



Aalto-yliopisto
Perustieteiden
korkeakoulu

Suomen rautatieverkoston robustisuus

Samu Kilpinen

28.09.2016

Ohjaaja: *Eeva Vilkkumaa*

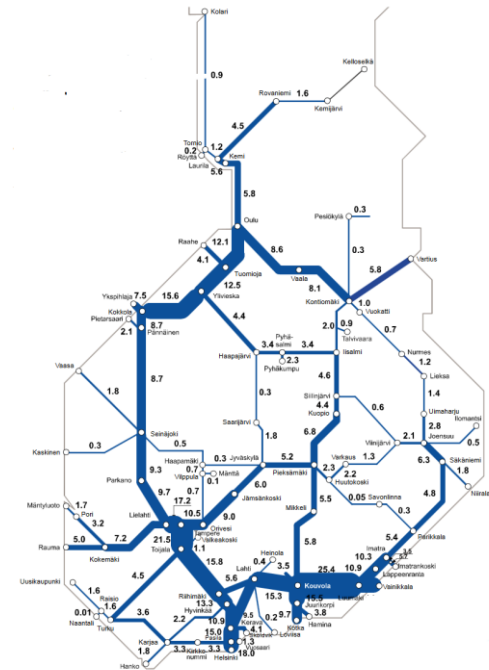
Valvoja: *Ahti Salo*

Rautatieverkosto

- Rautatie on erinomainen tapa kuljettaa suuria ihmis- ja hyödykemääriä
 - Käyttöä etenkin poikkeustilanteissa
- Rautatieverkoston suorituskykyä voidaan mitata eri tavoin
 - Kuinka paljon matkustajia / hyödykkeitä verkon läpi voidaan enintään kuljettaa?
 - Kuinka monta reittiä eri asemien välillä on?

Työn tavoitteet

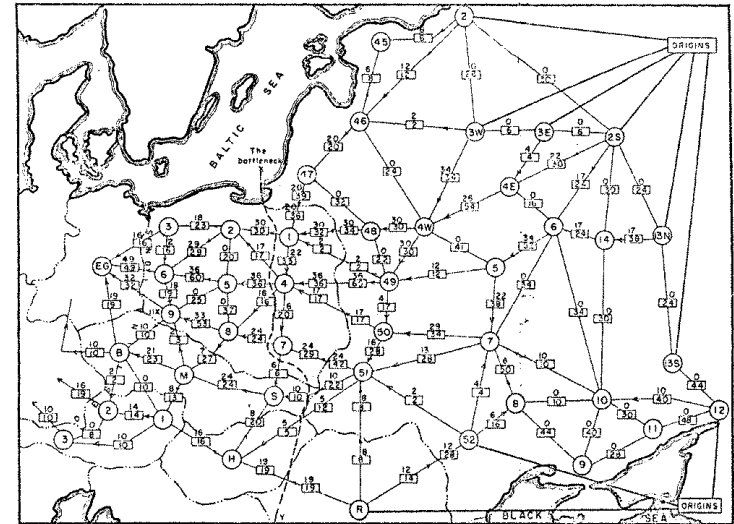
- Työssä tutkitaan Suomen rautatieverkoston robustisuutta eli sietokykyä vikaantumisille
 - Millainen Suomen rataverkon topologia on?
 - Minkä verkon osien vikaantuminen alentaa suorituskykyä eniten?



Liikennevirasto 2015

Vikaantumiset rautatieverkostossa

- Rautatieverkosto voidaan mallintaa verkkona, jossa solmut (asemat) on liitetty toisiinsa kaarilla (rataosuuksilla)
- Verkon solmut ja kaaret voivat vikaantua esim. sääolosuhteiden tai hyökkäyksen takia
- On tärkeää tunnistaa ne verkon osat, joiden vikaantuminen alentaa verkon suorituskykyä eniten



Yhdysvaltojen ilmavoimille tehty mallinnus Neuvostoliiton rautatieverkostosta (Ford & Fulkerson 1954)

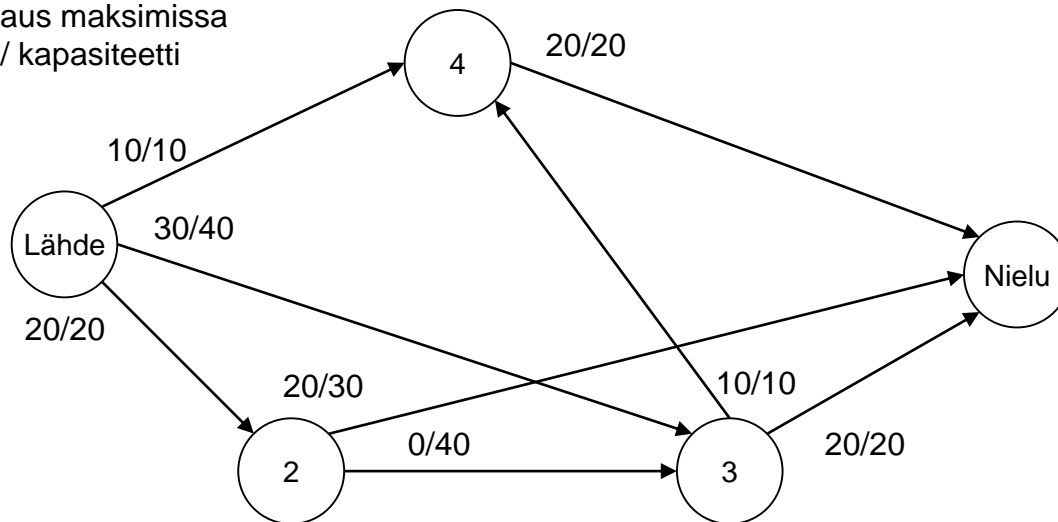
Robustisuuden topologiset mittarit

- Läheisyys
 - Tarvittavien askelten määrä, kun halutaan siirtyä yhdestä solmusta kaikkiin muihin solmuihin
- Keskeisyys
 - Kuinka moni lyhin reitti solmusta toiseen kulkee kyseisen solmun läpi
- Pieni maailma –verkosto
 - Verkko, jossa solmusta toiseen pääse muutamalla askeleella, mutta suoria yhteyksiä on vähän
 - Robusti satunnaisten häiriöiden suhteen, mutta haavoittuvasempi kohdennettujen häiriöiden osalta koska paljon suuriasteisia solmuja
- Skaalaton verkosto
 - Solmuista lähtevien kaarien määrän jakauma $P(k) \sim k^{-\lambda}$
 - Robusti satunnaisten häiriöiden suhteen, mutta haavoittuvasempi kohdennettujen häiriöiden osalta koska paljon suuriasteisia solmuja
 - Todella pieniä ”pieni maailma” verkostoja

Suorituskykyyn perustuvat mittarit: Maksimivirtaus

- Rautatieverkossa eräs suorituskyvyn mittari on kuljetettujen bruttotonnien määrä
- Rautatieverkon maksimikapasiteetin määrittäminen voidaan muotoilla maksimivirtaustehtävänä

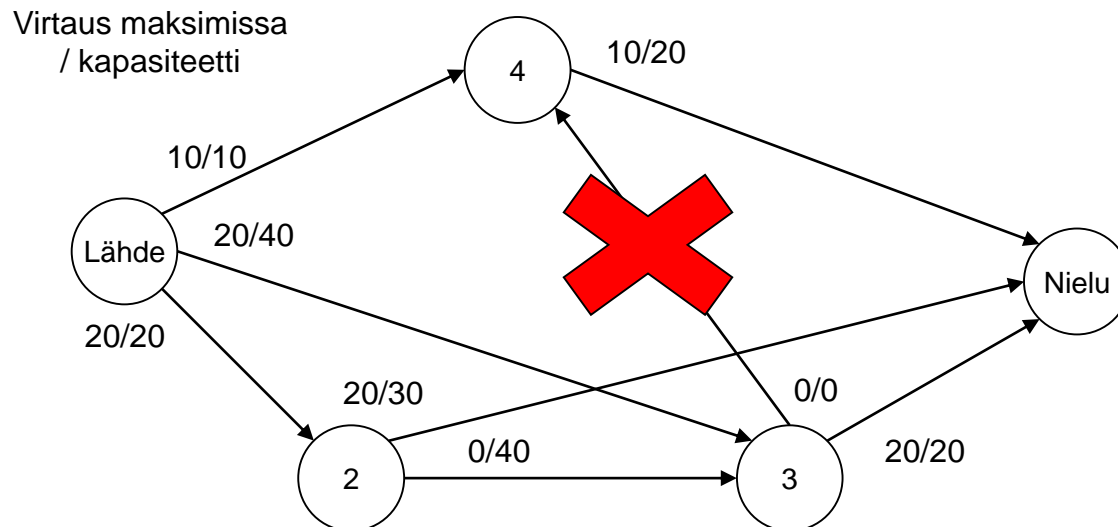
Virtaus maksimissa
/ kapasiteetti



Esimerkin
maksimivirtaus on 60

Vikaantumisten vaikutus suorituskykyyn

- Tilanne mallinnetaan poistamalla vikaantuneet osat ja ratkaisemalla uuden tehtävän maksimivirtaus



Maksimivirtaus=50 vrt.
ehjän verkoston 60,
≈17% ero
suorituskyvyssä

Suorituskykyyn perustuvat mittarit:

Tehokkuus

- Verkon G tehokkuus $E(G)$ kertoo verkon kyvystä välittää informaatiota:

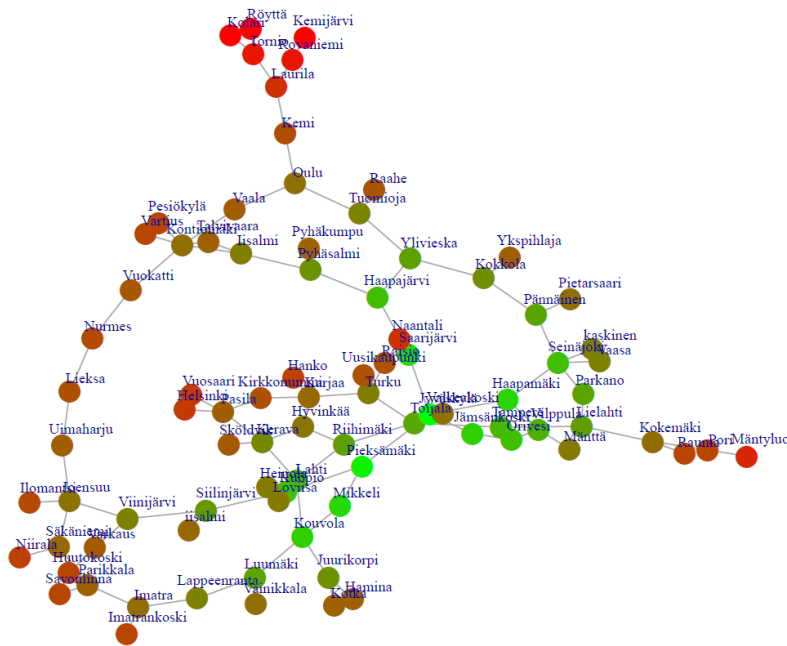
$$E(G) = \frac{\sum_{i \neq j \in G} \epsilon_{ij}}{N(N-1)} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}$$

missä N on solmujen määrä, K kaarien määrä, d_{ij} solmujen i ja j lyhin etäisyys, ϵ_{ij} kuvaa solmujen i ja j informaation vaihtoa (kääntäen verrannollinen etäisyyteen)

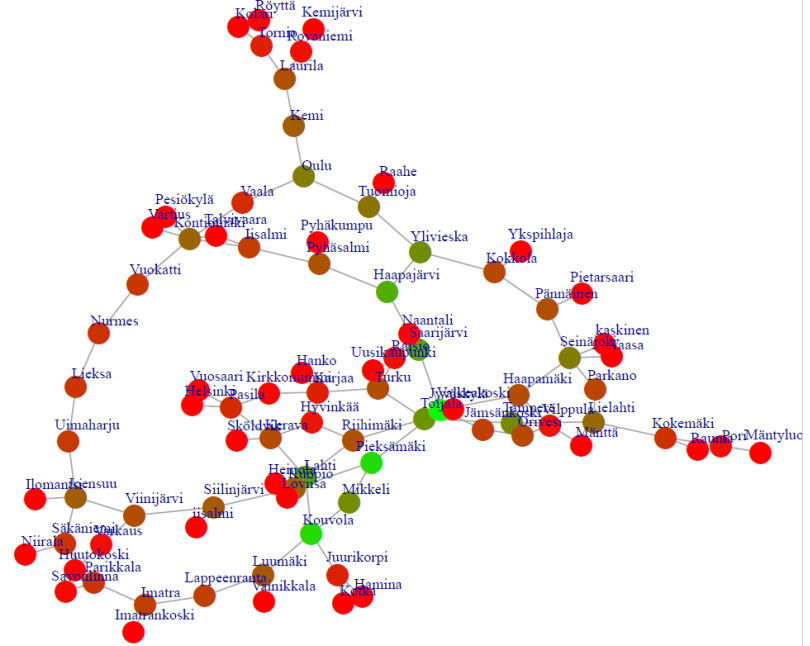
- $E(G)$ on suhdeluku ideaaliseen verkkoon, jossa jokaisen solmun välillä on kaari
- Voidaan käyttää kvantifioimaan pieni maailma -ilmiötä

Tulokset: Suomen rautatieverkon topologia

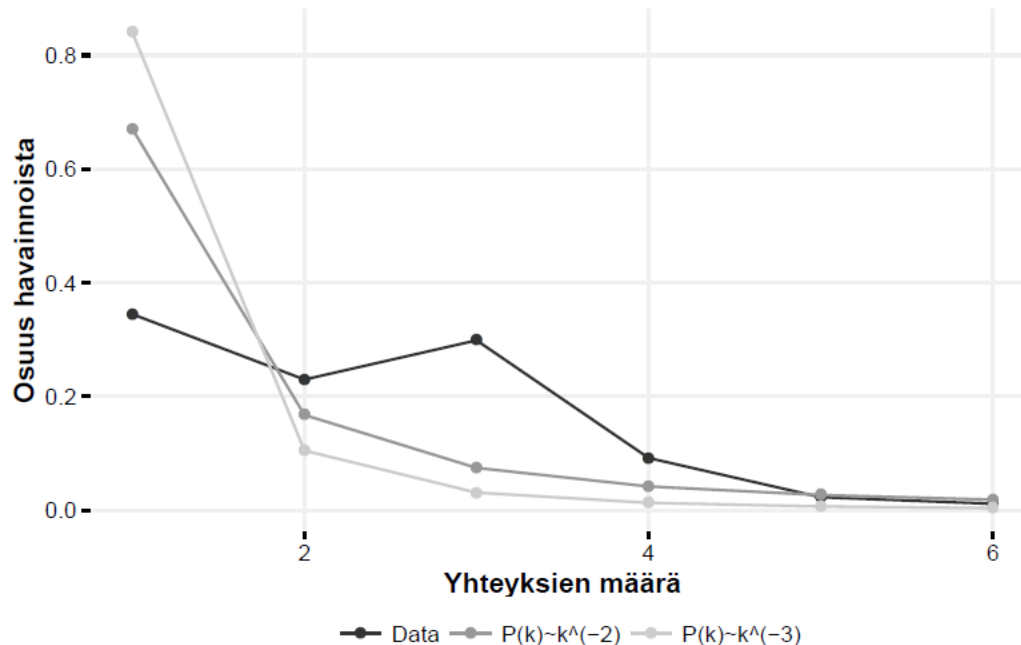
Läheisyys (closeness)



Keskeisyys (betweenness)



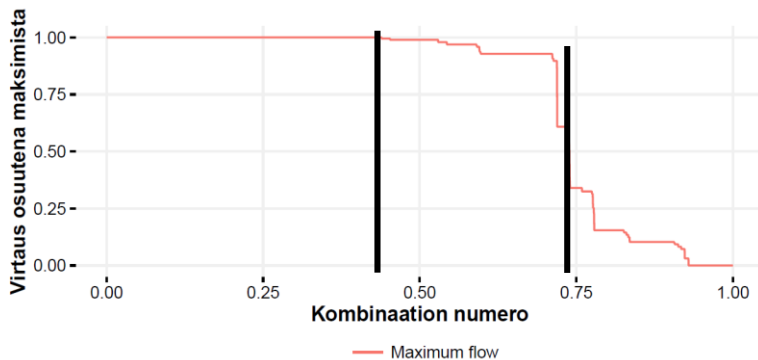
Tulokset: Rautatieverkon asemien asteiden jakauma



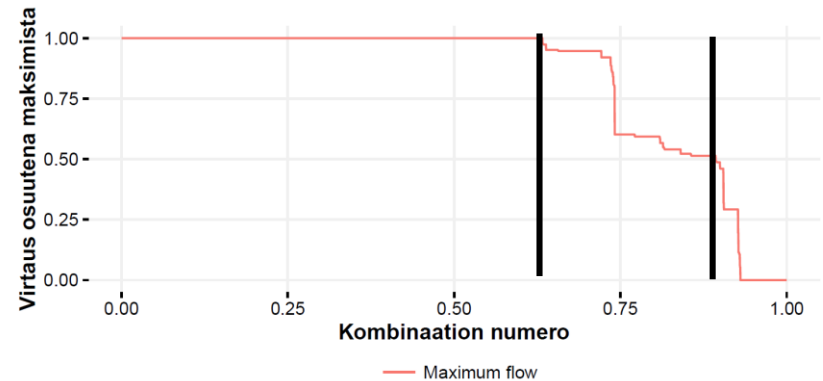
- Ei täyttä tukea hypoteesille skaalattomasta verkosta
- Vähän pieniasteisia asemia
- Samansuuntainen havainto kuin esimerkiksi Han and Liu (2009) Kiinan metrosta
- Viitteitä haavoittuvaisuudesta kohdennettua hyökkäystä kohtaan, koska verkolla on skaalatonta verkkoa enemmän solmuja, joilla iso aste

Tulokset: Maksimaaliset virtaukset valituilla väleillä kahdella häiriöllä

Helsinki-Oulu



Helsinki-Pieksämäki



Kohdennetut häiriöt haavoittavat verkkoa tehokkaammin

Poistettu solmu #1	-	Jyväskylä	Kouvola	Kouvola
Poistettu solmu #2	-	Pieksämäki	Tampere	Pieksämäki
Helsinki-Parainen virtaus	6.70	6.10	0.00	0.70
Helsinki-Pieksämäki virtaus	11.30	0.00	0.00	0.00
Helsinki-Oulu virtaus	9.70	9.40	0.00	9.00
Globaali tehokkuus	0.19	0.18	0.13	0.16
Aste	2.25	2.16	2.14	2.14

- Tarkastellaan kolmea hyökkäysstrategiaa:
 - 1) Suurin läheisyys & suurin keskimmäisyys (samat kohteet: Jyväskylä ja Pieksämäki)
 - 2) Rataverkon rakenteen visuaalinen tutkiminen (Kouvola ja Tampere; Kouvola ja Pieksämäki)
- Kouvolan ja Tampereen poistaminen alentaa virtausta ja tehokkuutta eniten
 - Potentiaalisia hyökkäyskohteita / kohteita, joiden suojaamiseen kannattaa käyttää enemmän resursseja

Johtopäätökset

- Työssä tutkittiin Suomen rataverkon robustisuutta topologisesta ja suorituskykyyn perustuvasta näkökulmasta
 - Tulokset osoittavat rataverkon olevan erityisen haavoittuva kohdistettuja häiriöitä kohtaan
 - Verkon topologiaa on hankalaa muuttaa
- Työ luo pohjaa suojaamis-/korvaamisresurssien optimaaliseen kohdentamiseen asemille ja rataosuuksille