmentyminen ja nopeampi kuluminen</b>	Ratakiskojen vääntyily	Liitosten lämpölaajenemisesta johtuvat löystyminen ja rakenteisiin kohdistuvat lisäkuormat	Sisävesiliikenteessä alentuneet vedenpinnan tasot haitaten tai estäen liikennöitävyyttä	Pidempien kiitojen tarve (kalluston kuumentuminen)
<b>Lämmenneet talvet</b>	<b>Alentuneet lumenpoiston/-aurauksen kustannukset</b>			<b>Sisävesiliikennöintikausien pidentyminen</b>	
	<b>Routavaurioiden lisääntyminen</b>				
	<b>Jäätien vähentyminen</b>				
	<b>Lisääntyneet tulvariskit</b>				
<b>Maaperän vesipitoisuuden nousu</b>	<b>Rakenteiden vettymisen ja rapautuminen</b>				
<b>Meriveden pinnan nousu</b>	Lisääntyvä myrskytulvien riski			Lisääntyvä myrskytulvien riski	
<b>Ukkosmyrskyt</b>	<b>Liikenteen ohjausjärjestelmien häiriöt</b>			<b>Liikenteen ohjausjärjestelmien häiriöt</b>	

### 3.3 Ilmasto- ja sääolojen vaikutus väyläverkon resilienssiin erityisesti Suomen tilanteessa

Ilmaston lämpenemisen myötä talvet muuttuvat märemmiksi. Vaikka esim. lumen ja jään esiintyminen voi keskimäärin vähentyä, voivat märemmät olosuhteet luoda ajoittaisia erittäin vaikeita keliolosuhteita varsinkin tieverkolla lämpötilan vaihdel-

lessa molemmin puolin veden jäätympistettä. Lisäksi märemmät talvet aiheuttavat entistä voimakkaamman kosteusrasituksen (kerrosten syöpyminen, eroosio), jolloin tie- ja maarakenteet menettävät kantokykyään ja rapautuvat nopeammin.

Elinkaarivaikutukset voivat olla varsin mittavat, ja niillä saattaa olla jopa selkeä kansantaloudellinen merkitys. Ainoa mahdollinen hyötyjä ilmaston lämpenemisestä on merenkulku, kun merialueiden jääpeitteet ohenevat ja kenties osin kokonaan poistuvat.

Entistä rankemmilla vesisateilla on samankaltainen vaikutus liikenteen infrastruktuuriin, varsinkin teihin, ratoihin ja erilaisiin maarakenteisiin.

Yllä mainittuja sääilmiöiden muutoksia ja niiden vaikutuksia voidaan pitää kohtuullisen varmoina – ainoa epävarmuus liittyy ilmiöiden intensiteettiin ja niiden esiintymistodennäköisyyteen. Muutoksen suunta on kuitenkin selvä ja kun otetaan huomioon maarakenteiden elinkaaren pituus, on nämä riskit huomioitava suunnittelussa ja elinkaaren hallinnassa.

Tulevaisuudessa voimakkaat helleaallot voivat aiheuttaa Keski-Euroopasta tuttuja ilmiöitä, kuten asfaltin pehmenemistä ja ratakiskojen väännyilyä.

Valtioneuvoston kanslialle laaditun ilmastonmuutoksen kansallisen riskiarvion yhteenveto toteaa liikenteen osalta muutamia selkeästi korostuvia riskejä ja niiden vaikutuksia (Tuomenvirta ym. 2018):

- **Liukkauden aiheuttamat onnettomuudet** ja haitat, kun lämpötilat vaihtelevat yleisemmin ja laajemmin jäätympisteen molemmin puolin
  - jo nyt joka talvi kymmenet tuhannet suomalaiset liukastuvat siten, että tarvitsevat hoitoa; liukkaus aiheuttaa suuria kustannuksia erityisesti sairauspoissaolojen takia; kevytliikenteen kasvu kasvattaa altistumista
  - tieliikenteessä liukkaudesta aiheutuu viivästyksiä, onnettomuuksia ja logistiikan häiriötä
  - vaaratekijän [liukkauden] alueellinen ja vuodenaikainen jakauma muuttuu
  - varautumiskeinoja ovat esim. talvikunnossapidon kehittäminen ja riskitietoisuuden lisääminen; varautumisessa auttaa sää- ja kelitieto.
- **Rakenteiden kostuminen, vettyminen ja rapautuminen** suurtulvien ja rankkasateiden vaikutuksista
  - rakenneauriot nopeuttavat korjaustarvetta (rakennukset, rakenteet, tie- ja rataverkostot); kostuminen ja rapautumissyklien frekvenssi ovat kasvussa
  - korjausvelka tie- ja muussa väyläverkostossa lisää haavoittuvuutta, koska huonokuntoisen infrastruktuurin resilienssi on matalampi.

Yllä olevien riskien ja vaikutusten lisäksi voidaan tunnistaa erityisesti liikennejärjestelmään kohdistuvat ilmastonmuutoksesta aiheutuvat riskit (todettu osin myös Valtioneuvostolle laaditussa raportissa):

- Sähköjakelun laajat ja pitkäkestoiset häiriöt johtuen tuuli- ja ukkosmyrskyistä
- Tieto- ja viestintäverkkojen pitkäkestoiset katkokset ja häiriöt niin ikään tuuli- ja ukkosmyrskyistä sekä avaruussääilmiöistä johtuen.

Nämä sääriskitekijät kohdistuvat liikenteen ohjaus- ja hallintajärjestelmiin kaikissa liikennemuodoissa, mutta esimerkiksi tieliikenteen sähköistyessä korostuu sähkön saatavuuden luotettavuus entisestään. Raideliikenteessä sähkönjakelun häiriytyessä koko järjestelmä kirjaimellisesti romahtaa. Yllä tunnistetut ilmiöt eivät suinkaan ole ainoita, joihin väyläverkoston ja sen operoinnin osalta tulee varautua.

Rankkasateet, lumimyrskyt, kovat pakkaset ja toisinaan jopa poikkeuksellisen korkeat lämpötilat voivat tuottaa yllätyksiä, jotka toisaalta ovat myös ennakoitavissa. Esimerkiksi EWENT-hankkeessa arvioitiin, että jopa 60 % Suomessa tapahtuvissa junien myöhästelyistä johtuu sääilmiöistä, ja eritoten lumen ja jään kertymisestä rata- ja kiskorakenteisiin (Ludvigsen & Klæboe 2014).

Väyläverkon resilienssiä ajatellen ilmasto- ja sääolojen kehittämisessä kriittisin tekijä on epävarmuus: kuinka paljon ja missä ajassa? Mallien ennusteet ovat aina merkittävästi epävarmuuksia sisältäviä mutta toisaalta riskienhallinnan näkökulmasta mahdollisia radikaalejakin muutoksia ei voi jättää huomioimatta.

Lähes klassinen kysymys on se, että kun normaalisti infrastruktuuria mitoitetaan esimerkiksi kerran sadassa vuodessa tapahtuvien ääri-ilmiöiden mukaan (implisiittisesti olettaen, että tämä varautuminen on riittävä), niin mikä on hyväksyttävä todennäköisyys sille, että kerran vuosituhannessa toistuva ilmiö (joka saattaa olla yleistymässä) osuu seuraavalle 100 vuodelle, joka on monenkin perusrakenteen todellinen elinkaari?

Liikenteen väyläverkostosta vastaavan viranomaisen tehtäväksi jää ainakin seuraavien vaihtoehtojen pohtiminen:

- vakuuttaa päättäjät lisäresurssien tarpeesta, jolla väyläverkon säänsietokykyä kohennetaan systemaattisesti
- priorisoida verkkoon tehtäviä resilienssi-investointeja (jotka voivat olla erillisiä tai liittyä muuhun uus- ja korvausinvestointiin) punniten väyläverkon riskialttiutta ja kriittisyyttä yhteiskunnan toiminnan kannalta
- lykätä päätöksiä resilienssi-investoinneista ja sietokyvyn nostamisesta epävarmuuden vallitessa ja hyväksyä nousevat riskitasot.

Myös viimeisin vaihtoehto, eli päätösten tietoinen lykkääminen, on relevantti, joskaan ei poliittisesti 'korrekti'. Kustannustehokkain tapa varautua tulevaan on aina analyysi- ja tutkimustoiminnan lisääminen, jolloin päätöksiin saadaan mahdollisimman laaja ja laadukas tietopohja.

### 3.4 Kriittinen infrastruktuuri ja hybridiuhat

Käsite kriittinen infrastruktuuri kattaa ne perusrakenteet, palvelut ja niihin liittyvät toiminnot, jotka ovat välttämättömiä yhteiskunnan elintärkeiden toimintojen ylläpitämiseksi. Suomessa yhteiskunnan elintärkeitä toimintoja ovat puolestaan johtaminen, kansainvälinen ja EU-toiminta, puolustuskyky, sisäinen turvallisuus, talous, infrastruktuuri ja huoltovarmuus, väestön toimintakyky ja palvelut sekä henkinen kriisinkestävyys.

Kriittiseen infrastruktuuriin kuuluu sekä fyysisiä laitoksia ja rakenteita että digitaalisia toimintoja ja palveluja. Muun muassa energian tuotanto-, siirto- ja jakelujärjestelmät, liikenne ja logistiikka (ml. väyläverkot), tieto- ja viestintäjärjestelmät

sekä vesi- ja jätehuolto ovat osa kriittistä infrastruktuuria. (Kokonaisturvallisuuden sanasto TSK 50 ja Kyberturvallisuuden sanasto TSK 52). Kriittistä infrastruktuuria ja siihen kohdistuvia erilaisia uhkia käsitellään laajasti mm. tuoreimmassa kansallisessa riskiarviossa (Sisäministeriö 2018).

Euroopan hybridiuhkakeskuksen (HybridCoE) määritelmää mukaillen hybridiuhkat ovat toimia, jotka kohdistuvat demokraattisten valtioiden päätöksentekoprosesseihin ja/tai kriittiseen infrastruktuuriin, joiden tavoitteena on vahingoittaa tai heikentää kohdettaan. Tällaisten toimien takana on useimmiten valtiollinen toimija (ks. esim. [Hybridiuhkakeskuksen julkaisu](#) (2019) ja [Euroopan Komission sivut hybridiuhkista](#)).

Toimet voivat hyödyntää mitä tahansa haavoittuvuuksia millä tahansa yhteiskunnan osa-alueella, joita vastustaja tai vastustajat haluavat koetella. Toimien laajuus voi vaihdella suppeasta, yksittäisen kohteen vaikuttamisesta usean kohteen samanaikaiseen häirintään mahdollisesti useassa eri kohteessa tai organisaatiossa, ja joskus jopa useassa eri maassa. Toimien intensiteetti voi vaihdella yleisestä vaikuttamisesta konkreettisiin, kohdistettuihin operaatioihin ja edetä aina laajamittaiseen hybridisodankäyntiin asti.

Yleensä vastustajan edun mukaista on pitää toiminta sellaisten kynnyksen alapuolella, jotka aiheuttaisivat vastustajaan kohdistettuja vastatoimia. Tällaisia kynnyksiä ovat mm. seuraavat: i) teon tai tekojen havaitseminen, ii) attribuutio (tekijän tunnistaminen) ja viime kädessä iii) sodankäynti.

Jos toiminnan kohde ei havaitse, minkä tyyppistä haitallista toimintaa siihen on kohdistettu, se ei pysty vaikuttamiseen vastaamaan. Näin on usein laita kyberhyökkäyksissä, jossa kohde voi olla pitkäänkin tietämätön tietojärjestelmässään olevasta haittaohjelmasta.

Jos kohde havaitsee vaikuttamisen, mutta ei pysty todistamaan sitä tahalliseksi toiminnaksi tai edes tiedä kuka sen aiheutti, kohde ei pysty vastaamaan toimintaan ainakaan sen todellisen aiheuttajan suuntaan. Tällöin kohde pyrkii ainakin vähentämään haitallisen toiminnan vaikutusta tai poistamaan sen kokonaan.

Jos tiedetään, mitä on tehty ja kuka on ollut tekijänä, mutta haitallinen tai jopa tuhoisa toiminta jää kansainvälisen aseellisen konfliktin kynnyksen alle, tilanteeseen voidaan vastata lähinnä diplomaattisin, ei niinkään sotilaallisin keinoin. Vastapuoli pyrkii tällöinkin yleensä kiistämään osallisuutensa tekoon ja lisäämään epä-tietoisuutta tapauksen todellisen tekijän ja/tai motiivien suhteen. Tällainen toiminta vaikeuttaa myös diplomaattisten tai muiden kansainvälisten vaikutuskanavien ja -mahdollisuuksien käyttöä.

Nykyaikainen kriittinen infrastruktuuri ja sen lukuisat haavoittuvuudet erityisesti sen tietojärjestelmistä riippuvaisiin alasysteemeihin on otollinen kohde sellaisten vastustajien käsissä, jotka pystyvät ja haluavat käyttää hybridityökaluja. Tällaisia ei toistaiseksi ole käytetty laajasti missään vakavassa konfliktissa kehittyneiden valtioiden välillä, mutta jos ja kun näin ensimmäisen kerran tapahtuu, vaikutukset tulevat olemaan yllättäviä.

Väyläverkon osalta hybridi vaikuttaminen ja siihen liittyvät suorat toimet voivat kohdistua esimerkiksi:

- väyläverkon fyysiseen osaan (esim. tunneli, rautateiden asetinlaite, tärkeä meriväylä, ilmatila tai sen osa tai jopa kansainvälisen merialueen käyttö<sup>4</sup>),
- kriittiseen solmukohtaan (esim. rajanylityspaikka, satama, lentoasema tai muu liikenteen risteyskohta) tai
- osajärjestelmään (kaikkien liikennemuotojen liikenteenohjausjärjestelmät).

Resilienssin näkökulmasta avoimiin markkinoihin perustuvien länsimaisten demokratioiden järjestelmillä on joitain ilmeisiä haavoittuvuuksia. Näitä ovat esimerkiksi seuraavat:

Toimitusketjujen tehokkuuden kasvattaminen on vähentänyt tuotteiden varastointia kaikilla toimialoilla. Systeemisen markkinahäiriön tai esimerkiksi maailmanlaajuisen pandemian tapauksessa logistiikkajärjestelmien – erityisesti konttikuljetusten – suorituskyky on ollut koetuksella.

Globalisaatio tarkoittaa pidempiä toimitusmatkoja monille tuotteille samalla kun hyvin harva maa on omavarainen edes perustuotteiden osalta (esim. ruoka, lääkkeet, vaatteet, polttoaine), tai pystyy turvaamaan näiden saatavuuden muutamaa kuukautta pidempään.

Digitaalisista järjestelmistä on jo tullut hallitsevia suurissa osissa logistiikkajärjestelmää. Jos IT-järjestelmät eivät toimi, toimitusketjut käytännössä pysähtyvät. Tämän vuoksi logistiikkatoiminnot ovat otollinen kohde esim. kyberhyökkäyksille.

Myös rahoitusjärjestelmät ovat täysin riippuvaisia tietojärjestelmien ja tiedonsiirron toiminnasta, ja sitä kautta hyvin haavoittuvia kyberhyökkäyksille. Jos maksuliikenne ei toimi, kaupankäynti ja muu taloudellinen toiminta pysähtyvät hyvin nopeasti.

Yhteiskunnan toiminta perustuu kriittisen infrastruktuurin suurten ja keskinäisriippuvien osajärjestelmien toimivuuteen (sähkö, vesi, jätevesi, henkilö- ja tavaraliikenne, väyläverkon toimivuus, lämmitys, joukkoviestintä ja tietoliikenne). Nämä järjestelmiä voi vaurioittaa sekä kybertoimilla että fyysisillä keinoilla.

Avoimessa yhteiskunnassa teknistä ja toiminnallista tietoa kriittisen infrastruktuurien järjestelmien tilasta ja toiminnasta ovat helposti saatavilla. Tämä mahdollistaa vastustajille järjestelmien haavoittuvuuksien hyvinkin tarkan analyysin. Väyläverkon osalta tämä voi tarkoittaa mm. verkon osien kuntoa, välityskykyä, saavutettavuutta sekä yksityiskohtaista paikkatietodataa.

Monet näistä osajärjestelmistä ovat yksityisen sektorin omistamia ja/tai ylläpitämiä, tai toimivat yhteiskunnan omistamina yhtiöinä, eli niiden toiminta perustuu

---

<sup>4</sup> Esim. Lohela ym. (2019) käsittelee merialueiden käyttöä tai käytön estämistä kansainvälisen merioikeuden valossa. Siinä osoitetaan, että ao. juridinen viitekehys on usein monitulkintainen, mikä mahdollistaa erilaisten hybridioperaatioiden toteuttamisen. Lisäksi Hampurissa sijaitsevan kansainvälisen merioikeuden päätösten saamiseen menee vähintään vuosia ja joskus jopa vuosikymmeniä. Päätöksen saaminen ei myöskään takaa, että kohdevaltio sitä noudattaa, etenkin, jos kyse on suurvallasta, kuten on nähty mm. Etelä-Kiinan meren alueen ja Mustanmeren erimielisyyksiin liittyen.

markkinatalouteen. Tällaiset toimijat etsivät jatkuvasti kustannustehokkaita ratkaisuja, samalla kun äärimmäisiin ja ennen näkemättömiin kriisiskenaarioihin ei välttämättä ole halua tai riittävää ulkoista painetta varautua.

Julkinen sektori ei voi suoraan johtaa tai valvoa tällaisia kriittisen infrastruktuurin yrityksiä normaalien toimivaltuuksien puitteissa, ja poikkeusolojen toimivaltuuksien saaminen voi kestää kauan. Kuten COVID-19-pandemia osoitti, viranomaisten väliset ja samankin hallinnonalan eri tasojen väliset toimivalta- ja vastuusuhteet eivät ole yksiselitteiset varsinkaan siirryttäessä normaalioloista poikkeusoloihin.

Kansalliset toimijat eivät voi helposti korjata ongelmia, jotka syntyvät ulkomailla. Vakavat kansainväliset markkinahäiriöt voivat johtaa toimitusten ja esimerkiksi rahoitusjärjestelyiden ruuhkautumiseen, mikä voi merkittävästi vahingoittaa yhteiskunnan toimintoja ja millä voi olla vakavia poliittisia seurauksia.

Yllä olevat kuvaukset pätevät kaikkialla, mutta autoritaariset valtiot ovat näiden osalta usein vähemmän haavoittuvia kuin demokraatit. Autoritaarisissa maissa poliittisen johdon asema on vahvempi sekä yksityisellä että julkisella sektorilla, ja tällaisen valtion johto voi ohjata mielipiteitä ja poliittisia prosesseja sekä mobilisoida yhteiskunnan resursseja huomattavasti nopeammin ja suuremmin kuin länsimaissa. Myös lainsäädäntö ja oikeuslaitos ovat tällaisissa maissa tyypillisesti suoraan valtiojohdon ohjauksessa. Nämä erot tarjoavat niille merkittävän suhteellisen edun konflikteissa lännen kanssa.

### 3.5 Yhteenveto

Resilienssi liikennejärjestelmän metatasolla käsittää ainakin seuraavat näkökulmat, jotka ovat osin toistensa kanssa päällekkäisiä tai limittäisiä:

- Ajallisen ulottuvuuden, joka periaatteessa kattaa
  - nopeat, shokkimaiset häiriöt, jotka lähes välittömästi vaikuttavat järjestelmän palvelutasoon ja toimintakykyyn; esimerkiksi äärimmäinen sääilmiö tai suuronnettomuus
  - pitkän aikavälin palvelutasoa rapauttavat muutokset liikenneinfrastruktuurin elinkaaren aikana; esimerkiksi ilmastonmuutoksen mukanaan tuomat säärasitustekijät
  - tekijät, jotka sijoittuvat näiden ääripäiden välimaastoon
- Metajärjestelmän teknologiset keskinäiset kytkökset, jotka vaikuttavat liikennejärjestelmän palvelutasoon ja toimintakykyyn:
  - tietoliikenne- ja ohjausjärjestelmät; esimerkiksi liikenteen ohjauskeskusten toimintahäiriöt
  - sähkönsyöttöjärjestelmät; esim. junaliikenteen sähkönsaannin häiriöt
- Ennakointiin, valmistautumiseen ja reagointiin liittyvät näkökulmat, jotka ovat tietyssä mielessä myös 'resilienssijohtamisen' osa-alueita:
  - kyky ennakoida ja valmistautua häiriöihin, sekä kyky ja resurssit reagoida häiriöiden toteutuessa
  - kyky palauttaa järjestelmän palvelutaso ja toimintakyky toimivalle tasolle
  - kyky katkaista erilaiset dominoefektit ja kerrannaisvaikutukset
- Erityyppisten häiriöitä ja kriisejä aiheuttavien riskien, uhkien ja vaarojen jakautuminen:
  - luonnonilmiöt vs. ihmisten aiheuttamat, jotka jakautuvat edelleen:

- luonnonilmiöt: sääilmiöt ja muut uhat (esim. seismiset ilmiöt, avaruussää)
- tahalliset vs. tahattomat ihmisen aiheuttamat vaarat
- uhkien ja riskien laajuus ja kattavuus:
  - suuret, kattavat uhat, jotka vaikuttavat laajalla alueella, moniin järjestelmiin ja suureen joukkoon ihmisiä
  - pistekohtaiset, rajatun alueen tai rajattujen vaikutusten uhat ja vaarat
- ns. hybridiuhkien luonne ja laajuus:
  - vaikeasti ennakoitavat ja monitulkintaiset ihmisen toiminnan aiheuttamat uhat, jotka voivat vaikuttaa laajalla alueella, moniin järjestelmiin ja suureen joukkoon ihmisiä; yhtenä otollisena kohteena ns. kriittinen infrastruktuuri
  - näiden toimien ilmeneminen on usein yhteydessä geopoliittisiin ristiriitoihin tai valtioiden välisiin jännitteisiin
  - hybridiuhkien havaitseminen, tekijän tunnistaminen (attribuutio) ja varsinaisten tarkoituksien selvittäminen voi olla vaikeaa
- Pehmeä ja kova resilienssi:
  - tekninen resilienssi; esimerkiksi rakenteiden mitoitus ja laatu
  - osaamispääoma ja valmiudet; esimerkiksi resilienssisuunnittelun laatu, pelastustoiminnan kyvykkyydet ja kansalaisvalmiudet
  - taloudelliset resurssit, kuten talouden kantokyky, taloudelliset puskurit, kriisi-investointien valmius ja elinkeinoelämän taloudellinen vahvuus

Mikään näkökulma tai osa-alue ei sinänsä ole toistaan tärkeämpi tai oleellisempi, vaan kokonaisresilienssi muodostuu osiensa summasta. Näitä resilienssin eri osa-alueita voidaan myös systemaattisesti mitata ja kehittää niin haluttaessa. Eräitä osa-alueita on helpompi mitata kvalitatiivisesti, mutta eräitä voidaan myös arvioida kvantitatiivisin mittarein.

Määritelmällisesti resilienssi voidaan kuvata yhtä hyvin haavoittuvuuden käänteisarvoksi tai kyvyksi vastustaa ja reagoida kriiseihin sekä toipua niistä nopeasti. Akateemisessa merkityksessä resilienssin käsitteen ja sisällön määrittely on aina lähtökohtainen ja kontekstuaalinen kysymys, jossa tärkeintä on tarkoituksenmukaisuus: resilienssi määritellään käsillä olevan ongelman ja kysymyksen mukaan.

Soveltamisen osalta voidaan todeta samoin: tärkeintä ei ole pyrkiä kattamaan kaikkia resilienssin näkökulmia ja ulottuvuuksia, vaan soveltaa käsitettä siten, että vaikutukset ovat positiivisia, olipa sitten kyse uhkiin varautumisesta, reagoinnista niiden toteutuessa tai palautumiskyvystä ja joustavuudesta.<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Tässä selvityksessä on käytetty tausta-aineistona mm. seuraavia julkaisuja, joihin aihepiiriin syvällisemmin perehtyvien voi olla hyvä tutustua:

Geenhuizen (2000); U.S. Homeland Security (2013); Linkov ym. (2014), Mattsson ja Jenelius (2015); Ganin ym. (2017); Seager ym. (2017); Linkov & Palma-Oliveira (2017, toim.); Marchese & Linkov (2017); Kott & Linkov (2019); Linkov & Kurth (2019); Weiland ym. (2019); Achillopoulou ym. (2020); Sacconi ym. (2021); NASEM (2021a ja 2021b); ITF (2021a ja 2021b).

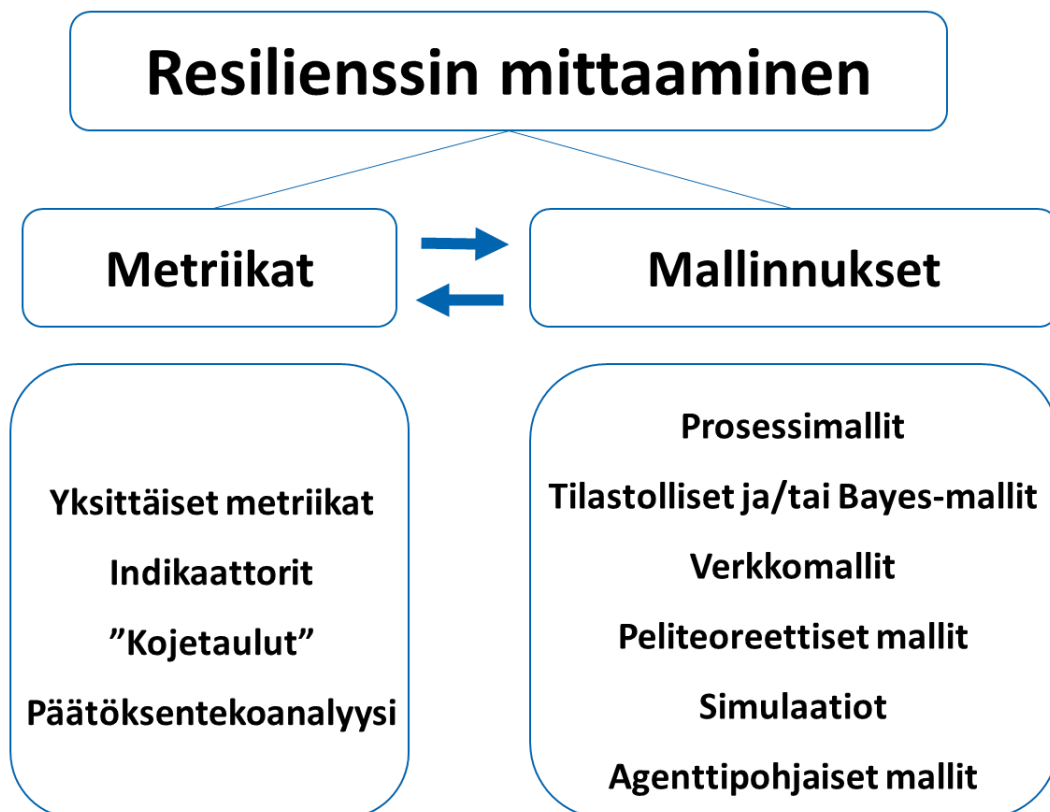


## 4 Väyläverkon resilienssin mittaamisen ja hallinnan menetelmiä

### 4.1 Yleisesti väyläverkon resilienssin mittaamisesta

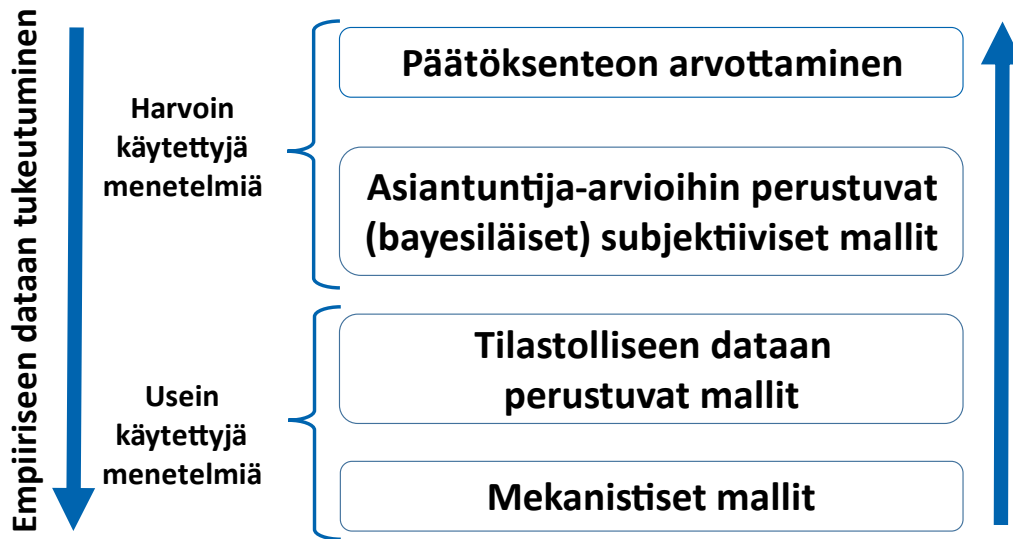
Systemin – esimerkiksi väyläverkon – resilienssiä voidaan mitata monin eri tavoin, mutta oleellista on, että mittaaminen ja sen pohjalta tehdyt arviot resilienssin tasosta erilaisissa tilanteissa tulee pohjautua asianmukaiseen tietopohjaan.

Tällainen tietopohja ja siinä käytetyt metriikat voivat perustua empiirisesti mitattuun ja kerättyyn dataan, niiden pohjalta rakennettuihin indikaattoreihin ja niiden yhdistelmiin (ns. kojetaulut) tai päätöksenteon ja/tai asiantuntija-arvioihin pohjautuvaan analyysiin (Kuvio 15).



Kuvio 15. Systemin resilienssin mittaamisessa käytettäviä metriikoita ja mallinnustapoja (mukaillen Kott & Linkov 2019).

Väyläverkon resilienssin mittaamiseen soveltuvien mallinnusten päätyyppejä on lueteltu oheisessa kuviossa (Kuvio 15). Näitä ja niissä käytettyjä menetelmiä avataan hieman tarkemmin jäljempänä tässä luvussa. Mittaamisessa käytettyjen metriikoiden<sup>6</sup> ja mallinnustapojen<sup>7</sup> välillä on vahva vuorovaikutus.



Kuvio 16. Väyläverkon resilienssin mittaamisessa käytettävien mallinnustapojen luonne ja käyttö (mukaillen Linkov & Kurth 2019).

Tarkasteltavan systeemin laajuus, käytettävissä olevan datan laatu ja kattavuus sekä tarkasteltava ongelma vaikuttavat keskeisesti siihen millaisilla mallinnusvälineillä tai niiden yhdistelmillä on mahdollista saada tilanteeseen riittävä tietopohja. Väyläverkon resilienssin mittaamisessa yleisimmin käytetyt menetelmät ovat empiiriseen dataan perustuvia tilastollisia tai mekanistisia mallinnuksia. Asiantuntija-arvioihin tai päätöksenteon arvottamiseen perustuvat analyysit ovat alan kirjallisuuden mukaan harvinaisempia (Kuvio 16).

<sup>6</sup> Tarkasteltavien kohteiden tai ilmiöiden mittaustapojen, mittayksiköiden ja niiden yhdistelmien muodostama kokonaisuus; ks. tarkemmin mm. alaluku 4.2.1. Metrologia.

<sup>7</sup> Kuvion Bayes-termi viittaa ns. bayesiläiseen todennäköisyysteoriaan, joka käsittelee sitä, kuinka varmoja olemme tietyn väittämän paikkansapitävyyden todennäköisyydestä. Bayes-laskennan todennäköisyyttä kutsutaan subjektiiviseksi, koska todennäköisyyden saamia arvoja nollan (väittämä on epätosi) ja yhden (väittämä on tosi) väliltä kutsutaan varmuudeksi väittämän paikkansapitävyydestä. Todennäköisyyden arvot voivat perustua myös asiantuntija-arvioihin.

## 4.2 Mittaamisen teoriasta väyläverkkojen resilienssiin liittyen

### 4.2.1 Metrologia

Formaalisti tarkasteltuna mittaamista, mittauksia ja niiden sovelluksia käsittelevä tieteenala on metrologia, joka sisältää kaikki mittauksiin liittyvät teoreettiset ja käytännölliset näkökohdat riippumatta soveltamisalasta ja mittausepävarmuudesta. Metrologia jaotellaan kolmeen osaan<sup>8</sup>:

- Tieteellinen metrologia, joka käsittelee mittanormaalien ja niiden ylläpidon kehitystyötä ja organisointia.
- Teollisuusmetrologia, joka varmistaa teollisuudessa, kuten esimerkiksi tuotannossa ja kehitystyössä käytössä olevien mittavälineiden toimintaa asianmukaisella tasolla.
- Lakisääteinen metrologia huolehtii sellaisten mittausten tarkkuustasosta, jolla on vaikutusta taloudellisten toimien läpinäkyvyyteen, terveyteen ja turvallisuuteen.

Metrologiassa mittaamisen kohteena on yleensä esimerkiksi tekninen laite, prosessi tai muu mittauskohde, jota tai jonka toimintaa voidaan mitata kvantitatiivisesti. Mittayksikköinä on usein fysikaaliset tai kemialliset suureet, joilla kohdetta mittalaitteiden avulla mitataan.

Mittaamisen metodologisesta tai teknisestä toteutuksesta riippumatta on ensiarvoisen tärkeää tietää ja määritellä mittauksen tai mittaamisen kohde<sup>9</sup>.

Väyläverkon resilienssi koostuu osaltaan rakennetun infrastruktuurin fyysisestä kunnosta, jonka osatekijöitä voidaan mitata formaalein metrologian keinoin. Tällaisia ovat esimerkiksi tie- ja rataverkon sekä erilaisten väylärakenteiden, kuten siltojen ja tunnelien tekninen kunto.

### 4.2.2 Verkko- eli graafiteoria

Väyläverkot ovat verkkomaisia systeemeitä, joita voidaan mitata myös verkko- eli graafiteorian keinoin. Se on matematiikan osa-alue, joka tutkii kohteiden välisten suhteiden esittämiseen käytettäviä matemaattisia malleja. Tällaiset verkot koostuvat solmuista (engl. node) ja niitä yhdistävistä linkeistä (engl. link), jotka voivat olla suunnattuja tai suuntaamattomia. Verkoston linkeistä ja solmuista koostuvan kokonaisuuden tehokkuus (kytkettyvyys) ja resilienssi tai joustavuus riippuu pitkälti verkoston rakenteesta eli topologiasta (ks. Kuvio 1 ja esim. [Rodrigue](#) 2020).

Verkkoteoriaa sovelletaan monilla eri tieteenaloilla, kuten fysiikassa, biologiassa, sosiologiassa, maantieteessä ja luonnollisesti myös liikennetutkimuksessa. Verkko-teorian suomenkielinen termistö ei kuitenkaan ole kovin vakiintunutta

<sup>8</sup> Ks. esim. E. Hiltunen, L. Linko, S. Hemminki, M. Hägg, E. Järvenpää, P. Saarinen, S. Simonen, P. Kärhä (2011, toim.), Laadukkaan mittaamisen perusteet, MIKES.

<sup>9</sup> Mm. arvostetun liiketaloustieteen tutkijan Yuji Ijirin viisaus perusteoksessaan "Theory of Accounting Measurement" (1975) oli pelkistetysti seuraava: **"Jos et tiedä, mitä mittaat, ei asia parane sillä, että mittaat"**.

Verkkoteoriaa hyödyntävää poikkitieteellistä tutkimusalaa kutsutaan verkostotieteeksi (engl. network science), siinä missä verkkoteoria yleisesti mielletään matematiikan ja toisaalta myös teoreettisen tietojenkäsittelytieteen osa-alueeksi. Pohjimmiltaan verkko on siis verkkoteorian määrittämä solmujen ja niitä yhdistävien linkkien kokonaisuus. Verkko kuvaa verkostomaisen rakenteen neutraalisesti riippumatta sen sisällöstä ja tulkinnasta ja esittää, mitä reittejä verkossa eri solmujen välillä on. Verkkoteorian keskeisiin tutkimusongelmiin kuuluvat mm. saavutettavuus, yhtenäisyys ja laajentuvuus.

Monet verkkoteorian ongelmista luokitellaan NP-täydellisiksi. Yksinkertaistaen se tarkoittaa sitä, että kyseinen ongelma on nykyisten tietokoneiden laskentakapasiteetin ulkopuolella, jos verkon solmujen tai linkkien joukko, eli systeemin koko kasvaa riittävän isoksi. Tällöin ei ole tiedossa menetelmää, jolla kyseinen ongelma voidaan ratkaista järkevässä ajassa.

Kuten aiemmin todettu, laaja väyläverkko on käytännössä aina systeemien systeemi, jossa sen solmujen ja linkkien määrä, luonne (esimerkiksi suunnattu tai suuntaamaton linkki) ja vaikkapa kapasiteetti eri ajan hetkinä muodostaa helposti NP-täydellisen ongelman, jota ei voi laskennallisesti ratkaista.

Verkkoteoriaan perustuva mallinnus on kuitenkin käyttökelpoinen menetelmä myös väyläverkon resilienssiä arvioitaessa, kun tarkasteltavan ilmiön ja/tai systeemin tarkastelutaso ja laajuus asetetaan niin, että laskennallinen ratkaisu on mahdollista tuottaa. Tarkasteltavia ongelmia voivat tällöin olla esimerkiksi väyläverkon toiminnallisuuden herkkyyks tai sietokyky tilanteissa, jossa tietyt väylästä osat eivät ole käytössä.

### 4.2.3 Väyläverkon resilienssin laadullinen mittaaminen

Väyläverkot ovat myös kiinteä osa yhteiskunnan sosiaalista rakennetta, ja niillä on monia vaikutuksia ja keskinäisriippuvuuksia, joita ei voi mitata (pelkästään) formaalin metrologian tai verkkoteorian keinoin. Tällaisia mittareita ei ole juurikaan julkaistu, mutta eräs esimerkki on Uusi-Seelannista (Hughes & Healy 2014), jossa infrastruktuurin resilienssin attribuutteja eli osatekijöitä ehdotettiin laadullisesti arvioitavaksi. Näitä osatekijöitä olivat:

- palvelutaso [lähinnä keskittyen palvelutasomäärittelyyn]
- mukautumiskyky
- yhteisöjen valmius [kriisitilanteissa]
- vastuunkanto ja -tunto
- infrastruktuurin keskinäiset riippuvuudet [korostaen systeemistä ajattelua]
- taloudelliset resurssit
- jatkuvuus resilienssin varmistamisessa
- organisaatioiden suorituskyky.

Nämä osatekijät ovat pääosin niin sanotun pehmeän resilienssin alueella. Tällaisia osatekijöitä voidaan myös operationalisoida tarkemmiksi mittareiksi, kuten vaikkapa edellä mainitun palvelutason osalta:

- pääsy hätäpalveluihin (esimerkiksi terveyskeskukset ja sairaalat)
- muiden kuin liikenneyhteyksien toimivuus; ml. sähkösaanti ja teleyhteydet.

## 4.3 Esimerkkejä väyläverkon resilienssin mittareista

Resilienssin mittaamisen edellytyksenä on resilienssin purkaminen mitattaviin ja operationalisoitaviin osatekijöihin. Ilman operationalisointia ei voida tehdä mittauksia, eikä ilman mittauksia voida määrittää resilienssin haluttua tavoitetasoa. Resilienssin mittaaminen on työläs, joskaan ei mahdoton tehtävä.

Useimmissa yrityksissä mitata resilienssiä on pyritty rakentamaan indeksi, joka koostuu useasta muuttujasta, joilla yritetään kuvata jotakin tiettyä resilienssin osa-aluetta. Oleellista on myös tunnistaa ne uhat ja riskit, joita vastaan resilienssiä halutaan rakentaa tai mitata. Resilienssi sääilmiöitä vastaan ei tarkoita resilienssiä terrorismia vastaan. Toki voidaan myös rakentaa eräänlaista 'kokonaisresilienssiä', jolloin eri uhat edustavat mittaamisen eri osa-alueita ja -tekijöitä.

Alla on esitetty muutama esimerkki, miten resilienssiä tai sen osatekijöitä on operationalisoitu väyläverkon kontekstissa.

### 4.3.1 Äärisään riski-indikaattori Extreme Weather Risk Indicator (EWRI)

Molarius ym. (2014) ja Leviäkangas ym. (2013) kuvasivat koko liikennejärjestelmän säähaavoittuvuuden mittaamiseksi mittausjärjestelmää, joka perustui eräänlaisen riski-indeksin määrittämiseen. EWRI (Extreme Weather Risk Indicator) laskettiin määrittämällä ensin liikennejärjestelmälle haavoittuvuusluku, joka sitten kerrottiin äärisään todennäköisyydellä. Koska resilienssi voidaan ymmärtää haavoittuvuuden käänteislukuna tai vastakohtana, niin haavoittuvuuden ja haitallisen sääilmiön yhdistelmä (tulo) kertoo myös resilienssin kyseistä äärisääilmiötä vastaan. Indikaattori määritettiin maatasolla EU-27-jäsenmaissa.

Haavoittuvuusluku  $V$  määritettiin seuraavasti:

$$V = \frac{E \times S}{CC} \quad (6)$$

missä:

$E$  = altistuminen (exposure)  
 $S$  = herkkyys (susceptibility)  
 $CC$  = sietokyky (coping capacity).

Näille tekijöille annettiin puolestaan seuraavat määreet:

- **altistuminen  $E$**  koostui muuttujista Eurostatin tietokantojen muuttujista
  - liikennesuorite; kuta suurempi liikennesuorite, sitä suurempi on altistuvan liikenteen määrä asianomaisessa maassa
  - väestötiheys; tiheän väestön alueella altistuvan ihmisjoukon määrä on suurempi kuin harvaan asutulla seudulla

- **herkkyys S** koostui muuttujasta
  - liikenneväylien laatuindikaattori, joka otettiin The Global Competitiveness Reportista (Schwab 2012); indikaattori perustui valtiolliseen vertailuun liikenneinfrastruktuurin laadusta; tämä indikaattori puolestaan perustui edelleen useaan osatekijään
- **sietokyky CC** koostui muuttujasta
  - ostovoimapariteetilla korjattu bruttokansantuote (IMF 2012).

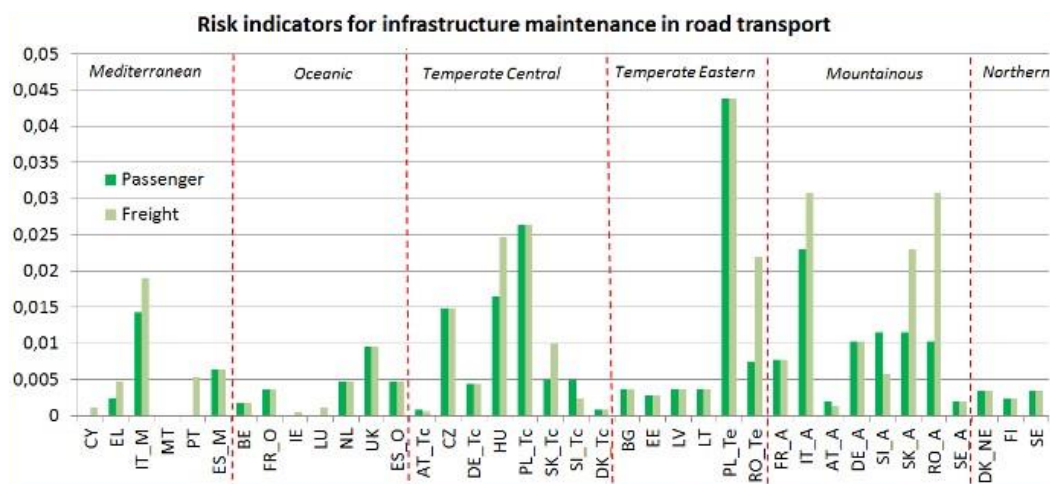
Näille muuttujille annettiin edelleen luokitusarvot 0–1 kvartaaleittain siten, että jokainen muuttuja sai arvon 1,0–0,75–0,5–0,25 sen mukaan miten maat rankkautuivat suhteessa toisiinsa. Tuloksena oli synteettinen haavoittuvuusluku.

Syynä asteikon tyyppiin oli sen 'skaalaus' tai 'normeeraus' ymmärrettäväksi. Tavoitteena oli näyttää havainnollisesti, millä EU-alueilla äärisäiden aiheuttamat resilienssiongelmat ovat vakavimmat. Esitystapa palvelee esim. infraluotottajien riskianalyysijä.

Tämän jälkeen EWRI:ssä haavoittuvuusluku V määritettiin haitallisen äärisääilmion todennäköisyys (P) kertomalla kolme osatodennäköisyyttä keskenään: sääilmion todennäköisyys, todennäköisyys ilmiön vaikuttavuudelle ja lopulta todennäköisyys sille, että ilmiön seuraukset johtavaan mitattavaan haittaan. Osatodennäköisyydet arvioitiin tilastoista, kirjallisuudesta sekä käyttämällä asiantuntija-arvioita. Sääilmion todennäköisyyteen käytettiin sää- ja ilmastomalleja.

Riski-indikaattori EWRI sai lopulta muodon

$$EWRI = V \times P = V \times P_{sää} \times P_{vaik} \times P_{haitta} \quad (7)$$



Kuvio 17. EWRI-riski-indikaattori EU-maiden eri ilmastovyöhykkeillä, riskit tieinfran ylläpitoon liittyen henkilö- ja tavaraliikenteen osalta (lähde: Molarius ym. 2012); y-akselin suure yksikötön vertailuluku; suurempi lukuarvo tarkoittaa suurempaa riskialtistusta.

Tuloksena oli synteettinen riski-indikaattori, joka kuvasi liikennejärjestelmään kohdistuvia äärisääriskejä. Tyypillisesti korkean tulotason pohjoisissa Euroopan maissa äärisääriskit olivat pienet ja Itä-Euroopan alemman tulotason ja huonompilaatuisen infrastruktuurin maissa äärisääriskit korostuivat (Kuvio 17).

### 4.3.2 Maailmanpankin ja Kioton yliopiston kehittämä tieprojektin resilienssimittaristo.

Marcelo ym. (2018) esittelevät Maailmanpankin ja Kioton yliopiston kehittämää resilienssimittaristoa rakennettaville tieprojekteille. Mittaristo nojautuu resilienssin peruskaavioon (ks. Kuvio 4) soveltaen seuraavia peruskäsitteitä:

- toiminnallisuuden tason lasku (loss of functionality)
- palautumisaika (time for recovery)

Toiminnallisuuden tason lasku (tai romahdus) saa puolestaan aikaan viiveitä, eli aikakustannuksia, ja saattaa viivästyttää avustus- ja sairaskuljetuksia, mistä seuraa inhimillisiä kärsimyksiä. Liitteessä 2 on ote indikaattoreista, joita sovellettiin Toyookan ohikulkutiehen, jolla pyrittiin välttämään vanhan valtatie (National Highway no. 312) toistuvat tulvista aiheutuvat ongelmat (Kuvio 18).



*Kuvio 18. Toyookan ohikulkutie Honshūn pääsaaren eteläosassa Japanissa; tierakenteella ja -linjauksella on pyritty välttämään aiemman tielinjauksen tulvaongelmia.*

Kriittisiä pisteitä olivat Toyookan lentokenttä (palvelutason ja yhdistävyyden näkökulma) ja sairaala (turvallisuuden ja kriisitilanteiden näkökulma). Operationaalisia mittareita olivat esimerkiksi matka-ajat sairaalaan ja osuus väestöstä, joka saatiin parempien palveluyhteyksien päähän.

Mittariston tarkoituksena oli analysoida ohikulkutienprojektin vaikutuksia resilienssiin, ei niinkään itse infrastruktuurin näkökulmasta kuin liikenteellisten, taloudellisten ja sosiaalisten vaikutusten suhteen.

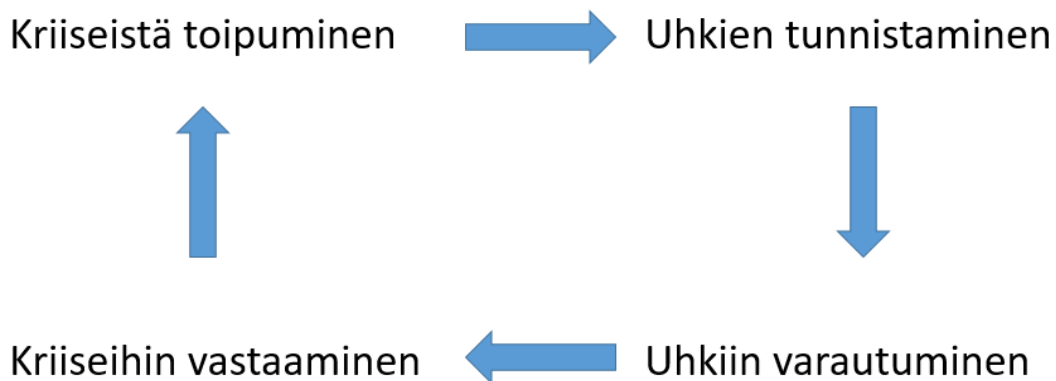
## 4.4 Resilienssin viitekehyksiä

### 4.4.1 Käsitteelliset lähestymistavat

Käsitteellisiä viitekehyksiä resilienssin määrittämiseen ja määrittelemiseen on useita. Näitä käsiteltiin osin jo resilienssin määrittelemisen yhteydessä luvussa 2, mutta muitakin on löydettävissä. Seuraavassa on esitelty lyhyesti muutamaa, joissa keskitytään nimenomaan infrastruktuurin resilienssiin.

Useimmat näistä viitekehyksistä perustuvat resilienssin peruskäsitteistöön, kuten resilienssisykliin (disaster management cycle), joka puolestaan perustuu YK:n UNSDRR:n (United Nations Disaster Risk Reduction) näkemykseen (Kuvio 19).

Tämä näkemys puolestaan linkittyy kestävän kehityksen tavoitteisiin (SDG, Sustainable Development Goals), erityisesti tavoitteeseen 11 ”kestävät kaupungit ja yhteisöt”. Toisin sanoen resilienssi sisältyy pitkälti kestävän kehityksen ajatusmaailmaan.



*Kuvio 19. Resilienssisyklin (disaster management cycle) havainnollistus; perustuu United Nations Disaster Risk Reduction -ohjeen näkemykseen (Yhdistyneet kansakunnat 2015).*

OECD (2021) määrittelee infrastruktuurin resilienssiin kohdistuen neljä oleellista näkökulmaa, joissa teknologisten lähtökohtien lisäksi henkiset ja taloudelliset resurssit:

sääntelyn ja hallinnon näkökulma; infrastruktuurien resilienssin varmistamisessa tarvitaan systeeminen orientaatio, joka onnistuu vain hallintosektorien rajat ylittävällä toiminnalla, jota sääntelyjärjestelmä tukee;

infrastruktuurien elinkaaren hallinnan näkökulma sekä elinkaaren hallinnan innovaatiot; erityisesti korostetaan uuden teknologian (ns. infratech) hyödyntämistä oikea-aikaiseen ja optimaaliseen kunnossapitoon;

Osaamisen kehittäminen resilienssin systeemissä ja projektikohtaisessa suunnittelussa sekä infratechin hyödyntämisessä; tähän kohtaan sisältyy myös hankintaosaamisen kehittäminen

Rahoituksen ja resurssien kohdentaminen infrastruktuurin resilienssiin, mukaan lukien erilaiset PPP-ratkaisut.



OECD:n lähestymistapaa voisi yhtä hyvin kuvata 'infrastruktuuristrategiaksi' joka ulottuu selkeästi laajemmalle kuin pelkästään fyysiseen väyläverkostoon.

#### 4.4.2 Kansallisia konteksteja

Infrastruktuurin resilienssiä ja sen hallintaa on kansallisella tasolla käsitelty ainakin seuraavissa maissa:

- **Australia:** A Pathway to Infrastructure Resilience (Infrastructure Australia 2021a, 2021b); Australian tapauksessa korostuvat elinkaaren mittainen ajattelu ja skenaariopohjainen riskien hallinta.
- **Yhdysvallat:** Infrastructure Resilience Planning Framework (IRPF) (Cybersecurity & Infrastructure Security Agency, 2021); suunnittelukehikko kattaa sekä fyysisen että digitaalisen infrastruktuurin, ja ulottuu hyvin laajalle mukaan lukien terveydenhuolto, ruokahuolto ja maatalous, informaatioinfrastruktuuri, energia, jne.
- **Yhdistyneet kuningaskunnat:** Anticipate, React, Recover – Resilient infrastructure systems (National Infrastructure Commission 2020); tämäkin perusdokumentti pohjautuu resilienssisyklin ajatusmalliin ja väljästi esimerkiksi ISON riskistandardeihin.

Yhteenvedon voidaan todeta, että erilaiset resilienssin viitekehykset pohjautuvat lähtökohtaisesti jo tunnettuihin ja dokumentoituihin malleihin, eikä niissä ole perustavaa laatua olevia uusia lähestymistapoja. Yhdysvaltojen kriittisen infrastruktuurin määritelmät ovat ehkä kaikista ulottuvimmat, mutta tällöin taas infrastruktuurikohtainen resilienssin operationalisointi – mittaaminen – jää pinnalliseksi. Vahvuutena on tietysti se, että resilienssin tarve tunnustetaan laajasti eikä vain sektori-kohtaisesti.

#### 4.4.3 Kvantitatiiviset lähestymistavat

Kvantitatiiviset lähestymistavat resilienssiin perustuvat yleensä todennäköisyyspohjaisiin riskianalyysiin, joissa määritetään riskien esiintymistodennäköisyys, vaikutusten todennäköisyys, sekä vaikutusten ilmaiseminen rahamääräisinä tai muina kvantitatiivisina suureina. Yleinen logiikka toimii seuraavan yhtälön mukaisesti ( $P$  on todennäköisyysoperaattori,  $q$  on vahingon yksikkökustannus:

$$P(\text{ilmiö}) \times P(\text{vaikutukset}) \times P(\text{vahingon määrä tai laajuus}) \times q$$

$$= \text{haitallisen ilmiön aiheuttamien kustannusten tai vahinkojen odotusarvo} \quad (8)$$

Kaikilla ilmiöillä (ja riskeillä) on oma todennäköisyytensä, kuten esimerkiksi:

- sääilmiöllä
- sillä, aiheuttaako se vaikutuksia
- ja sillä, kuinka suuria vaikutukset ovat.

Kukin todennäköisyys voi teoriassa olla toisistaan riippumaton. Niiden hallinta erillisinä on kuitenkin laskennallisesti helpompaa. Esimerkiksi:

$$P(\text{jäätävä sade}) \times P(\text{jäinen tien pinta}) \times P(\text{lisääntynyt onnettomuusriski}) \times \\ \text{onnettomuusyksikkökustannus} \\ = \text{lisääntyneiden onnettomuuskustannusten odotusarvo} \quad (9)$$

On enemmänkin laskentatekninen valinta, määritetäänkö aiheutuvien vahinkojen yhteiskunnallista tai yksityistä kustannusta, vai pitäytyäänkö täysin teknisissä suureissa, kuten esimerkiksi määrittäen vaurioituneita kilometrejä tai elinkaaren lyhenemistä vuosina. Myös vaikutuksia erilaisiin kuntoindekseihin voidaan periaatteessa määrittää. Perusperiaate, todennäköisyyksiin tai asiantuntija-arvioihin perustuva estimointi, on silti aina likipitään sama ja käytännön tarpeet, ja lähtötietojen saatavuus sanelevat yksityiskohtaista soveltamista.

Riskien, vaikutusten ja määrien arvioinnissa voidaan käyttää pääsääntöisesti kahta lähestymistapaa: joko nojautuen todennäköisyyspohjaisiin vaikutusketjuihin (Markovin ketjut) tai deterministisiin malleihin, kuten kunto- ja vauriokäyriin tai -luokituksiin (Leviäkangas ym. 2019). Näitä lähestymistapoja voidaan myös yhdistellä eri tavoin.

Molemmille soveltamisen perustavoille on kuitenkin yhteistä se, että niiden perustaksi tarvitaan varsin syvällistä mallinnustyötä, joka puolestaan vaatii merkittävän määrän kokeellista tutkimusta. Kumpaakaan näistä ei Suomessa tehdä riittävästi, jotta oma kansallinen tietopääoma olisi tarvittavalla tasolla (vrt. luku 4.3.1. OECD:n toteamus osaamisen kasvattamisen tarpeesta). Tähän on syytä kiinnittää myös Suomessa, eli käytännössä esimerkiksi Väylävirastossa.

Resilienssi liittyy kvantitatiivisiin lähestymistapoihin olennaisesti yllä esitetyn yhtälön muuttujien kautta. Resilienssiä voidaan parantaa

- alentamalla vaikutusten todennäköisyyttä esimerkiksi rakenteellisin ratkaisun tai yksinkertaisesti sijoittamalla perusrakenteet siten, etteivät ne altistu ilmiöille ja/tai niiden potentiaalisille vaikutuksille
- rajoittamalla vahingon määrää ja laajuutta joko edellä mainituin keinoin tai varautumalla varajärjestelmin tai vaimentaen vahinkoja nopealla reagoinnilla.

Sen sijaan yksikkökustannuksiin tai ilmiöiden todennäköisyyksiin ei juurikaan voida vaikuttaa.

#### 4.4.4 Resilienssiin läheisesti liittyviä standardeja

Resilienssiin liittyvä normisto ja standardit ovat pääsääntöisesti riskien hallintaan kytkettyjä. Näistä oleellimmat on tiivistetyksi listattu alla.

##### **CEN TS 17091:2018 Crisis management. Guidance for developing a strategic capability.**

Tämä standardi on itse asiassa kriisijohtamisen standardi, joka kattaa erilaiset organisaation johtamisen osa-alueet ja prosessit kriisitilanteissa. Standardia noudattamalla pyritäänkin kasvattamaan organisaatioiden resilienssiä.

---

### **SFS-ISO 22031:2019 Security and resilience. Business continuity management systems.**

Tämä standardi on myös johtamisjärjestelmiin liittyvä, ja sen noudattamisella pyritään varmistamaan toimintojen (liiketoiminta, palveluprosessit, mukaan lukien julkinen hallinto) jatkuvuus häiriö- ja kriisitilanteissa, joissa toiminnot joko täysin tai osin pysähtyvät tai häiriytyvät. Tavoitteena on varmistaa toimintojen palautuminen ja jatkuvuus sekä vähentää häiriöistä aiheutuvia vahinkoja ja seuraamuksia. Tässäkin standardissa pyritään organisatoriseen mutta myös toiminnalliseen resilienssiin.

### **SFS-ISO 22313:2020 Security and resilience. Business continuity management systems. Guidance on the use of ISO 22301.**

Standardi on lähinnä ohjeistus standardin ISO 22301:2019 soveltamiseen.

### **SFS-ISO 31000:2018 Risk management. Guidelines.**

Tämä standardi on yleinen riskien hallintaan ja johtamiseen liittyvä standardi. Se keskittyy nimenomaan ohjeistamaan riskien tunnistamista, niihin varautumista ja niiden hallintaa, mukaan lukien kokemusten kerääminen ja niistä oppiminen.

Edellä lueteltujen standardien pääpaino on organisaation suunnittelun, johtamisen ja prosessien hallinnassa. Ne ovat yleisstandardeja, jotka sisältävät käyttökelpoisia 'muistilistoja' organisaatioiden ja toimintojen resilienssin kehittämiseksi.

## 4.5 Yhteenveto

Resilienssiä voidaan mitata sekä kvalitatiivisin että kvantitatiivisin mittarein. Kvantitatiiviset mittarit perustuvat yleensä:

- todennäköisyyspohjaisiin riskianalyysiin
- erilaisiin indekseihin tai indikaattoreihin, jotka rakennetaan useamman muutujan turvin
- taloudellisiin mittareihin, kuten vahinkojen kustannuksiin<sup>10</sup>.

Näitä kaikkia menetelmiä voidaan yhdistellä.

Kvalitatiiviset mittarit ovat yleensä deskriptiivisiä kuvauksia tai heuristiikkaan perustuvia luokitteluja, asiantuntija-arvioita tai loogisia päätelmiä. Kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia menetelmiä voidaan myös yhdistellä.

---

<sup>10</sup> Esim. Yhdysvaltojen National Oceanic and Atmospheric Administration on arvioinut maata vuodesta 1980 kohdanneiden ympäristötuhojen taloudellisia vaikutuksia. Vuodesta 1980 vuoteen 2021 rekisteröityjä vakavia tapauksia oli 308, joissa on menehtynyt hieman yli 15 000 henkeä, ja joiden taloudelliset vahingot ovat lähes USD 2 100 miljardia (<https://www.ncdc.noaa.gov/billions/>).

---

Mittaristojen rakentelussa voidaan hyödyntää erilaisia standardeja, aiempia esimerkkejä ja tutkimustuloksia. Mittaristojen käyttökelpoisuutta sanelevat perinteiset mittaamisen lainalaisuudet:

- validiteetti – mittari mittaa juuri sitä ilmiötä tai muuttujaa jota sen on tarkoituskin mitata
- tarkkuus – mittari mittaa ilmiötä tai muuttujaa riittävän tarkasti, jotta sen soveltaminen on mielekästä
- luotettavuus – mittaaminen tuottaa luotettavasti tarvittavan tiedon, eikä tiedon laatu (mittaustulos) vaihtele mittaamiseen vaikuttavien muiden tekijöiden pysyessä muuttumattomina (*ceteris paribus*)
- käyttökelpoisuus – mittaria voidaan soveltaa käytäntöön ja se tukee päätöksentekoa
- ymmärrettävyys – mittari on riittävän laajalti ja syvällisesti ymmärretty, jotta sitä osataan soveltaa oikein, tulkita oikein ja että sen rajoitteet ja epätarkkuuslähteet tunnetaan
- kustannukset – mittaaminen ei saa tulla liian kalliiksi.

Mittaristojen kehittämisen etuna on se, että mittaaminen mahdollistaa mallinnuksen, ja sen myötä päätöksentekoon voidaan kehittää entistä parempia ja ajan yli toimivia menetelmiä ja prosesseja.

## 5 Liikennejärjestelmän resilienssin arvioinnin konteksti Suomessa

### 5.1 Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma ja muut keskeiset ohjausasiakirjat

Syysyllä 2021 vahvistettu Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma (VLJS) vuosille 2021–2032 on strateginen suunnitelma liikennejärjestelmän kehittämisestä.

Se on kattava kokonaisuus liikennejärjestelmän kehitystarpeista ja -suunnista, ja sen 12-vuotinen suunnittelujänne on uusi poliittinen linjaus. Suunnitelman edellyttämät resurssit perustuvat kuitenkin kunkin hallituksen talousarvioesityksiin, eli sen rahoituskehystä ei ole vahvistettu koko tuolle ajanjaksolle.

VLJS:n mukaan (VLJS 2021, s. 32; lihavointi tämän raportin kirjoittajien):

“Vuonna 2050 Suomen liikennejärjestelmä toimii ympäristöllisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti kestävästi ja takaa riittävän saavutettavuuden ihmisille ja elinkeinoelämälle. Liikenne toimii multimodaalisesti ja päästöttömästi. Liikkumisen ja logistiikan kustannukset ovat pienentyneet. Suomi on onnistunut ratkaisemaan liikenneverkon rahoitusta koskevan haasteen uusilla toiminta- ja rahoitusmalleilla. Suomi on vaihtoehtoinen käytävä ja solmukohta maailmanlaajuisille matkustaja-, tavara- ja datavirroille. Liikennejärjestelmässä on huomioitu huoltovarmuus sekä varautumisen ja valmiuden vaatimukset siten, että **Suomessa voidaan luottaa liikennejärjestelmän toimivuuteen ja resilienssiin kaikissa olosuhteissa ympäri vuoden.**”

Termi “resilienssi” esiintyy raportissa tuon yllä esitetyn otteen lisäksi vain kerran seuraavassa kohdassa (VLJS 2021, s. 40):

“Toimenpideohjelmassa tarkastellaan myös liikennejärjestelmän läpileikkaavia teemoja, joita ovat esimerkiksi liikenneturvallisuus ja digitalisaatio. Digitalisaation edistäminen ja tiedon täysimääräinen hyödyntäminen on teollisuuden keskeinen kilpailukykytekijä sekä myös väestön hyvinvoinnin edistäjä. Digitalisaation ja tiedon hyödyntämisellä pyritään tuottavuuden kasvattamiseen ja jo olemassa olevien rakenteiden täysimääräiseen hyödyntämiseen sekä uuden kestävä kasvun sekä uusien palvelujen ja liiketoiminnan luomiseen. Tämä on olennaista myös julkisten palvelujen parantamiseksi. **Kestäväällä tavalla toteutettu digitalisaatio voi edistää myös yhteiskunnan resilienssiä ja toimintavarmuutta.** Tiedon laajamittainen hyödyntäminen kuitenkin edellyttää kokonaisturvallisuuden ja kansallisen turvallisuuden näkökulmasta tehtyä arviota tiedon kriittisyydestä ja tiedon tehokkaasta suojaamisesta. Tämän jälkeen pilotoimalla ja kokeilemalla pystytään testaamaan uusia toimintamalleja ja viemään niistä parhaita käytäntöön.”

Yhteenvedon VLJS:n osalta voi todeta, että resilienssin tematiikkaa on sivuttu vain hyvin ohuesti ja yleisellä tasolla, eikä termin sisältöä ole avattu millään tavalla. Näin ollen sen maininta kahdessa kohtaa jää suunnitelmaraportissa merkityksettömän täytesanan tasolle.

Kuten myöhemmin tässä raportissa osoitetaan, termi on nopeasti vakiintunut mm. EU:n ja useiden rahoituslaitosten, kuten EIB:n ja EBRD:n sekä esimerkiksi OECD:n sanastoon erityisesti infrastruktuurihankkeiden yhteydessä. Termi tulisikin sisäistää paremmin myös Suomessa ja ottaa pikaisesti laajaan käyttöön erityisesti silloin, kun haetaan EU- tai muuta kansainvälistä rahoitusta infrastruktuurihankkeille.

## 5.2 Haasteet resilienssin suunnittelussa

Toimintojen tasot resilienssin suunnittelussa voidaan karkeasti jakaa seuraavasti: 1) (liikenne)järjestelmätaso; 2) päätöksentekotasotaso; 3) hankintataso ja 4) projektitaso. Näiden sisällä tapahtuvan toiminnan luonne muuttuu riippuen siitä, onko kyseessä väyläverkon a) suunnittelu, b) rakentaminen vai c) ylläpito.

*Taulukko 4. Tasoja, joilla väyläverkon resilienssin kehittäminen eri vaiheissa tapahtuu, ja pelkistetty kuvaus niiden keskeisistä toimijoista.*

	Suunnittelu	Rakentaminen	Ylläpito
<b>Järjestelmätaso</b>	<b><i>Poliittiset ja resursointipäätökset:</i></b> valtionneuvosto ja LVM <b><i>Taustatyöt mm.</i></b> Väylävirasto <b><i>Kaavoituksen osalta</i></b> maakuntien liitot ja kunnat	Valtionneuvosto, LVM, Väylävirasto	Valtionneuvosto, LVM, Väylävirasto
<b>Päätöksentekotasotaso</b>	Valtionneuvosto, LVM, Väylävirasto, ELY-keskukset, maakuntien liitot ja kunnat	LVM, Väylävirasto, ELY-keskukset	LVM, Väylävirasto, ELY-keskukset
<b>Hankintataso</b>	Väylävirasto, ELY-keskukset, kunnat	Väylävirasto, ELY-keskukset; osin kunnat	Väylävirasto, ELY-keskukset; osin kunnat
<b>Projektitaso</b>	Väylävirasto, ELY-keskukset; kunnat, toteuttaja-organisaatiot	Väylävirasto, ELY-keskukset; kunnat, toteuttaja-organisaatiot	Väylävirasto, ELY-keskukset; kunnat, toteuttaja-organisaatiot

Taulukko 4 havainnollistaa tasoja, joilla väyläverkon resilienssiä voidaan parantaa, ja esittää pelkistetyt kuvaukset siihen liittyvistä keskeisistä toimijoista. Esimerkiksi valtiotasolla tulisi koko budjetointiprosessia harkita siten, että se mahdollistaa ketterät lisäpanostukset kriisien tai uhkien realisoituessa. Tuoreet kokemukset korona-pandemian aiheuttamista äkillisistä resursointitarpeista osoittavat, että talousprosessin kriisivalmiutta voidaan nostaa. Hankintojen osalta esimerkiksi kunnossapitosopimukseen sisällytettävät ehdot niihin tilanteisiin, joissa vaikkapa äärisäätilmiö vaatii poikkeuksellisia kunnossapitotoimenpiteitä, voivat olla tulevaisuudessa hyvinkin tarpeellisia. Projektitasolla resilienssiä voidaan tarvita jopa projektien toteutuksessa, mutta toteutuksen laadulla on merkittävä vaikutus elinkaaren mittaiseen resilienssiin. Tällöin laadunvarmistukseen olisikin kiinnitettävä erityistä huomiota.

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin eräitä keskeisiä hankearvioinnin ja hankkeiden toteutuksen haasteellisia osa-alueita, joissa väyläverkon resilienssin kehittäminen voisi toimia nykyistä paremmin.

### **5.2.1 Hyöty-kustannusmallin päivittäminen resilienssin huomioimiseen**

Suomessa ja useimmissa muissa kehittyneissä maissa nykyisin käytössä oleva hyöty-kustannusmalli ei sisällä resilienssiä erillisenä hyötyjen osatekijänä. Kyseen voisi tulla esimerkiksi riskipohjainen ja ajan yli arvioitu taloudelliseksi suureeksi muutettu (toiminnallinen tai vaikkapa turvallisuuteen liittyvä) hyöty siitä, että järjestelmän tekninen tai toiminnallinen häiriönsietokyky ja kyky toipua häiriöistä paranee. Tämän tyyppisten hyötyjen kvantifointi on vaikeaa, sillä niiden arviointi perustuu väistämättä erilaisille riskiarvioille ja todennäköisyyksille niin häiriöiden tai häiriötilanteiden vakavuuden, frekvenssin ja vaikutusten sekä niiden ajallisen toteutumisen osalta.

Mitä pienemmästä hankkeesta koko järjestelmän kannalta on kyse, sitä hankalampi on osoittaa yhden hankkeen tai järjestelmän osan paremman resilienssin hyöty koko systeemin tasolla. Samalla minkä tahansa systeemin tai sen osan resilienssitason nosto aiheuttaa lähes aina kustannuksia. Toisin kuin joskus myöhemmin mahdollisesti saatavat hyödyt, nämä lisäkustannukset on yleensä mahdollista todentaa melko hyvin. Lisäksi tällaiset kustannukset realisoituvat jo hankkeen toteutusvaiheessa, mikä kasvattaa hankkeen kokonaiskustannuksia etupainotteisesti.

### **5.2.2 Resilienssin sisällyttäminen hankearviointiin**

Resilienssi on eräs väylähankkeen tuloksena syntyvän perusrakenteen osan (esimerkiksi tien tai radan) ominaisuus siinä missä vaikkapa kannattavuus tai yhteiskunnallinen hyväksyttävyyys. Vastaavasti kuin kannattavuudella ja hyväksyttävyydellä resilienssin dimensiot ovat moninaiset ja osittain tarkastelijan omista lähtökohdista ja intresseistä riippuvaiset. Tällaisia dimensioita voivat olla:

- resilienssi äärisääliä vastaan; tien tai radan kyky kestää sekä lyhytaikaisia että pitkäaikaisia säärasituksia voidaan lukea resilienssiin kuuluvaksi ominaisuudeksi
- resilienssi liittyen rakenteen alennettuun kunnossapitoon; jos esimerkiksi lumen poistoa ja aurausta vähennetään, voi resilientti rakenne silti olla palvelutasoltaan ja käytettävyydeltään kelpoinen ja riittävä
- resilienssi suurempaa liikennekuormitusta vastaan; kun rakenne joutuu joko kertaluonteisesti tai toistuvasti suuremman kuormituksen kohteeksi, niin resilientti rakenne kestää kuormituksen siten, ettei se vaurioidu tai heikenny.

Resilienssiä ei ole sisällytetty nykyisiin hankearviointimalleihin, mikä kertoo osin siitä, ettei hankearviointi ole juurikaan riskianalyysia sisältävä eikä hankkeisiin tai toteutusvaihtoehtoihin liittyviä erilaisia riskejä ole arvioitu hankkeiden arvioinnissa. Silti investointien riskiarviointi on eräs investointiteorian keskeinen lähtökohta.

Väyläviraston hankearvioinnin yleisohje (Väylävirasto 2020) ei suoranaisesti sisällä resilienssiin liittyviä ohjeita tai mainintoja. Riskejä ohje sivuaa seuraavasti:

- Teknisten ratkaisujen toimivuuden riskit: Arvioitava hanke saattaa sisältää tekniikkaa tai ratkaisuja, joiden toteuttamiseen ja käyttöön liittyy tavanomaista suurempia riskejä.
- Liikennöinnin riskit: Erityisesti ajoituksen kannalta voi olla tärkeä kysymys, millaiset ovat liikennöitsijän edellytykset tuottaa investoinnin mahdollistamia palveluja. Palvelun mahdollinen riippuvuus valtion tai kuntien rahoituksesta on esimerkiksi syytä käsitellä.
- Kysynnän riskit: Hankkeen kysyntä (ja siten hyödyt ja kannattavuus) voi riippua merkittävästi yhdestä tai muutamasta toimijasta tai maankäytöstä (kaavoitus ja rakentaminen).
- Kustannusriskit: Investointikohteen erityispiirteistä voi seurata, että kustannusarvio on tavanomaista epävarmempi. Kustannusarvion olennainen kasvu suunnittelun edetessä vaikuttaa paitsi kannattavuuteen myös rahoitusmahdollisuuksiin ja hankkeen rakentamisen keston.
- Ympäristö- ja turvallisuusriskit: Hankkeen rakentamisella tai käytöllä (tai toteuttamatta jättämisellä) voi olla merkittäviä luontoon, rakennettuun ympäristöön tai ihmisten terveyteen kohdistuvia riskejä. Nämä riskit on tunnistettu ympäristövaikutusten arvioinnissa.

Nämä riskit eivät kuitenkaan ole resilienssikäsitteen kattavia, vaan enemmänkin ohjeiston eri kustannus- ja hyötykomponenttien epävarmuuksiin liittyviä yksittäisiä riskejä. Luontevin paikka arvioida esimerkiksi äärisääilmiöiden riskejä voisi olla ympäristöarvioinnissa, mutta muitakin vaihtoehtoja voitaneen harkita

Resilienssin arviointi edellyttäisi huomattavasti nykyistä kattavampaa riskien arviointia. Tämä voidaan toteuttaa eri tavoin (Kuvio 20).

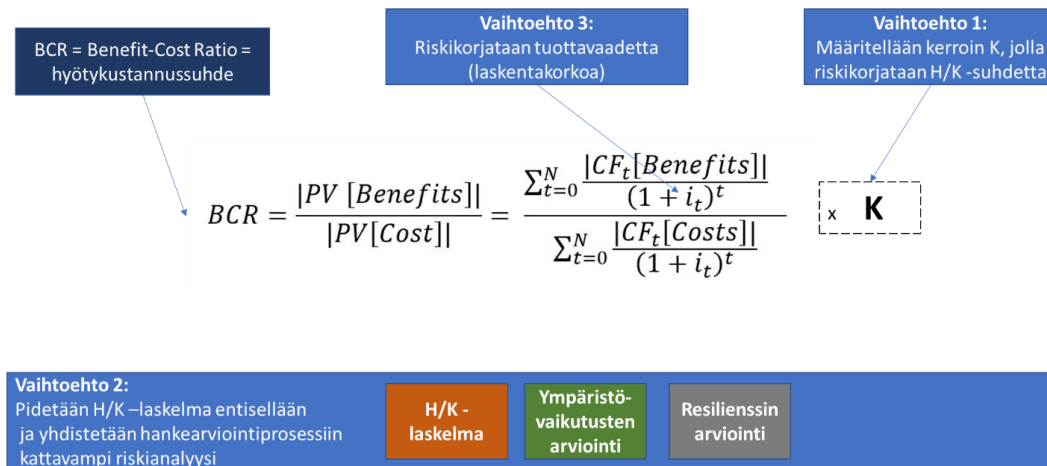
Eräs tapa toteuttaa resilienssin arviointi olisi kokonaisvaltaisemman **riskianalyysin sisällyttäminen hankearviointiin** siten, että laskettavaa hyöty-kustannussuhdetta korjattaisiin riskikertoimella. Näin tehdään yritysmaailman investoinneissa, joissa tuottovaade riskikorjataan. On sinänsä yhdentekevää, korjataanko tuottovaadetta (eli diskonttokorkoa) riskikertoimella, vaiko lopullista hyöty-kustannussuhdetta.

Molemmissa tapauksissa on kyse enemmän tai vähemmän päätöksentekijän preferenssistä soveltaa riskianalyysia investointilaskentaan. On kuitenkin huomattava, että tällöin hankearvioinnista tulee kaiken kaikkiaan entistä vaativampi toimenpide, joka ei niinkään helpota vaan paremminkin monimutkaistaa hankepäätösten tekemistä.

Toinen vaihtoehto on pitää kattavampi **resilienssin arviointi täysin erillisenä analyysinä** ja jättää resilienssin ja muun hankearvioinnin yhdistäminen päätöksentekijän tehtäväksi. Tälläkin toteutustavalla on heikkoutensa ja vahvuutensa. Sen heikkous on siinä, että päätöksentekijä asetetaan entistä haastavampaan asemaan ja on kyseenalaista, onko kaikilla päätöksentekijöillä tarpeeksi aikaa, halua ja kykyä paneutua kaikkiin analyysihin riittävän syvällisesti. Lähestymistavan vahvuus on siinä, ettei jo alkujaan monimutkaista päätöksentekotilannetta pyritä keinokekoisesti ja mekaanisesti yksinkertaistamaan.



**Kolmas vaihtoehto** olisi ensimmäisen vaihtoehdon variantti, jossa itse hankkeen tuottovaadetta riskikorjataan resilienssianalyysin mukaisesti. Kun havaitaan riski, esimerkiksi resilienssiä alentava haitallinen vaikutus väylärakenteen tai sen osan keston, nostetaan diskonttokorkoa. Vastaavasti alentuneissa riskeissä korkoa voidaan alentaa.



*Kuvio 20. Resilienssin sisällyttäminen hankearviointiin ja hyötykustannuslaskentaan.*

Alemman tuottovaateen resilientit ja/tai riskienkestävät hankkeet saavat alemman laskentakoron ansiosta paremman hyöty-kustannussuhteen. Tämän lähestymistavan vahvuutena voidaan pitää sen yhdenmukaisuutta investointiteorian kanssa, koska koko hyöty-kustannuslaskenta perustuu lähtökohtaisesti investointiteoriaan. Sen heikkous liittyy lähinnä tekniseen toteutukseen: miten asetetaan tuottovaateet erilaisille riskitasoille ja mitä kaikkia riskejä halutaan, tai on edes järkevää, sisällyttää laskentaan?

Pragmaattisin vaihtoehto on aloittaa erillisestä resilienssin arvioinnista, joka voidaan esittää vaikkapa liitteenä muissa arviointidokumenteissa.

### 5.2.3 Kustannustyyppien eriyttäminen tai tarkempi jako

Nykyisellään väylänpidon kustannukset ja rahoitussuunnittelu on eriytetty kahteen ryhmään: perusväylänpitoon ja kehittämisinvestointeihin. Tämä jako ei palvele tulevaisuuteen varautumista esimerkiksi resilienssi-investointeja ajatellen (sama problematiikka pätee myös esimerkiksi ilmastoinvestointeihin). Liian karkea jako saattaa eriyttää alueet strategisessa verkkosuunnittelussa ja resursoinnissa. Ellei resilienssi-investointien tarvetta ole erikseen painotettu, on riskinä, että ne jäävät muiden prioriteettien jalkoihin (vrt. Kuvio 21)

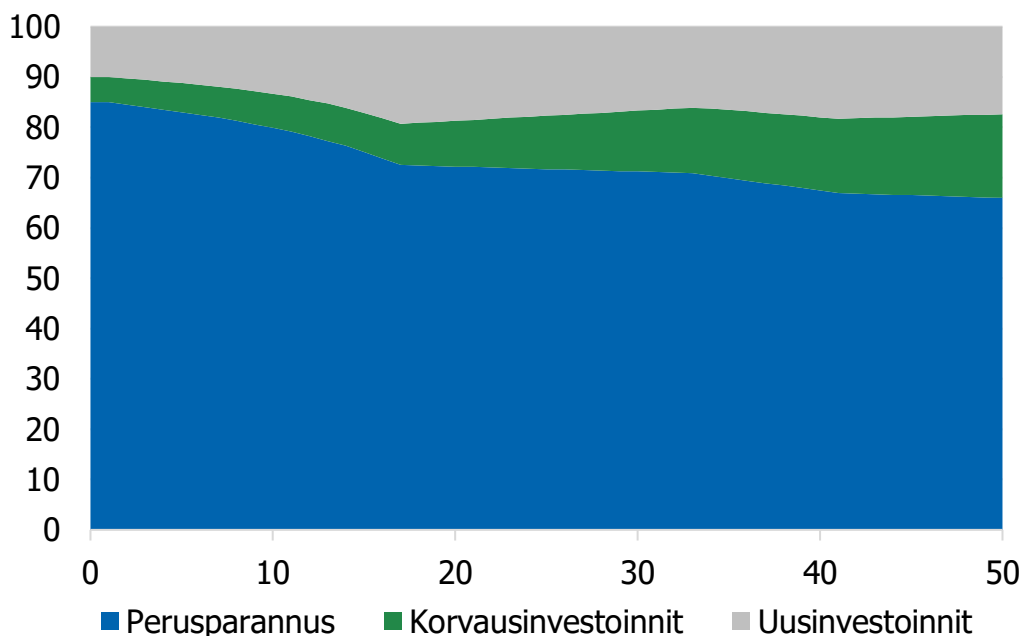
Varsinaiset uusinvestoinnit Suomen väyläverkostoon tulevat olemaan vähäisiä lukuun ottamatta muutamia pistemäisiä kohteita tai linkejä.

Sen sijaan korvausinvestoinnit ja laajahkot perusparannusinvestoinnit tulevat näyttelemään suurta osaa. Näillä investoinneilla päivitetään ja uudistetaan olemassa olevaa infrastruktuuria sen toimintavarmuuden, palvelukyvyyn ja resilienssin varmistamiseksi.

Olisikin tarpeen jakaa budjetointia strategisella tasolla toiminnallisuuden ja tavoitteiden mukaisesti tarkemmille tasoille. Tämä jako voidaan tehdä alueitasolla, jos niin halutaan, mutta olisi oleellista, että itse jaotteluun tulee selkeä kansallinen yleistason ohjaus tai ohjeistus. Muutoin muun muassa liikennepoliittiset, hallitusohjelmalliset ja strategiset tavoitteet jäävät roikkumaan ilmaan vailla rahoituskansallista konkretiaa ja vastuuta.

Esimerkiksi seuraavan tyyppistä, esimerkinomaista budjetointijakoa voisi harkita, osin myös yhdistellen, koska yksittäinen hanke usein sisältää monia alla mainittuja tavoitteita:

- **Elinkaari- ja resilienssi-investoinnit**
  - rakenteiden vahvistaminen
  - äärisää- ja ilmastokestävyyden lisääminen
  - elinkaaren jatkaminen
- **Turvallisuus- ja ympäristöinvestoinnit**
  - liikenne- ja terveysturvallisuuden lisääminen
  - haittavaikutusten vähentäminen
  - ympäristönsuojelu ja luonnon säilyttäminen
- **Palvelutasoinvestoinnit**
  - palvelutason parantaminen
  - infran digitalisaatio ja automaatio
  - ohjausjärjestelmät ja älyliikenne.



*Kuvio 21. Esimerkki kolmen kustannustyyppin jakaumasta tulevien noin 50 vuoden aikana. Kustannusosuuksien suhteet ja kehitys ovat havainnollistuksia.*

Investointeja, mukaan lukien perusväylänpidon panostuksia, voisi selkeämmin suunnata ja seurata niiden vaikuttavuuden suhteen. Osin näin tehdäänkin, mutta uudet tavoitteet, kuten ilmastovaikutukset ja resilienssi, tuovat uusia vaikuttavuuden osa-alueita.

Taulukko 5. Hanke- ja toimenpideohjelmointia helpottava esimerkkitaulukko.

Toimenpide tai projekti	Vaikuttavuus					Budjetti
	Sujuvuus	Turvallisuus	Hiilijalanjälki	Resilienssi	Palvelutaso	
Projekti A	++	+	--	0	0	100
Projekti B	+++	++	+	+	+	300
Projekti C	0	+	-	+++	0	20

Yksinkertaistetusti voisi hanke- ja toimenpideohjelmointia helpottaa esimerkiksi seuraavan tyyppinen taulukko, jolla voidaan havainnollistaa resurssiallokaatioita. Kyse on pitkälti viestinnällinen: miten näytetään, että julkiset varat käytetään viisaasti ja kansalaisten toivomalla tavalla (vrt. Taulukko 5)?

## 5.3 Resilienssin mittarit ja periaatteet

### 5.3.1 Väylästäön kunto

Väylästäön kunto on eräs resilienssin mittari. Hyväkuntoinen väylästäön kestää iskuja, shokkeja ja haitallisia ilmiöitä paremmin kuin huonokuntoinen. Perinteisiä väylästäön kuntomittareita voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. Perinteisten mittareiden (esim. tasaisuus, kantokyky) lisäksi olisi hyvä päästä käsiksi myös elinkaaren arviointiin, eli kuinka kestävä väylä on pidemmällä aikavälillä ja onko odotettavissa kunnan oletettua nopeampaa alenemista.

Teollisuudessa käytetyt ajantasaiset tai jatkuvat keinoälyä, algoritmeja tai trendianalyseja hyödyntävät kunnanmittausmenetelmät ja -diagnostiikka tarjoavat tähän monia työkaluja. Tällaisia kokeiluja on tehty Suomessakin, muun muassa kiihtyvyyssantureiden käyttö raitinfrakstruktuurin kunnan analytiikassa (Känsälä ym. 2018). Esimerkiksi joukkoistettu tiedonkeruu varsin yksinkertaisillakin menetelmillä voi tuoda uusia työkaluja käyttöön. Toki niiden kokeilu, validointi ja hyötykäyttöön-otto vaativat aikansa.

Väylästäön, joka myös poikkeuksellisissa ja hankalissa olosuhteissa kykenee tuottamaan riittävää palvelutasoa, on sietokykyinen ja resilienssin. Esimerkiksi väylästäön vioista tai palvelutason romahduksista johtuvat myöhästymiset tai matka-aikojen viivästymiset toimivat epäsuorina resilienssimittareina.

### 5.3.2 Väylästä ja liikkumispalveluiden yhteenkytkeytyvyys

Väylästä yhteenkytkeytyvyys (engl. interconnectivity<sup>11</sup>), eli sellainen väylästä, joka mahdollistaa joustavan siirtymisen liikennemuodosta toiseen tuottaa resilienssiä. Tällöin liikennemuodot pystyvät joissakin tilanteissa osin korvaamaan toisiaan ja tuottamaan edelleen riittävää liikkumispalvelua. Yhteenkytkeytyvyyden mittareina voisivat olla esimerkiksi

- multimodaalisten matkakeskusten ja tavaraterminalien määrä
- yhteiskäyttöiset liikennemuotoja yhdistävät lippujärjestelmät
- yhteiskäyttöiset ja yhteentoimivat matkasuunnittelu- ja aikataulujärjestelmät.

Infrastruktuurin osalta matkakeskukset ja terminaalit ovat oleellisia verkkoa ja palveluita yhdistäviä solmupisteitä. Perinteisten palvelujen (esimerkiksi junat ja bussit) ohelle on hyvää vauhtia muodostumassa uusia, joustavia liikkumispalveluita, kuten yhteiskäyttöiset autot tai kutsuohjattu joukkoliikenne. Näiden rooli tulee tunnistaa ajoissa solmupisteitä suunniteltaessa, jotta infrastruktuurissa osataan varata riittävät tilat ja palveluita tukevat infrastruktuurit. Näiden osalta ei juurikaan suunnitteluperiaatteita ole vielä kehitetty.

### 5.3.3 Liikenneverkon peittävyys

Liikenneverkon peittävyys tarkoittaa yksinkertaistaen sitä, kuinka suuri osa esimerkiksi väestöstä tavoittaa keskeiset kohteet, kuten rautatie- ja lentoasemat tai satamat ja pääväylät, tietyssä ajassa. Tarkastelu antaa arvokasta taustatietoa myös liikenneverkon resilienssin arviointiin.

Tarkastelussa voisi väestön sijaan olla periaatteessa myös yritykset ja/tai niiden tuotannollinen toiminta, mutta näiden tietojen yhdenmukainen kokoaminen on huomattavasti väestötietoja hankalampaa.

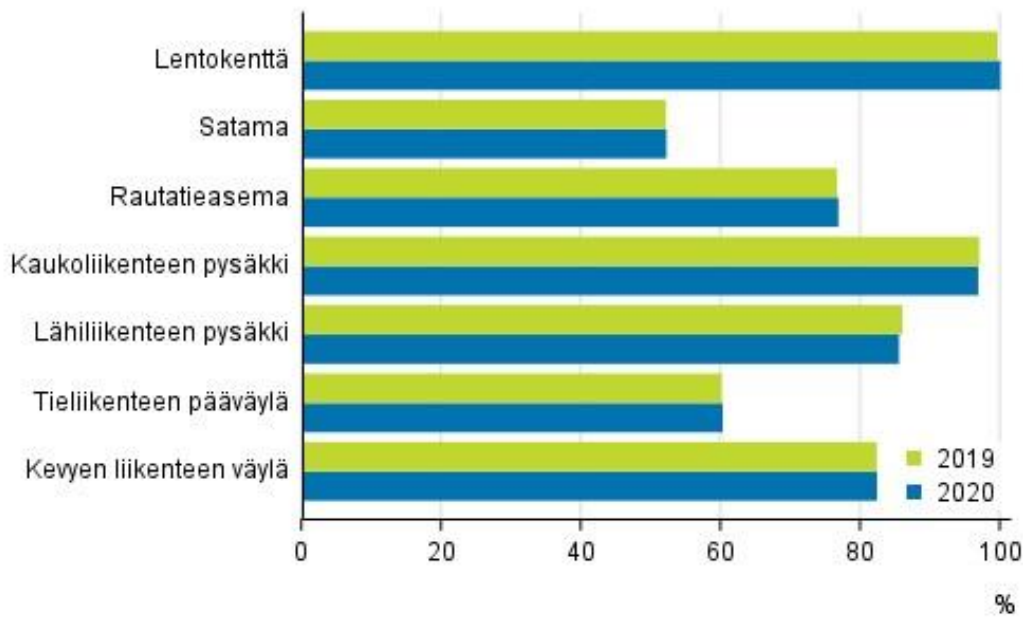
Liikenneverkon peittävyystilasto on Tilastokeskuksen kehittämä uusi kokeellinen tilasto, jossa tarkastellaan eri liikennemuotojen verkon peittävyttä tutkimalla kuinka suuri osa väestöstä saavuttaa liikennemuodon annetuilla kriteereillä.

Tarkastelussa käytetään väestön sijaintia kuvaavana aineistona neliökilometrin kokoisia tilastoruutuja ja liikennemuotojen liityntäpisteitä kuvaavana aineistona lentokenttiä, satamia, rautatieasemia, joukkoliikenteen pysäkkejä, pääväylien risteys- ja kevyenliikenteen väyliä sekä taajamatietoa.

Lisäksi saatavilla olevaa liikennöintitietoa hyödynnetään liikennemuotojen liityntäpisteiden luokitteluun. Niistä liikennemuodoista, joista on hyödynnetty liikennöintitietoa, on huomioitu alkuvuoden 2020 tilanne eli liikennöintitiedot ovat pandemiaa edeltävältä ajalta (Kuvio 22).

---

<sup>11</sup> Aiheesta löytyy melko paljon tutkimuskirjallisuutta sekä selvityksiä esim. hakusanoilla "interconnectivity of transport networks" tai "interconnectivity of transport infrastructure". Hyvä käsitteellinen yleisesitys on esim. Geenhuizen (2000) ja erittäin havainnollinen esitys Yhdysvaltain kaupunkien liikenneverkon yhteenkytkeytyvyydestä ja resilienssistä on Linkov ja Kurth (2019)



*Kuvio 22. Liikenneverkon peittävyys Suomessa vuonna 2020. Lähde: Tilastokeskus (2021); ks. Myös hallitusohjelma (Marin), ja tilastokeskuksen määritelmät.*

Tilastokeskuksen kokeellisessa tarkastelussa liikenneverkon peittävyys pysyi vuoden 2019 tasolla vuonna 2020. Pieniä muutoksia tapahtui lentokenttien ja rautatieasemien peittävydessä maakunnittain tarkastellen. Satamien, keuyen liikenteen väylien ja kauko- ja lähiliikenteen pysäkkien peittävyys pysyi koko valtakunnan ja myös maakuntien tasolla pääosin ennallaan.

Verkon peittävyyden kokeellisessa tilastoinnissa kohteille asetettiin asiantuntijatyönä aikarajat, jonka sisällä matka-ajan tuli olla, jotta liikenneverkon voitiin sanoa peittävän kyseessä olevan ruudun.

Keuyen liikenteen väylien osalta käytettiin muista poikkeavaa menetelmää. Keuyen liikenteen väylien katsottiin peittävän ruudun, jos Digiroad-aineiston mukainen keuyenliikenteen väylä sijaitsi tilastoruudussa tai jos tilastoruutu sijaitsi Suomen ympäristökeskuksen aineiston mukaisella taajama-alueella. Muille kuin keuyenliikenteen väylille määriteltiin seuraavat aikarajat:

- Tiestön pääväylät, 15 minuuttia autolla
- Raitiovaunu- ja linja-autopysäkit, 15 minuuttia autolla
- Lentokentät, 3 tuntia autolla
- Rautatieasemat, 30 minuuttia autolla (vrt. Kuvio 23)
- Satamat, 2 tuntia autolla

Aikarajat ovat siis kokeellisen tilastoinnin pohjana, jotta saavutettavuuslaskenta oli mahdollista tehdä. Olemassa olevalla laskentamallilla on luonnollisesti mahdollista tarkastella saavutettavuutta myös muilla parametriarvoilla.

Tällainen herkkyystarkastelu voisi tuottaa arvokasta taustatietoa myös liikenneverkon resilienssin arviointiin. Saavutettavuuden aikarajoja muuttamalla voidaan saada käsitys muutosten herkkyydestä (elastisiteetista) ja suuruusluokasta (eli käytännössä vaikutuksesta) koko valtakunnan alueella. Muutosten taustalla voi olla

esim. kokeellisesti rakennettu järjestely, jossa tiettyjen liikenneverkon osien välityskyky ja/tai kytkeytyvyys syystä tai toisesta heikkenee tai joku solmukohta tai pääväylä on poissa käytöstä kokonaan.

Tämän tyyppinen herkkyystarkastelu on teknisesti suhteellisen helppo toteuttaa, koska siihen tarvittava malli ja väestöpohjan taustadata ovat jo olemassa. Tällaisen hankkeen käynnistäminen osana viranomaisille tuotettavaa tai näiden toteuttamaa liikenneverkon resilienssin laajempaa empiiristä selvitystä olisi hyvä ottaa pohdintaan<sup>12</sup>.

Tieverkko on peittävyydeltään olennaisin väylästä. Suomen Tieyhdistyksen teettämän selvityksen mukaan 40–60 % maakuntien väestöstä asuu 5 km säteellä rautatieasemista ja yli 80 % enintään 20 km säteellä. Sen sijaan noin 70 % Suomen pinta-alasta ja vajaa 20 % väestöstä on yksinomaan tieverkon varassa. Tämä kuvastaa harvaan asuttujen seutujen haavoittuvuutta liikkumismahdollisuuksien suhteen ja toisaalta kaupunkiseutujen resilienssiä.

Tieverkko on myös se liikennejärjestelmän osa, joka kytkee muut verkot järjestelmään.

---

<sup>12</sup> Erillishuomiona myös maanteiden erikoiskuljetusten lupamenettelyn ns. LeLu-malli, jonka pääkäyttäjä on Pirkanmaan ELY-keskus. LeLu:n parametreina on mm. kuljetusyksikköjen mitat ja painot, liikenneverkon topografia väylien ja rakenteiden teknisine tietoineen ja mittoineen ym. Parametriarvoja muuttamalla sillä voitaneen tarvittaessa mallintaa myös ”normaalia” liikennettä erikoisliikenteen lisäksi.

Liikennevirtojen ja/tai niiden muutoksen analyysi tulisi tehdä muilla tavoin, johon välineitä löytyy mm. eräiltä konsulttitaloilta (esim. Sitowisen MERIMA-malli ja sen taustalle mallinnettu liikenneverkko).

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom on myös ollut suunnittelemassa osaamisensa kohentamista em. aiheessa, joskaan Ruotsin Trafikverketin tapaista kattavaa liikennemallinlinuksen kokonaisuutta se ei tietävästi ole rakentamassa (vrt. esim. Ruotsin Sampers). Liikenteen mallijärjestelmästä Suomessa ks. tarkemmin esim. Pastinen ym. (2020).



*Kuvio 23. Suomen rataverkon ja juna-asemien peittävyys. Lähde: Väestö tieverkon varassa -tarkastelu (WSP 2021).*



## 5.4 Resilienssi-käsite kansainvälisessä hankerahoituksessa

Termi ”resilienssi” esiintyy taajaan väyläverkon kehittämisessä ja rahoittamisessa EU:n lisäksi myös muiden monenkeskisten organisaatioiden terminologiassa. Esimerkiksi Euroopan komission, EIB:n, EBRD:n ja OECD:n strategiapapereissa ja ohjausasiakirjoissa löytyy suuri määrä alla olevan tyyppisiä muotoiluja:

- "...smart, **resilient** and sustainable [infrastructure]...";
- "...infrastructure that is clean, resilient, and consistent with a net-zero future."
- "...to build **resilient**, low- and zero-carbon infrastructure systems..."
- "...infrastructures that are clean, **climate-resilient** and aligned with pathways towards net zero emissions."
- "Secure infrastructure underpins the **resilience** of global economy and supply chains– be it on digital, health, transport or energy."
- "...standards and protocols that support network security and **resilience**, interoperability, and an open, plural and secure internet."
- "...to invest in infrastructure for developing sustainable and **resilient** raw materials value chains."
- "...infrastructure investments that create sustainable, smart, **resilient**, inclusive, and safe transport networks in all modes of transport, including rail, road, ports, airports, as well as logistics and border-crossing points, and bring these modes together in a multimodal system."
- "Transportation across the EBRD's region needs to be greener and more **resilient** to the impacts of climate change, to ensure that the economies follow a sustainable path and are not locked into inefficient, vulnerable and carbon intensive transport infrastructure and services."

Ote EC:n 1.12.2021 julkaisemasta [Global Gateway](#) -aloitteesta muotoilee asian näin; ohjelma painottuu muualle kuin EU:n pohjoisiin jäsenmaihiin:

*"Building the necessary reach and creating benefits from infrastructure development at home and around the world will require investment at scale. Using all of the financial and development tools at the EU's disposal and supported by the strong commitment from EU Member States, **Global Gateway will aim at mobilising investments of up to €300 billion between 2021 and 2027.***

*It will do so under one brand, taking a Team Europe approach - bringing together resources of the EU, Member States, European financial institutions and national development finance institutions. It will actively seek to mobilise private sector finance and expertise and support access to sustainable finance."*

Kuten tuo ote osoittaa, aihe sivuaa vahvasti myös public-private partnership- eli PPP-tyyppisiä hanke- ja rahoitusmalleja (ks. esim. Leviäkangas ym. 2020).

Termin viestinnällistä signaaliarvoa ei voi vähätellä, vaan se tulisi nostaa hyvinkin keskeiseksi argumentiksi myös infrastruktuurihankkeiden valmistelussa. Esimerkiksi Euroopan komission Sustainable & Smart Mobility -strategian 25-



sivuisessa tiedonannossa vuodelta 2020 resilienssi-termi esiintyy 27 kertaa<sup>13</sup>. Lisäksi Euroopan komission joulukuussa 2021 julkaisemassa 86-sivuisessa ehdotuksessa TEN-verkoston kehittämiseksi termi esiintyy 41 kertaa muodoissa ”resilience” tai ”resilient” (COM(2021) 812/3)<sup>14</sup>.

On tärkeä huomata, että resilienssi on Suomessa itse asiana jo monella tavalla leivottu sisään useisiin väyläverkon kehittämisen ohjausasiakirjoihin, suunnitteluun ja toteutukseen, vaikka termiä ei ole siinä muodossa (vielä) laajasti käytettykään. Tämä on arvokas lähtökohta: asia on siis tiedostettu jo pitkään, mutta sitä ei ole ollut tapana sanoittaa näin.

Suomen menestys saada rahoitusta väylähankkeisiin esimerkiksi EU:n rakennerahastoista tai muista keskeisistä rahoitusinstrumenteista on ollut vaatimaton. Osa näistä instrumenteista on suunnattu uusien jäsenmaiden eli ns. koheesiomaiden hankkeille, mutta siitäkin huolimatta tulos on ollut laiha.

Kuvaava esimerkki tästä on Euroopan rakennerahastojen budjetit (koheesiorahasto ja EAKR) Thematic Objective 7:n osalta vuoteen 2016<sup>15</sup>. Kärjessä oli Puola, jonka osuus liikennehankkeiden rahoituksesta oli noin **28 miljardia euroa** tästä **yli 71 miljardin euron** kokonaisrahoituksesta. Ruotsi oli aivan 20 maan listan häntäpäässä noin 153 miljoonallaan; viimeisenä listalla ollut Kypros oli saanut vain hieman vähemmän. Suomea ei ole tuolla listalla lainkaan.

LVM:n mukaan Suomen saama tuen määrä nyt päättyvällä Verkkojen Eurooppa -ohjelman (CEF)<sup>16</sup> kaudella (2014–2020) oli yhteensä noin 262 miljoonaa euroa (LVM:n tiedote 15.7.2021). Kauden 2014–2020 CEF-rahoitus oli kaikkiaan 30,4 mrd. euroa, josta 23,7 mrd. euroa ohjautui liikennehankkeille, 4,6 mrd. euroa energia- ja 0,5 mrd. euroa Telecom-hankkeisiin. Suomen osuus CEF-liikennehankkeiden kokonaismäärästä oli siis noin 1 %. Vuonna 2019 Suomen suhteellinen maksumuus koko EU-budjetista oli valtiovarainministeriön mukaan 1,63 %.

Resilienssi-käsitteestä on siis tullut olennainen osa kansainvälisessä keskustelussa pohdittaessa liikennejärjestelmän sopeuttamista ilmastonmuutokseen sekä määriteltäessä liikenneinfrastruktuurin tulevaisuuden investointi- ja ylläpitotarpeita laajemminkin.

Siksi se on otettava nopeasti laajaan käyttöön myös Suomessa, sillä esimerkiksi EU:n investointituet liikenneinfrastruktuuriin tulevat osin perustumaan resilienssin kohentamiseen ja edellyttävän tämän konkreettista osoittamista rahoitusta haettaessa ja hankkeita perusteltaessa. Ellei tätä keskustelua käydä asianmukaisin termein, investointitukien perustelut jäävät ontuviksi, ja merkittävä määrä rahoitusta voi jäädä saamatta.

Tässä Väyläviraston sekä liikenne- ja viestintäministeriön rooli on keskeinen. Tärkeä, ja ehkä kiireellisin osa tätä työtä liittyy viestintään, jotta resilienssi-termi ja sen asianmukainen sisältö saadaan nopeasti omaksuttua toimijoiden keskuudessa.

<sup>13</sup> EC:n strategiatiedonanto löytyy [täältä](#), ja rahoitushakujen perusteita löytyy [täältä](#)

<sup>14</sup> Kyseinen ehdotus (COM(2021) 812/3) liitteineen löytyy [täältä](#).

<sup>15</sup> TO 7: 'Promoting sustainable transport and removing bottlenecks in key network infrastructures'. Listaus löytyy [täältä](#), ks. taulukko s. 115, joka listaa 20 EU-maata (ml. UK). Komissio on koonnut tietoja TEN-T- ja CEF-rahoituksesta esim. [tänne](#).

<sup>16</sup> Connecting Europe Facility eli Verkkojen Eurooppa -ohjelma, ks. [täältä](#).

Tämän lisäksi hankevalmistelun ja rahoitusneuvonnan resursointia olisi järkevää kasvattaa merkittävästi.

## 5.5 Yhteenveto

Yhteenvetona voidaan todeta, että 'resilienssi' ei ole terminä juurikaan vakiintunut suomalaisen ammattikeskusteluun liikenteen infrastruktuurista. Suomessa ei ole myöskään systemaattisesti mittaaroitu, saati resursoitu resilienssiä. Tämä on johtanut osin siihen, että hankeperustelumme EU:n suuntaan ovat kirjoittajien tulkinnan mukaan olleet ontuvia ja hanketukien saanto on ollut vaatimaton. Vaikka resilienssi onkin sisäistetty moniin prosesseihin ilman eksplisiittistä termin soveltamista, emme voi välttyä termin laajemmalta käyttönotolta.

Resilienssin mittaroinnissa mahdollisuuksia on paljon ja jopa siinä määrin, että sen aloittamisessa kannattaa käyttää harkintaa. Mittaaminen olisi kuitenkin käynnistettävä jo ilmastomuutokseen varautuminen mielessä, mutta myös resilienssiin tarvittavien resurssien viisaassa kohdentamisessa. Vastaavasti kuin hanketukien saannottamisessa, myös resurssien kohdentamisessa ovat valitut termit ja käsitteet avainasemassa. Ellei resilienssistä puhuta ja kirjoiteta, ei siihen todennäköisesti kiinnitetä riittävästi huomiota.

Hankearvioinnissa on havaittavissa tietty puute resilienssin käsitteen huomioidnissa ja sen käytännön jalkautuksessa. Hankearviointimallit eivät sisällä resilienssin arviointia, jolloin resilienssi jää sisäistämättä hankearviointiprosesseihin. Resilienssin arviointi voidaan kuitenkin kohtuullisen helposti ja suoraviivaisesti sisällyttää esimerkiksi osaksi ympäristövaikutusten arviointia, vaikkapa arviointiselosteiden liitteeksi tai täydentäväksi dokumentiksi. Muitakin vaihtoehtoja todennäköisesti on.

Suomi ja sen hallinto, Väylävirasto mukaan lukien, omaa erinomaisen ns. "pehmeän resilienssin". Osaaminen, prosessit, johtaminen ja jopa taloudelliset resurssit ovat Euroopan kärkitasoa. Niinpä tie entistä tehokkaampaan ja vaikuttavampaan resilienssin hallintaan on Suomen osaltaan helppo, jos se tie halutaan valita.

Pehmeän resilienssin ylläpito vaatii kuitenkin panostuksia esimerkiksi koulutukseen. Erityisen tärkeää olisi sisällyttää resilienssi-käsite erilaisine ulottuvuuksineen korkeakoulujen opinto-ohjelmiin ja erityisesti liikenteeseen ja logistiikkaan painottuviin diplomi-insinööri- ja maisteriopintoihin. Resilienssiin liittyvää tutkimustoimintaa on syytä aktivoita.

## 6 Johtopäätökset

Luku vetää yhteen selvityksen keskeiset havainnot ja tiivistää niistä nousevat toimenpidesuositukset erityisesti Väylävirastolle ja muulle liikennehallinnolle.

### 6.1 Resilienssin määritelmiä ja ulottuvuuksia

Yksi yleinen tutkimus- ja hankekirjallisuuden katsauksen pohjalta tehty havainto on, että resilienssillä on useita määrittelemiä eri tarkoituksiin. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että yleispätevää ja tarkkaa väyläverkon resilienssin määritelmää ei ole meillä eikä muualla maailmassa.

Tästä seuraa se, että Suomen tarpeisiin parhaiten soveltuvan käsitteistöön ja siihen liittyvien mittareiden ja analytiikan laatiminen edellyttää kansallista kehittämistä alan kansainvälistä kehitystä seuraten. Tässä ilmeinen toimijataho on Väylävirasto.

Keskeisiä kysymyksiä resilienssi-käsitteen osalta ja liittyen sen käyttöön väyläverkon kehittämisessä ja hallinnoinnissa ovat mm. seuraavat:

- Mikä on tarkastelun aggregointitaso?
- Miten osajärjestelmien kriittiset keskinäisriippuvuudet tunnistetaan?
- Mikä on tarkastelun ajallinen ulottuvuus?
- Resilienssi mihin? Äkilliset tapahtumat ja nopeat vaikutukset vaativat erilaista reagointia kuin tunnistaa väylästä hidasta rapautumista ja reagoida siihen.
- Kuinka suuri on haitallisen tapahtuman aiheuttama toimintakyvyn romahdus/haitta?
- Kenelle tai mihin toimintoihin haitta kohdistuu ja kuinka kauan se kestää?
- Kuinka nopeasti toivutaan normaalitasoiseen toimintaan tai lähelle sitä?
- Millaisia toimijoita ja toimintoja tarvitaan häiriötilasta palautumiseen?

Resilienssin suunnittelun ja hallinnan perustana on tarkasteltavan järjestelmän tarkoituksenmukainen osittaminen ja osajärjestelmien keskinäisten riippuvuuksien ja suhteiden ymmärrys. Elinkaaren analysointi resilienssin hallinnassa on oleellista erityisesti liikenneväylästä osalta, jossa useita erittäin pitkän elinkaaren osatekijöitä tai -järjestelmiä (tyypillisesti fyysinen infrastruktuuri) yhdistyy melko lyhyen elinkaaren vastaaviin (esimerkiksi liikenteen telematiikka).

Liikenneväylästä elinkaaren hallinnassa suurimmat vaikutusmahdollisuudet ovat elinkaaren alkupäässä, eli silloin kun väylästä suunnitellaan. Tällöin myös mahdollisuudet vaikuttaa resilienssiin ja sen kustannuksiin ovat suurimmat (Kuvio 10).

OECD (2021) määrittelee infrastruktuurin resilienssiin neljä oleellista näkökulmaa, joissa teknologisten lähtökohtien lisäksi mukana henkiset ja taloudelliset resurssit:

1. sääntelyn ja hallinnon näkökulma; infrastruktuurien resilienssin varmistamisessa tarvitaan systeeminen orientaatio, joka onnistuu vain hallintosektorien rajat ylittävällä toiminnalla, jota sääntelyjärjestelmä tukee;
2. infrastruktuurien elinkaaren hallinnan näkökulma sekä elinkaaren hallinnan innovaatiot; erityisesti korostetaan uuden teknologian (infratech) hyödyntämistä oikea-aikaiseen ja optimaaliseen kunnossapitoon;

3. Osaamisen kehittäminen resilienssin systemisessä ja projektiokohtaisessa suunnittelussa sekä ns. infratechin hyödyntämisessä; tähän kohtaan sisältyy myös hankintaosaamisen kehittäminen
4. Rahoituksen ja resurssien kohdentaminen infrastruktuurin resilienssiin, mukaan lukien erilaiset PPP-ratkaisut.

OECD:n lähestymistapaa voisi yhtä hyvin kuvata 'infrastruktuuristrategiaksi' joka ulottuu selkeästi laajemmalle kuin pelkästään fyysiseen väyläverkostoon.

## 6.2 Väyläviranomaisen toimintavaihtoehtoja

Liikenteen väyläverkostosta vastaavan viranomaisen vaihtoehdot, kun halutaan ylläpitää toimiva väyläverkosto pitempiaikaisten vaikutusten, kuten kulumisen ja/tai ilmaston muuttuessa ovat pääpiirteissään seuraavat:

- Vakuuttaa poliittiset päättäjät lisäresurssien tarpeesta, jolla väyläverkon sietokykyä kohennetaan systemaattisesti;
- Priorisoida verkkoon tehtäviä resilienssi-investointeja (jotka voivat olla erillisiä tai liittyä muuhun uus- ja korvausinvestointiin) punniten väyläverkon riskialttiutta ja kriittisyyttä yhteiskunnan toiminnan kannalta;
- Lykätä tietoisesti päätöksiä resilienssi-investoinneista ja sietokyvyn nostamisesta epävarmuuden vallitessa ja hyväksyä nousevat riskitasot.

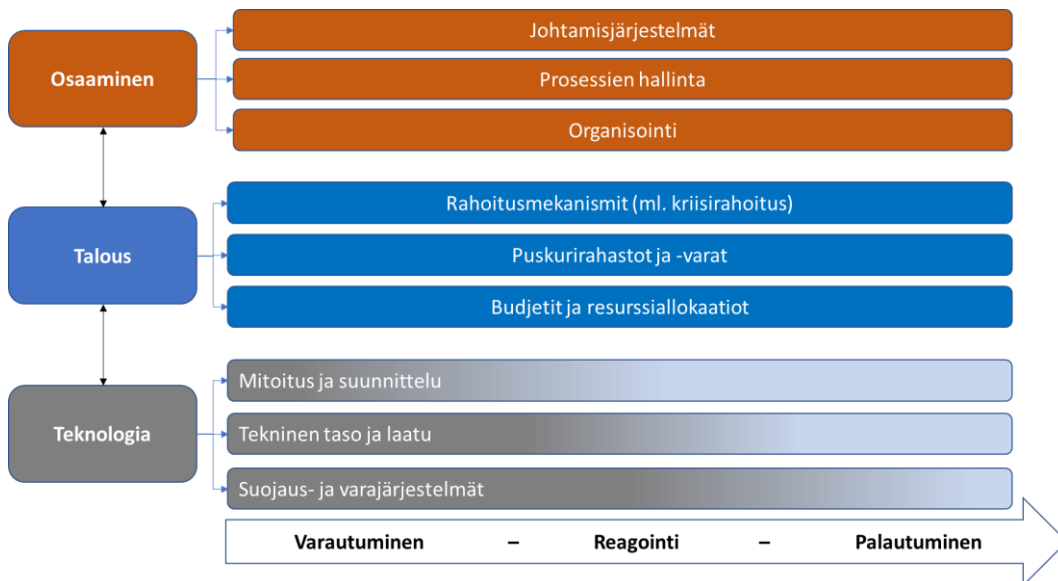
Myös viimeisin vaihtoehto on relevantti, joskin se voi olla poliittisesti hankala. Kustannustehokkain tapa varautua tulevaan on aina analyysi- ja tutkimustoiminnan lisääminen, jolloin päätöksiin saadaan mahdollisimman laaja ja laadukas tietopohja.

## 6.3 "Kova" ja "pehmeä" resilienssi

Kovan (teknologia) ja pehmeän (osaaminen, talous) resilienssin oleellisia eroja suhteessa resilienssisykliin havainnollistaa Kuvio 24.

Osaaminen ja taloudelliset resurssit palvelevat resilienssisyklin kaikkia osa-alueita: kun varaudutaan uhkiin, kun reagoidaan toteutuviin uhkiin ja kun palautetaan järjestelmän toimintakyky ja palvelutaso. Pehmeä resilienssi on siten tietyssä mielessä tärkein resilienssin ulottuvuus.

Pehmeän resilienssin ylläpito vaatii kuitenkin panostuksia esimerkiksi koulutukseen ja alan tutkimustoimintaan.



Kuvio 24. Kovan (tekniologia) ja pehmeän (osaaminen, talous) resilienssin kohdistuminen resilienssisykliin.

Tekniologia, kuten suunnittelu, laadukas toteutus ja erilaiset suojaus- ja turvajärjestelmät liittyvät ensisijaisesti varautumiseen ja osin myös reagointiin. Palautumisen ehtona ovat hyvät johtamisjärjestelmät, prosessien hallinta ja riittävät taloudelliset resurssit toipumiseen niissä tilanteissa, joissa järjestelmän palvelu- ja toimintakyky ovat jo kärsineet.

## 6.4 Mittaristojen kehittäminen resilienssin arviointiin

Resilienssiä voidaan mitata sekä kvalitatiivisin että kvantitatiivisin mittarein ja menetelmin, joita on mahdollista myös yhdistellä. Mittaristojen käyttökelpoisuutta saanevat perinteiset mittaamisen lainalaisuudet:

- validiteetti – mittari mittaa juuri sitä ilmiötä tai muuttujaa, jota sen on tarkoituskin mitata
- tarkkuus – mittari mittaa ilmiötä tai muuttujaa riittävän tarkasti, jotta sen soveltaminen on mielekästä
- luotettavuus – mittaaminen tuottaa luotettavasti tarvittavan tiedon, eikä tiedon laatu (mittaustulos) vaihtele mittaamiseen vaikuttavien muiden tekijöiden pysyessä muuttumattomina (ceteris paribus)
- käyttökelpoisuus – mittaria voidaan soveltaa käytäntöön ja se tukee päätöksentekoa
- ymmärrettävyys – mittari on riittävän laajalti ja syvällisesti ymmärretty, jotta sitä osataan soveltaa oikein, tulkita oikein ja että sen rajoitteet ja epätarkkuuslähteet tunnetaan
- kustannukset – mittaaminen ei saa tulla liian kalliiksi.

Mittaristojen kehittäminen ja mittaaminen mahdollistavat myös erilaiset mallinnukset, jotka voivat tukea päätöksentekoa kustannustehokkaasti. Myös perinteisiä väyläverkon kuntomittareita (esim. tasaisuus, kantokyky) voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. Näiden lisäksi tulisi kehittää myös väyläverkon elinkaaren arviointia,

jotta korjaavia toimenpiteitä pystyttäisiin kohdentamaan ja ajoittamaan tehokkaammin.

Ajantasaiset tai jatkuvat keinoalyä, algoritmeja tai trendianalyyseja hyödyntävät kunnonmittausmenetelmät ja -diagnostiikka ovat menetelmiä, joita on kokeiltu Suomessakin, kuten esimerkiksi kiihtyvyyssantureiden käyttö ratainfrastruktuurin kunnon arvioinnissa. Myös väylästä vikojen tai palvelutason puutteiden aiheuttamat matka-aikojen viivästymiset toimivat epäsuorina resilienssimittareina.

Erilaisilla rakenteiden tai liikenteen sensoreilla, mittauksilla ja muulla liikenne- ja matkustajavirtaan liittyvällä tiedonkeruulla koottujen suurten tietomäärien (ns. big data) kehittynyt analytiikka tulee jatkossa entistä tärkeämmäksi myös väyläverkon kunnon seurannassa ja sietokyvyn arvioinnissa. Tällaisia järjestelmäpohjaisia ja korkeaan osaamiseen perustuvia kyvykkyyksiä tulee kehittää määrätietoisesti myös viraston sisällä.

## 6.5 Resilienssin sisällyttäminen hankearviointiin

Resilienssi on eräs väylähankkeen tuloksena syntyvän perusrakenteen osan (esimerkiksi tien tai radan) ominaisuus siinä missä vaikkapa kannattavuus tai yhteiskunnallinen hyväksyttävyys.

Fyysisen väyläverkon, sen järjestelmien sekä johtamisjärjestelmien sekä osaamiseen liittyviä resilienssin dimensioita voivat olla esimerkiksi:

- resilienssi äärisääliä vastaan
- resilienssi liittyen rakenteen alennettuun kunnossapitoon
- resilienssi suurempaa liikennekuormitusta vastaan
- resilienssi terroristista toimintaa vastaan
- resilienssi laajamittaista hybridivaikuttamista ja/tai kyberuhkia vastaan

Resilienssiä ei ole sellaisenaan sisällytetty nykyisiin hankearviointimalleihin, mikä kertoo osin siitä, ettei hankearviointi ole juurikaan riskianalyysia sisältävä eikä hankkeisiin tai toteutusvaihtoehtoihin liittyviä erilaisia riskejä ole arvioitu hankkeiden arvioinnissa.

Asiallisesti resilienssin idea on Suomessa kuitenkin monella tavalla jo mukana väyläverkon kehittämisessä, vaikka termiä ei ole siinä muodossa laajasti käytettykään. Tämä on arvokas lähtökohta: asia on tiedostettu jo pitempään, mutta sitä ei ole sanoitettu tai määritelty näin.

Väyläviraston tulisikin pohtia mm. hankearvioinnin yleisohjeen ja vastaavien ohjausasiakirjojen päivittämistä siten, että resilienssi-ulottuvuus huomioidaan niissä.

## 6.6 Resilienssi-käsitteen merkitys hankerahoituksessa ja viestinnässä

Resilienssi-käsite on jo muodostunut olennaiseksi termiksi kansainvälisessä keskustelussa pohdittaessa liikennejärjestelmän sopeuttamista ilmastonmuutokseen sekä liikenneinfran tulevaisuuden investointi- ja ylläpitotarpeita määriteltäessä laajemminkin. Siksi se on otettava nopeasti laajaan käyttöön myös Suomessa, sillä esimerkiksi EU:n investointituet liikenneinfrastruktuuriin tulevat osin perustumaan resilienssin kohentamiseen ja edellyttävän tämän konkreettista osoittamista rahoitusta haettaessa ja hankkeita perusteltaessa. Ellei tätä keskustelua käydä asianmukaisin termein, investointitukien perustelut jäävät ontuviksi, ja merkittävä määrä rahoitusta voi jäädä saamatta.

Tässä Väyläviraston sekä liikenne- ja viestintäministeriön rooli on keskeinen. Tärkeä, ja ehkä kiireellisin osa tätä työtä liittyy viestintään, jotta resilienssi-termi ja sen asianmukainen sisältö saadaan nopeasti omaksuttua toimijoiden keskuudessa. Tämän lisäksi hankevalmistelun ja rahoitusneuvonnan resursointia olisi järkevää kasvattaa merkittävästi erityisesti EU-rahoituksen osalta.

## Lähdeluettelo

- /1/ Achillopoulou, D.V., Mitoulis, S.A., Argyroudis, S.A., Wang, Y. (2020) Monitoring of transport infrastructure exposed to multiple hazards: a roadmap for building resilience, *Science of The Total Environment*, Vol. 746, Dec. 2020, 141001
- /2/ Cybersecurity & Infrastructure Security Agency (2021) Infrastructure Resilience Planning Framework (IRPF). [https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/Infrastructure Resilience Planning Framework IRPF.pdf](https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/Infrastructure%20Resilience%20Planning%20Framework%20IRPF.pdf)
- /3/ ETSI (päiväämätön). ETSI Technology Leaflet. <https://www.etsi.org/images/files/ETSITechnologyLeaflets/IntelligentTransportSystems.pdf>
- /4/ Euroopan komissio (2021) Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on Union guidelines for the development of the trans-European transport network, amending Regulation (EU) 2021/1153 and Regulation (EU) No 913/2010 and repealing Regulation (EU) 1315/2013. COM(2021) 812/3. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM%3A2021%3A812%3AFIN>
- /5/ Evans, C. Godart, B., Krieger, J., Kovarik J-B., Mimram, M., Palhol, F. (2019). Building Resilient Infrastructure Systems. Economic effects of infrastructure investment and its financing. G20 2019 Japan.
- /6/ Füssel, Hans-Martin (2007) Vulnerability – a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environment Change*, Vol. 17, s. 155–167.
- /7/ Ganin, A. A., Kitsak M., Marchese D., Keisler J. M., Seager T., Linkov I. (2017) Resilience and efficiency in transportation networks. *Science Advances*, 3, e1701079
- /8/ Geenhuizen, van, M. (2000) Interconnectivity of transport networks - A conceptual and empirical exploration, *Transportation Planning and Technology*, 23, 3: Network Connectivity and Multimodality
- /9/ Haemmerli, Bernard & Renda Andrea (2010). Protecting Critical Infrastructure in the EU – CEPS Task Force Report. Brussels: Centre for European Policy Studies.
- /10/ Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S., Kärhä, P. (2011, toim.), Laadukkaan mittaamisen perusteet, MIKES, Julkaisu J4/2011.
- /11/ Hughes, J. F., Healy, K. (2014) Measuring the resilience of transport infrastructure, New Zealand Transport Agency research report 546.
- /12/ Hyvönen, A-E., Juntunen T., Mikkola, H., Käpylä, J., Gustafsberg, H., Nyman, M., Rättälä, T., Virta, S., Liljeroos, J. (2019) Kokonaisresilienssi ja turvallisuus: tasot, prosessit ja arviointi. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 17/2019.
- /13/ Hyvönen, A-E., Juntunen, T., Mikkola, H., Käpylä, J., Gustafsberg, H., Nyman, M., Rättälä, T., Virta, S., Liljeroos, J. (2019) Kokonaisresilienssi ja turvallisuus: tasot, prosessit ja arviointi.



- Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 17/2019.
- /14/ IDRRIM, Institut des routes, des rues et des infrastructures de mobilité (2017). Annual Report. Paris.
- /15/ IMF (2012) World Economic Outlook. U.S. Agency for International Development, 2012.  
<https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2016/12/31/World-Economic-Outlook-October-2012-Coping-with-High-Debt-and-Sluggish-Growth-25845>
- /16/ Infrastructure Australia (2021a) A Pathway to Infrastructure Resilience , Advisory Paper 1: Opportunities for systemic change.  
<https://www.infrastructureaustralia.gov.au/publications/pathway-infrastructure-resilience-0>
- /17/ Infrastructure Australia (2021b) A Pathway to Infrastructure Resilience Advisory Paper 2: Guidance for asset owners and operators in the short term.  
<https://www.infrastructureaustralia.gov.au/publications/pathway-infrastructure-resilience-0>
- /18/ ITF (2016), Adapting Transport to Climate Change and Extreme Weather: Implications for Infrastructure Owners and Network Managers, ITF Research Reports, OECD Publishing, Paris.
- /19/ ITF (2021a) Developing Strategic Approaches to Infrastructure Planning, Paris; saatavissa [täältä](#)
- /20/ ITF (2021b) Data-driven Transport Infrastructure Maintenance, Paris; saatavissa [täältä](#)
- /21/ Känslä, K., Rantala, S., Kauppila, O., Leviäkangas, P. (2018) Acceleration sensor technology for rail track asset condition monitoring. Management, Procurement and Law, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Volume 171 Issue 1, February 2018, pp. 32-40, <https://doi.org/10.1680/jmapl.17.00040>.
- /22/ Kott, Alexander & Linkov, Igor (2019) Cyber Resilience of Systems and Networks, Springer
- /23/ Leviäkangas, P., Molarius, R., Könönen, V., Hietajärvi, A-M., Zulkarnain (2013) Devising and Demonstrating an Extreme Weather Risk Indicator for Transportation System. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Volume 2329, pp 45-53.
- /24/ Leviäkangas, P., Pargar, F., Sirviö, K., Love, P., Behehsti, B. (2019) Service Value and Componentised Accounting of Infrastructure Assets. ASCE Journal of Infrastructure Systems, 2019, 25 (3) <https://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/%28ASCE%29IS.1943-555X.0000497>.
- /25/ Leviäkangas, P., Vällilä, T., Ojala, L. (2020) Editorial for Utilities Policy - Special issue "The new economics and governance of transport networks and services." *Utilities Policy* 64, [doi.org/10.1016/j.jup.2020.101060](https://doi.org/10.1016/j.jup.2020.101060).
- /26/ Leviäkangas, Pekka & Aapaoja, Aki (2015) Resilienssin käsite ja operationalisointi – case liikennejärjestelmä [Resilience and its operationalization – case transport system]. Kunnallistieteellinen Aikakauskirja 1/2015 [Journal of Local Government Studies]. English abstract provided.

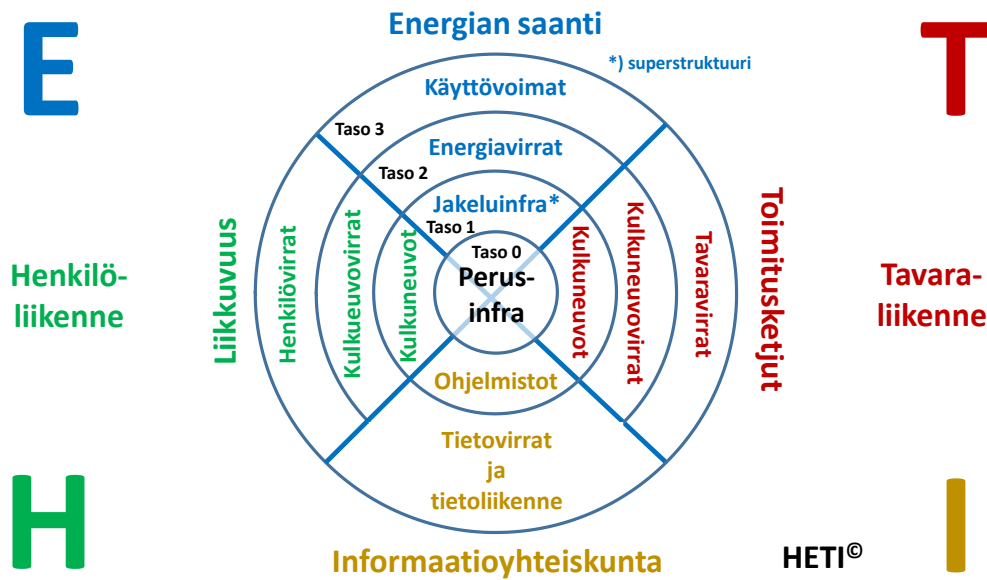
- /27/ Leviäkangas, Pekka & Michaelides, Silas (2014) Transport system management under extreme weather risks: views to project appraisal, asset value protection and risk-aware system management. *Natural Hazards*, Vol. 72, No. 1, s. 263–286.
- /28/ Linkov, I., Bridges, T., Creutzig, F., Decker, J., Fox-Lent, C., Kröger, W., Lambert, J. H., Levermann, A., Montreuil, B., Nathwani, J., Nyer, R., Renn, O., Scharte, B., Scheffler, A., Schreurs, M., Thiel-Clemen, T. (2014) Changing the resilience paradigm. *Nature Climate Change*, 4, 407–409.
- /29/ Linkov, Igor & Kurth, Margaret (2019) The Value of Transportation Resilience: Economic Impacts of Disruptions in Major U.S. Cities, kalvoesitys [täältä](#)
- /30/ Linkov, Igor & Palma-Oliveira, José Manuel (2017, toim.), *Resilience and Risk*, Springer.
- /31/ Lohela, T., Schantz, V., Gill, T., Ojala, L., Jakstas, T., Kleemola-Juntunen, P. (2019) [Handbook on maritime hybrid threats: 10 Scenarios and Legal Scans](#), Hybrid CoE Working Paper 5, European Centre for Countering Hybrid Threats
- /32/ Ludvigsen, Johanna & Klæboe, Ronny (2014) Extreme weather impacts on freight railways in Europe. *Natural Hazards* 70, 767–787. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0851-3>
- /33/ Maaailmanpankki (2019) Infrastructure Connectivity; Japan G20 Development Working Group, January 2019, World Bank Group, saatavissa [täältä](#)
- /34/ Marcelo, D., House, S., Raina, A., (2018) Incorporating Resilience in Infrastructure Prioritization: Application to the Road Transport Sector. Policy Research Working Paper; No. 8584. World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30429>
- /35/ Marchese, Dayton & Linkov, Igor (2017) Can you be smart and resilient at the same time? *Environmental Science & Technology*, 51, 5867–5868
- /36/ Mattsson, Lars-Göran & Jenelius, Erik (2015) Vulnerability and resilience of transport systems – A discussion of recent research. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 81, 16-34.
- /37/ McKinsey (2020) Woetzel, J., Pinner, D., Samandari, H., Engel, H., Krishnan, M., Boland, B. Will infrastructure bend or break under climate stress? Case study, June 2020. <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/will-infrastructure-bend-or-break-under-climate-stress>
- /38/ Molarius, R., Könönen, V., Leviäkangas, P., Rönnty, J., Hietajärvi, A-M. ja Oiva, K. (2014) The extreme weather risk indicators (EWRI) for the European transport system. *Natural Hazards*, Vol. 72, No. 1, s. 189–210.
- /39/ Molarius, R., Leviäkangas, P., Rönnty, J., Oiva, K. (2012) Weather hazards for the European transport system – a risk panorama. EWENT project D5.1. VTT Technology 43, 2012.
- /40/ NASEM (2021a) Resilience Primer for Transportation Executives; U.S. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine; saatavissa [täältä](#)

- /41/ NASEM (2021b) Transportation System Resilience: Research Roadmap and White Papers; U.S. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine; saatavissa [täältä](#)
- /42/ National Infrastructure Commission (2020) Anticipate, React, Recover – Resilient infrastructure systems. <https://nic.org.uk/app/uploads/Anticipate-React-Recover-28-May-2020.pdf>
- /43/ Nokkala, M., Leviäkangas P., Oiva, K., (eds), Hietajärvi, A-M., Schweighofer, J., Siedl, N., Vajda, A., Athanasatos, S., Michaelides, S., Papadakis, M., Kreuz, M., Mühlhausen, T., Ludvigsen, J., Klæboe, R. (2012) The costs of extreme weather for the European transport system - EWENT project D4 [Yhteenvetoraportti sään ääri-ilmiöiden aiheuttamista kustannuksista Euroopan liikennejärjestelmälle], Espoo 2012. VTT Technology 36.
- /44/ OECD (2021) Building resilience: New strategies for strengthening infrastructure resilience and maintenance, OECD Public Governance Policy Papers No. 05, <https://dx.doi.org/10.1787/354aa2aa-en> .
- /45/ Pastinen V., Salanne I., Keränen M., Lehto H., Jaakkola E., Tikkanen M. (2020) Valtakunnallinen liikenteen mallijärjestelmä - Selvitys mallijärjestelmän kehittämisen edellytyksistä ja vaihtoehtoista, Traficom:n tutkimuksia ja selvityksiä 8/2020
- /46/ Rodrigue, J-P. (2020) The Geography of Transport Systems, 5<sup>th</sup> ed., New York: Routledge, 456 pages. ISBN 978-0-367-36463-2. <https://transportgeography.org/contents/chapter2/geography-of-transportation-networks/transportation-network-efficiency-and-resilience/>
- /47/ Sacconi S., Ierimonti L., Venanzi I., Ubertini F. (2021) Life-cycle cost analysis of bridges subjected to fatigue damage, Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2:25.
- /48/ Sanastokeskus (2017) Kokonaisturvallisuuden sanasto. TSK 50, Sanastokeskus TSK ry, Helsinki 2017, ISBN 978-952-9794-36-2. [https://turvallisuuskomitea.fi/wp-content/uploads/2018/02/Kokonaisturvallisuuden\\_sanasto.pdf](https://turvallisuuskomitea.fi/wp-content/uploads/2018/02/Kokonaisturvallisuuden_sanasto.pdf)
- /49/ Sanastokeskus (2018) Kyberturvallisuuden sanasto. TSK 52, Sanastokeskus ry, Helsinki 2018, ISBN 978-952-5608-49-6. Kust. Huoltovarmuuskeskus. [http://www.tsk.fi/tsk/fi/kyberturvallisuuden\\_sanasto\\_tsk\\_52-1125.html](http://www.tsk.fi/tsk/fi/kyberturvallisuuden_sanasto_tsk_52-1125.html)
- /50/ Schwab, Klaus (2012) The Global Competitiveness Report 2011–2012. World Economic Forum, Geneva. [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_GCR\\_Report\\_2011-12.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_GCR_Report_2011-12.pdf).
- /51/ Seager, T.P., Spierre Clark, S., Eisenberg, D. A., Thomas, J. E., Hinrichs, M. M., Kofron, R., Jensen, C. N., McBurnett, L. R., Snell, M., Alderson, D. L. (2017) Redesigning resilient infrastructure research; teoksessa "Resilience and Risk" (2017, toim.) Linkov I., Palma-Oliveira J. M., Springer.
- /52/ Sisäministeriö (2018) Kansallinen riskiarvio 2018. Sisäministeriön julkaisuja 2019:5. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-324-245-6>
- /53/ Tilastokeskus (2021) Liikenneverkon peittävydessä ei suuria muutoksia vuonna 2020. <https://www.stat.fi/tup/kokeelliset->

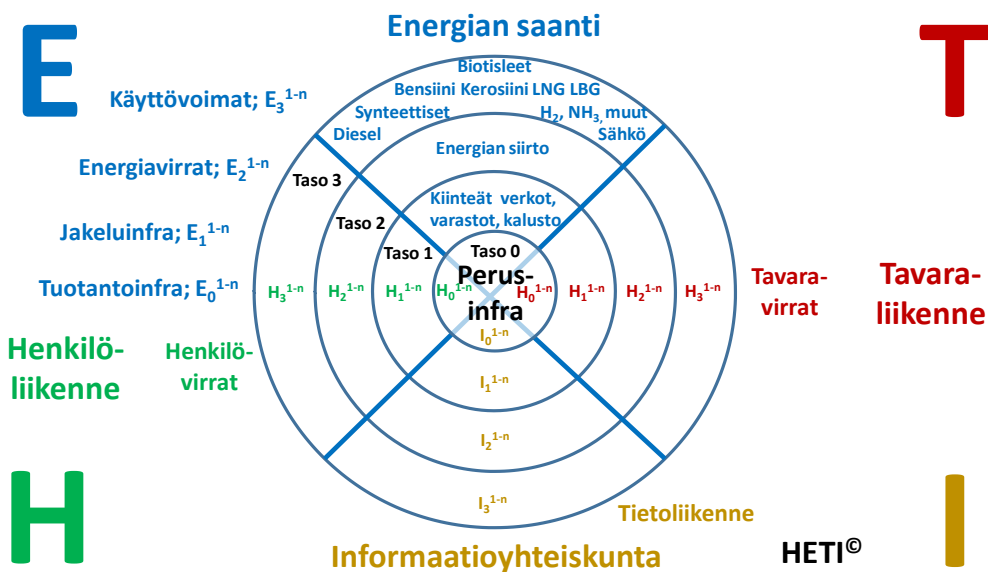
- [tilastot/liikenneverkon-kattavuus-ja-peitton/liikenneverkon-peittavyys-2020/index.html](#)
- /54/ Tuomenvirta H., Haavisto R., Hildén M., Lanki T., Luhtala S., Meriläinen P., Mäkinen K., Parjanne A., Peltonen-Sainio P., Pilli-Sihvola K., Pöyry J., Sorvali J., Veijalainen N. (2018) Sää- ja ilmatoriskit Suomessa – Kansallinen arvio. Syyskuu 2018, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 43/2018.
- /55/ U.S. Homeland Security (2013) Supplemental Tool: Executing A Critical Infrastructure Risk Management Approach, saatavissa [täältä](#)
- /56/ UNISDR (2009). The United Nations International strategy for disaster reduction (UNISDR) terminology. Geneva: UNISDR. [http://www.unisdr.org/files/7817\\_UNISDRTerminologyEnglish.pdf](http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf)
- /57/ Väylävirasto (2020). Liikenneväylien hankearvioinnin yleisohje. Väyläviraston ohjeita 36/2020. Verkkojulkaisu. [https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo\\_2020-36\\_liikennevaylien\\_hankearvioinnin\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-36_liikennevaylien_hankearvioinnin_web.pdf)
- /58/ VLJS (2021) Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma vuosille 2021–2032. Valtioneuvoston julkaisuja 2021:75. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-749-2>
- /59/ Walker, G., Deeming, H., Margottini, C., Menoni, S. (2011) Introduction to sustainable risk mitigation for a more resilient Europe. In Menoni Scira & Margottini Claudio (Eds.) Inside Risk: A Strategy for Sustainable Risk Mitigation. Milan: Springer Milan.
- /60/ Weiland S., Strong A., Miller, B.M. (2019) Incorporating Resilience into Transportation Planning and Assessment, RAND Corporation, saatavissa [täältä](#)
- /61/ WSP (2021), Väestö tieverkon varassa -tarkastelu, WSP Finland, Business & Logistics –yksikkö, syyskuu 2021, Markus Pajarre, Riku Huhta, Jorma Mäntynen, Jarkko Rantala.
- /62/ Yhdistyneet kansakunnat (2015). Sendai Framework for Disaster Reduction. Resolution adopted by the General Assembly on 3 June 2015, A/RES/69/283.

# Henkilö-, tavara-, energia- ja tietovirtojen perusinfrastruktuurin keskinäisriippuvuuksia havainnollistava HETI<sup>©</sup>-malli

Yhteiskunnan henkilö- ja tavaraliikenteen sekä energia- ja tietovirtojen perusinfrastruktuurin keskinäisriippuvuuksia havainnollistaa pelkistetty ns. HETI<sup>©</sup>-malli, jonka Logscale oy on laatinut tätä työtä varten. Sen avulla havainnollistetaan myös nyt käsillä olevan työn kohdentumista (Kuviot A–C).



Kuvio A. Henkilö- ja Tavaraliikenteen sekä Energia- ja Informaatiovirtojen perusinfrastruktuurin ja niiden varassa toimivien palveluiden tasoja HETI<sup>©</sup>-mallilla havainnollistettuna.



Kuvio B. Energian saantiin liittyvien perusinfrastruktuurin ja niiden varassa toimivien palveluiden ja toimivien tasojen havainnollistus HETI<sup>©</sup>-mallilla; vastaavat tasot (0, 1, 2 ja 3) sekä niiden osatekijät on mahdollista jäsenellä vastaavalla tavalla.

Keskinäis- riippuvuus		Henkilöliikenne				Energian saanti				Tavaraliikenne				Tietoliikenne			
		H <sub>0</sub>	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>3</sub>	E <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	I <sub>0</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
Henkilö- liikenne	H <sub>0</sub>	■	■	■	■												
	H <sub>1</sub>	■	■	■	■												
	H <sub>2</sub>	■	■	■	■												
	H <sub>3</sub>	■	■	■	■												
Energian saanti	E <sub>0</sub>					■	■	■	■								
	E <sub>1</sub>					■	■	■	■								
	E <sub>2</sub>					■	■	■	■								
	E <sub>3</sub>					■	■	■	■								
Tavara- liikenne	T <sub>0</sub>									■	■	■	■				
	T <sub>1</sub>									■	■	■	■				
	T <sub>2</sub>									■	■	■	■				
	T <sub>3</sub>									■	■	■	■				
Tieto- liikenne	I <sub>0</sub>													■	■	■	■
	I <sub>1</sub>													■	■	■	■
	I <sub>2</sub>													■	■	■	■
	I <sub>3</sub>													■	■	■	■

Kuvio C. HETI©-mallin päätasojen (0, 1, 2 ja 3) välisten mahdollisten keskinäisriippuvuuksien matriisi. Pelkästään päätasolla matriisissa on  $16 \times 16 = 256$  solua. Mikäli tarkastelua viedään tarkemmalle tasolle (vrt. Kuvio C), matriisin koko kasvaa eksponentiaalisesti.

Keskinäisriippuvuuksien tarkastelussa pysytellään tässä työssä makro- ja mesotasolla, sillä kyseessä ei ole varsinainen numeerinen ja laadullinen analyysi.

---

## Kuvion 14 selitteet

Lähde: McKinsey (2020). Liikenneinfrastruktuuriin liittyvät selitteet tummennettuna.

A. Merisatamat ovat lähtökohtaisesti alttiita kaikenlaisille rannikotulville. Tyypillisesti merisatamat ovat resilienttejä ja kykenevät sopeutumaan pieneen merenpinnan nousuun, mutta ilmastonmuutoksen myötä mahdollisesti realisoituvaa merenpinnan nousua on merkittävä riski satamarakenteille pidemmällä aikavälillä<sup>17</sup>. Voimakkaat hurrikaanit ovat edelleen merkittävä riski. Esimerkiksi vuonna 2005 Katrina-hurrikaani tuhosi noin 30 prosenttia New Orleansin satamasta.

C. Monet lentokentät sijaitsevat lähellä vettä, mikä lisää niiden riskiä sateiden aiheuttamille tulville ja hurrikaanien myrskytulville. Maailman sadasta vilkkaimmin liikennöidystä lentoasemasta 25 prosenttia sijaitsee alle 10 metrin korkeudella merenpinnasta, ja 12 lentoasemaa – muun muassa Shanghai, Rooman, San Franciscon ja New Yorkin lentoasemat – sijaitsevat alle 5 metrin korkeudella merenpinnasta. Jo muutaman senttimetrin vedennousu voi aiheuttaa häiriöitä.

D. Rautatieliikenne voi keskeytyä tulvien vuoksi. Signaalilaitteiden toimintahäiriöt voivat vaikuttaa merkittävästi rautateiden luotettavuuteen. Jos 7 prosenttia Britannian signaalilaitteista joutuisi tulvan alle, 40 prosenttia matkustajaliikenteestä keskeytyisi. Vaurioita aiheutuu eroosiosta ja raidelinjausten muutoksista.

E. Tiet vaativat merkittävän tulvakorkeuden ja/tai -virtauksen, jotta ne kärsisivät merkittäviä fyysisiä vahinkoja, mutta esimerkiksi 0,05 metrin tulva aiheuttaa noin 30 prosentin nopeuden aleneman ja 0,3 metrin tulva voi tehdä tiestä kulkukelvottoman. Tiesulkujen kerrannaisvaikutus tulvakaupungeissa voi pidentää keskimääräistä matka-aikaa 10–55 prosenttia.

F. Telekommunikaatiomastot ovat vaarassa suurten tuulennopeuksien vuoksi. Vuoden 2018 Maria-hurrikaanin aikana tuulen nopeus saavutti jopa 175 mailin tunninopeuden (280 km/h), mikä kaatoi Puerto Ricossa yli 90 % mastoista. Pienemmillä tuulennopeuksilla riskit ovat pienempiä. Esimerkiksi Sandy-hurrikaanin aikana noin 25 % mastoista kaatui tuulennopeuden ollessa 80 mph (130 km/h); hurrikaanin vaikutusalue oli pääosin Kuuba, Haiti, Puerto Rico, Jamaika ja Bahama-saaret.

G. Tuulivoimalat kestävät hyvin kuivuutta; lämpövoimalaitokset, jotka käyttävät säännöllisesti vettä jäähdytykseen (> 99 % Yhdysvaltojen voimaloista), ovat vaarassa huomattavan veden puutteen aikana.

I. Aurinkopaneelit voivat menettää hyötysuhdettaan lämmön vaikutuksesta. Vaikutus on arviolta 0,1–0,5 prosenttia yhtä celsiusasteen nousua kohden.

J. Siirto ja jakelu kärsivät kahdesta kuumuuden aiheuttamasta lisäriskistä ja näiden yhteisvaikutuksesta. Ensiksi lämpötilan nousu lisää ilmastointilaitteiden käyttöä, mikä lisää kuormitusta. Samanaikaisesti lämpö heikentää verkon tehokkuutta.

---

<sup>17</sup> Ks. myös mm. UNCTAD 2021: <https://unctad.org/news/climate-change-impacts-sea-ports-growing-threat-sustainable-trade-and-development>.



Väylävirasto  
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-317-938-7

[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)