

Kysyntäohjautuvan joukkoliikenteen matemaattisia malleja ja algoritmeja

Lauri Häme

Aalto-yliopiston perustieteiden korkeakoulu

5. kesäkuuta 2013

Johdanto

- ▶ Kysyntäohjautuva joukkoliikenne = bussi- ja taksipalvelujen välimuoto, joka perustuu ajoneuvojen joustavaan reititykseen
 - ▶ Matkat tilataan esim. internetistä ja ajoneuvojen reitit muodostuvat reaalialkaisesti tilausten perusteella
- ▶ Väitöskirjassa tarkastellaan kolmea teemaa
 - ▶ Ajoneuvojen reitinlaskenta
 - ▶ Matkustajien matkansuunnittelu
 - ▶ Taloudellinen tasapaino

Reitinlaskenta

Kauppamatkustajan ongelma

- ▶ Tunnetuin reitinlaskentaongelma on ns. kauppamatkustajan ongelma (Traveling Salesman Problem, TSP)
 - ▶ Joukko maantieteellisiä pisteitä, joiden väliset etäisyydet tunnetaan
 - ▶ Tavoitteena on löytää lyhin reitti joka kulkee kaikkien pisteiden kautta
 - ▶ Laskennallisesti haastava ongelma

Kauppamatkustajan ongelma, esimerkki

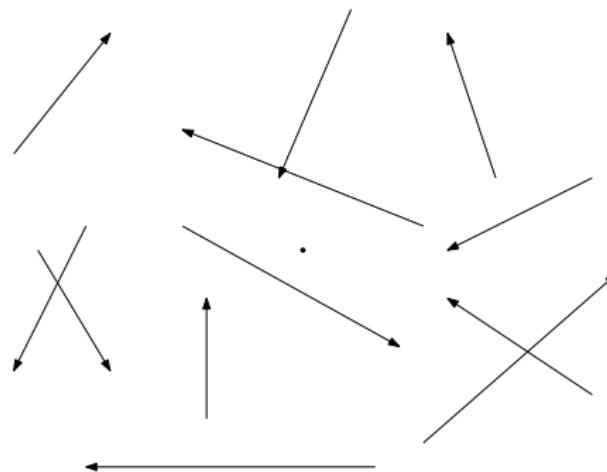


Kauppamatkustajan ongelma, esimerkki



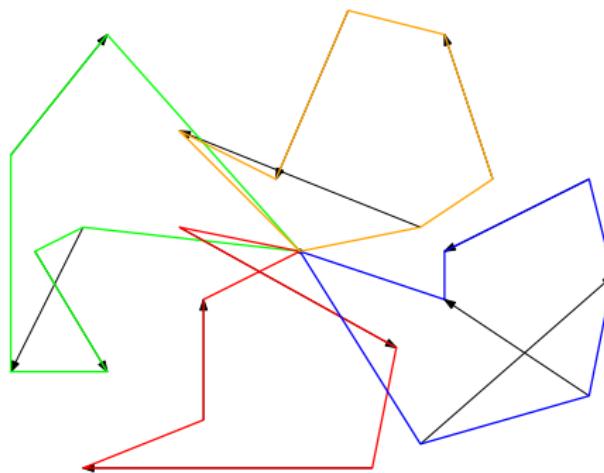
Reitinlaskenta kuljetuspalveluissa

- ▶ Kuljetuspalveluissa reitinlaskentaongelma on monimutkaisempi
- ▶ Ongelma voi olla staattinen tai dynaaminen
- ▶ Tavoitteita: tilausten lukumäärä, kustannukset, palvelutaso
- ▶ Rajoituksia: aika, kapasiteetti, edeltävyys



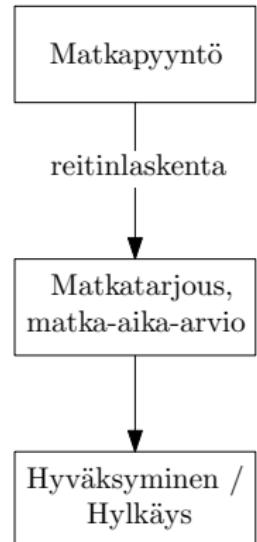
Reitinlaskenta kuljetuspalveluissa

- ▶ Kuljetuspalveluissa reitinlaskentaongelma on monimutkaisempi
- ▶ Ongelma voi olla staattinen tai dynaaminen
- ▶ Tavoitteita: tilausten lukumäärä, kustannukset, palvelutaso
- ▶ Rajoituksia: aika, kapasiteetti, edeltävyys

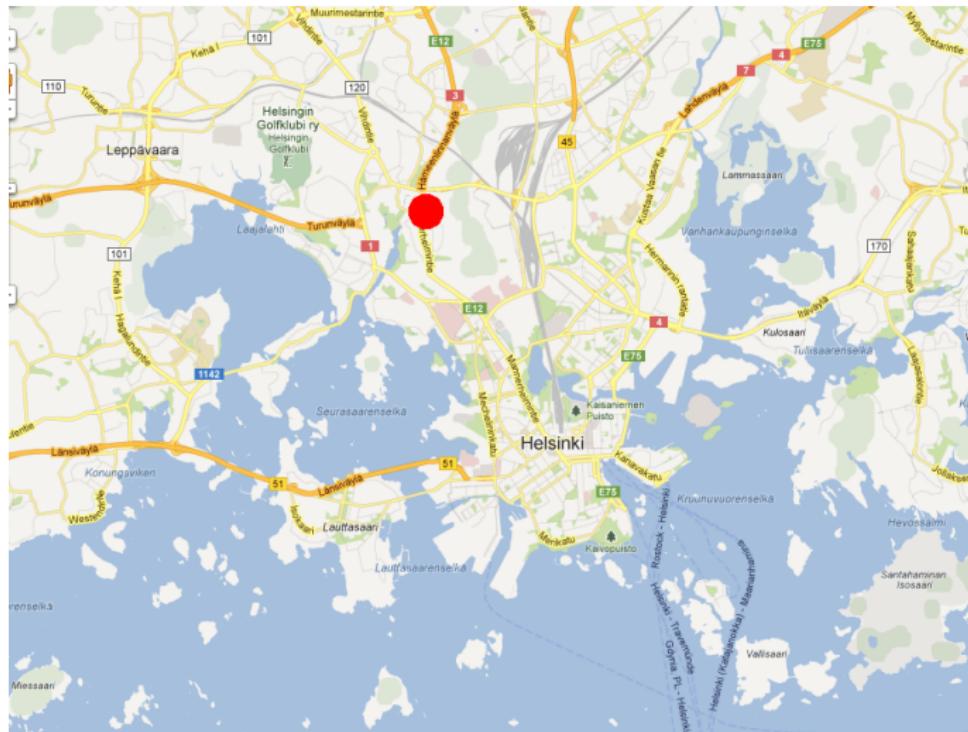


Reitinlaskenta kysyntäohjautuvassa joukkoliikenteessä

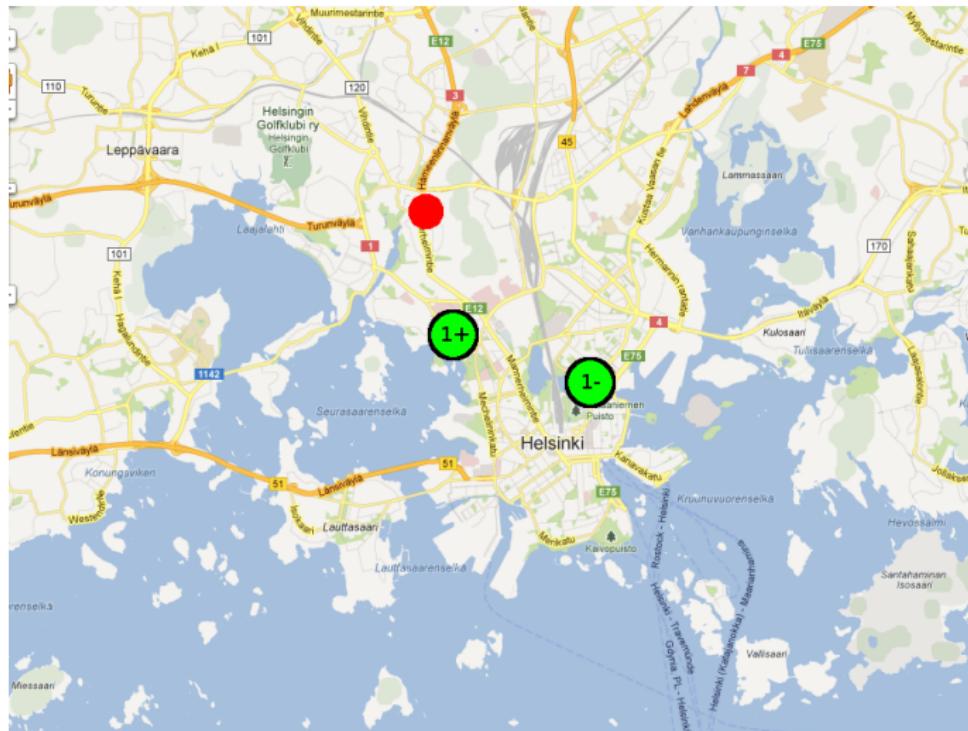
- ▶ Asiakkaat voivat tilata matkoja reaalialkaisesti esim. internet-käyttöliittymällä
- ▶ Ajoneuvojen reitit muodostuvat tilattujen matkojen perusteella
- ▶ Kunkin matkatilauksen yhteydessä ratkaistaan reitinlaskentaongelma



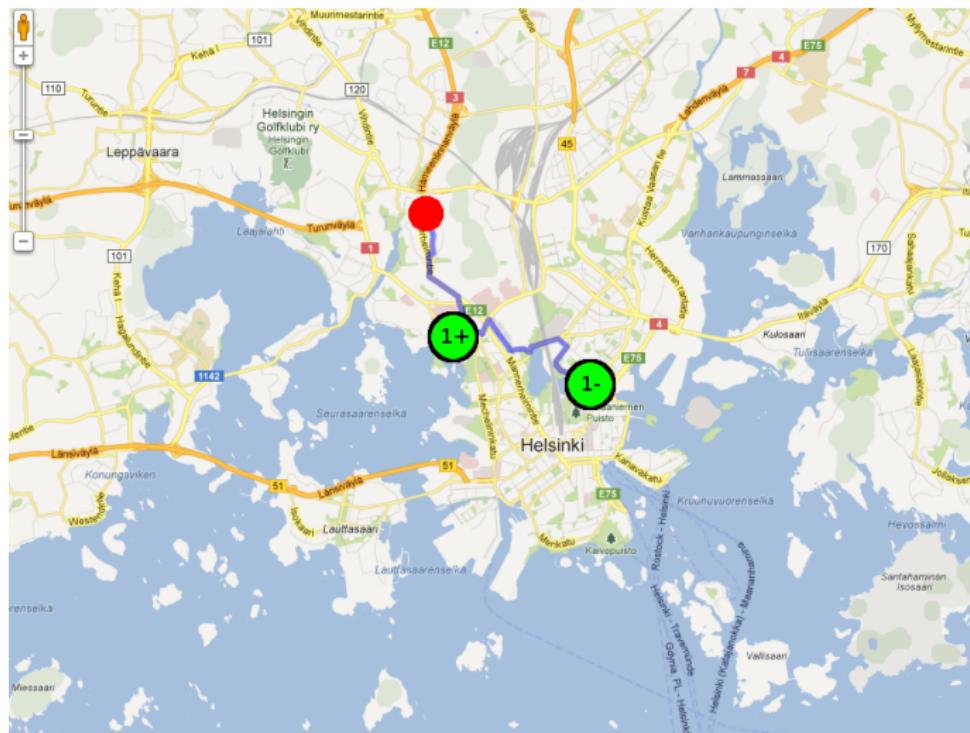
Kysyntäohjautuva joukkoliikenne, 1 ajoneuvo, esimerkki



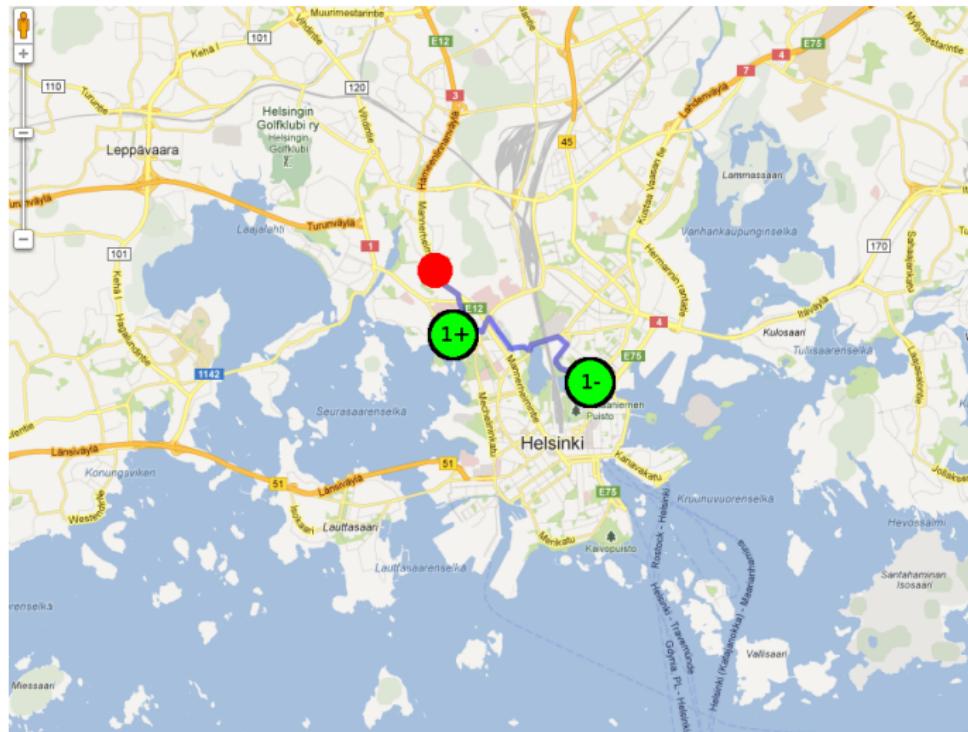
Kysyntäohjautuva joukkoliikenne, 1 ajoneuvo, esimerkki



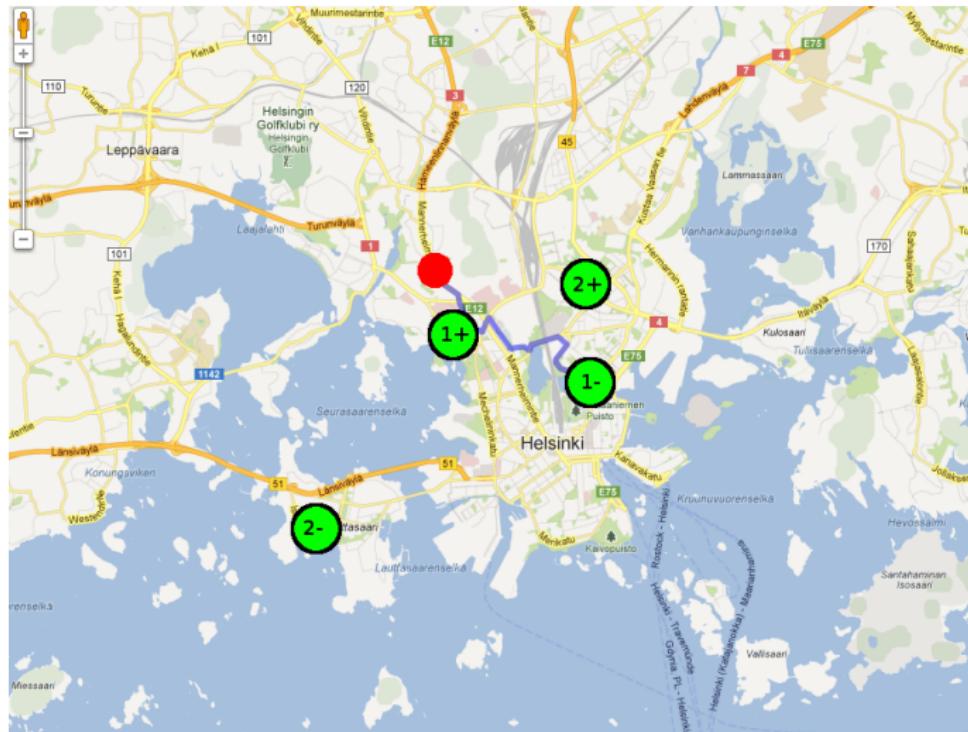
Kysyntäohjautuva joukkoliikenne, 1 ajoneuvo, esimerkki



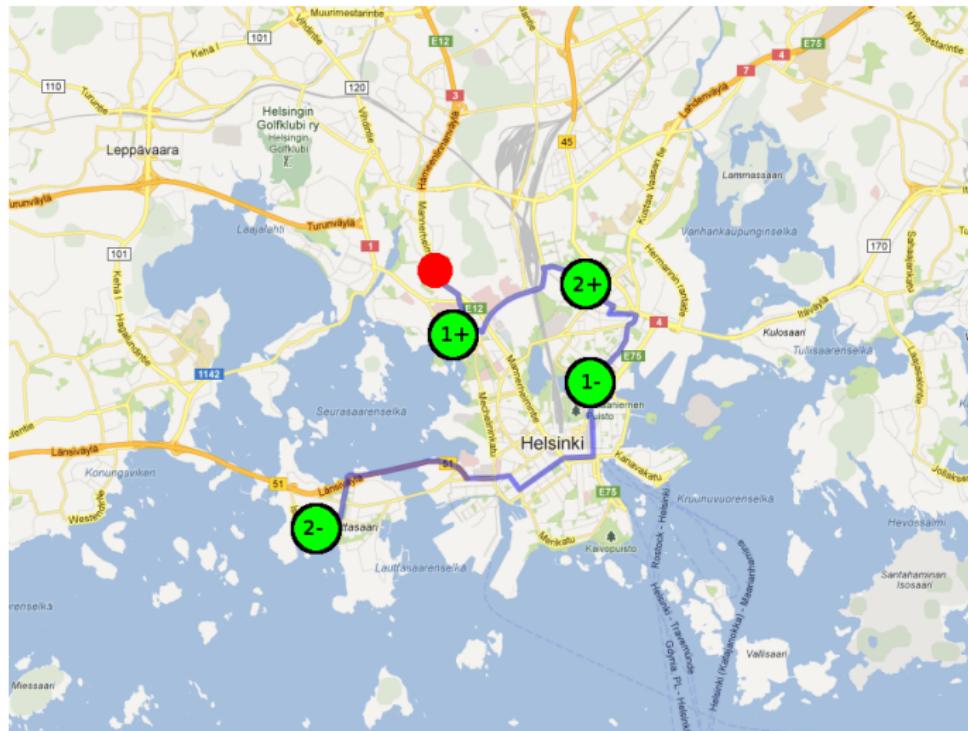
Kysyntäohjautuva joukkoliikenne, 1 ajoneuvo, esimerkki



Kysyntäohjautuva joukkoliikenne, 1 ajoneuvo, esimerkki

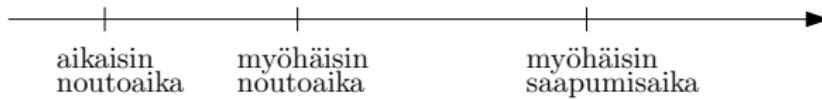


Kysyntäohjautuva joukkoliikenne, 1 ajoneuvo, esimerkki



Aikarajoitteet

- ▶ Matka-aika voi pidentyä yllättäen reittimuutosten johdosta
- ▶ Palvelutasosta voidaan huolehtia aikarajoitteilla
 - ▶ Esim. lähtö aikaisintaan klo 12:00, perillä viimeistään klo 13:00.
- ▶ Käytetään reitinlaskennassa, jotta tietty minimipalvelutaso toteutuisi
- ▶ Liian tiukat rajoitteet vähentävät reitin joustavuutta



Ajoneuvon ja reitin valintaongelma

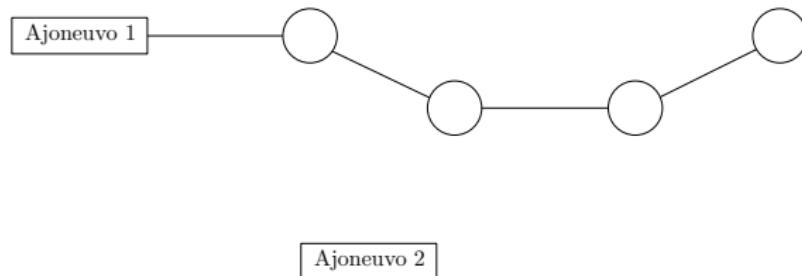
- ▶ Usean ajoneuvon tapauksessa jokaiselle uudelle asiakkaalle valitaan ajoneuvo ja valitulle ajoneuvolle määrätään uusi reitti
- ▶ Ajoneuvon ja reitin valinnassa pitää ottaa huomioon mm.
 - ▶ Uuden asiakkaan aiheuttama reitin pitenemä
 - ▶ Uuden asiakkaan palvelutaso ja muille asiakkaille aiheutuva palvelutaslon muutos
 - ▶ Kysyntäennuste
- ▶ Yleisesti jos minimoidaan reitin pituutta, palvelutaso saattaa kärsiä ja jos optimoidaan ainoastaan palvelutasoa, kustannukset kasvavat

Hajautettu ratkaisu

- ▶ Yritetään lisätä uusi asiakas johonkin olemassaolevista reiteistä
- ▶ Lasketaan jokaiselle ajoneuvolle uusi reittiehdotus ja valitaan niistä paras/parhaat
- ▶ Ajoneuvojen reittiehdotukset lasketaan erikseen, toisistaan riippumatta
 - ▶ Rinnakkaislaskenta

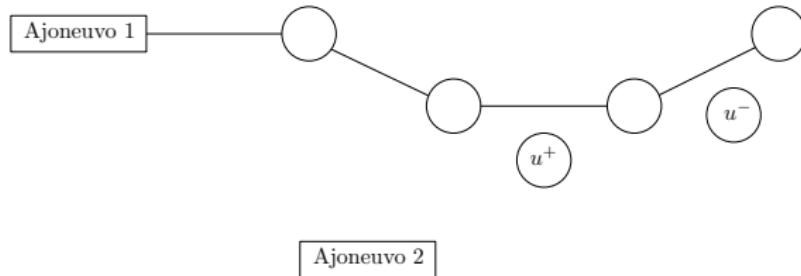
Hajautettu ratkaisu, esimerkki

- ▶ Kaksi ajoneuvoa, joista toinen odottaa tyhjänä



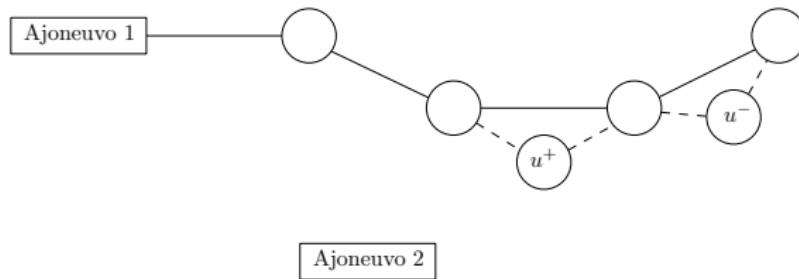
Hajautettu ratkaisu, esimerkki

- ▶ Kaksi ajoneuvoa, joista toinen odottaa tyhjänä
- ▶ Uusi asiakas tilaa matkan (u^+, u^-)



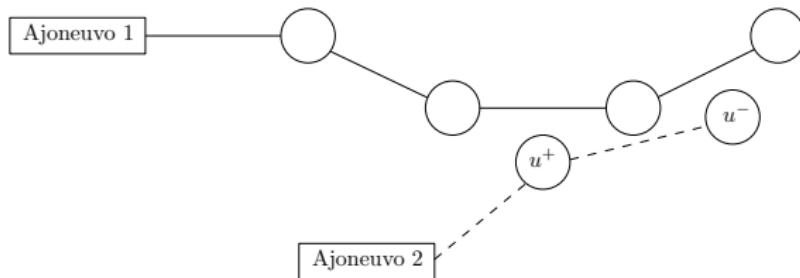
Hajautettu ratkaisu, esimerkki

- ▶ Kaksi ajoneuvoa, joista toinen odottaa tyhjänä
- ▶ Uusi asiakas tilaa matkan (u^+, u^-)
- ▶ Ehdotus 1: reitin pitenemä minimoituu, palvelutaso kärsii



Hajautettu ratkaisu, esimerkki

- ▶ Kaksi ajoneuvoa, joista toinen odottaa tyhjänä
- ▶ Uusi asiakas tilaa matkan (u^+, u^-)
- ▶ Ehdotus 1: reitin pitenemä minimoituu, palvelutaso kärsii
- ▶ Ehdotus 2: palvelutaso on paras mahdollinen, reitin pituus kasvaa enemmän



Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy

Ajoneuvo

Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy

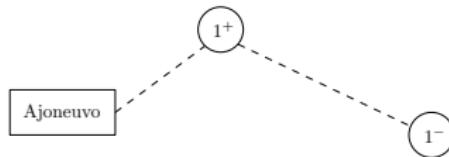
1⁺

Ajoneuvo

1⁻

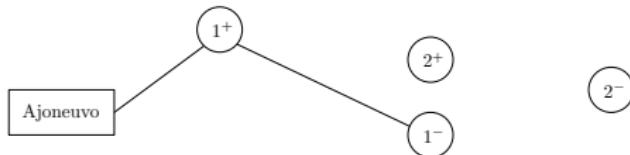
Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy



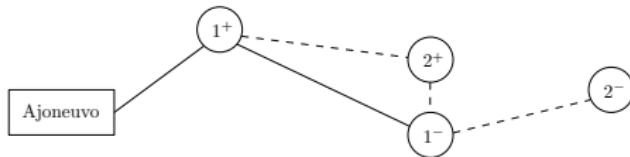
Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy



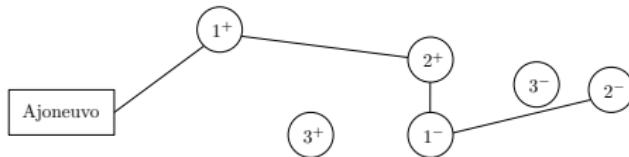
Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy



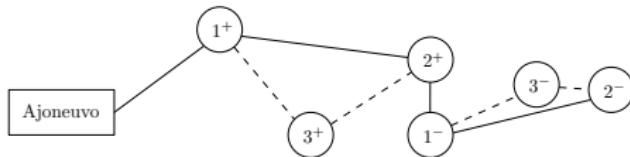
Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy



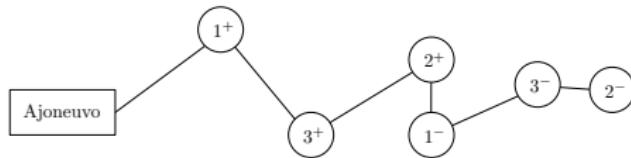
Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy



Yksinkertainen lisäysalgoritmi (Insertion algorithm)

- ▶ Yksinkertainen ratkaisu reittiehdotusten laskemiselle on lisätä uuden asiakkaan nouto- ja toimituspiste sopivanan väliin
- ▶ Ei-täydellinen ratkaisu: olemassaolevien pisteiden järjestys säilyy



Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras

Ajoneuvo

Ajoneuvo

Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



Ajoneuvo

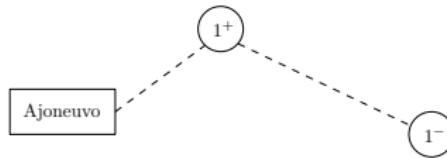
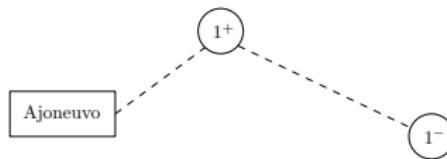


Ajoneuvo



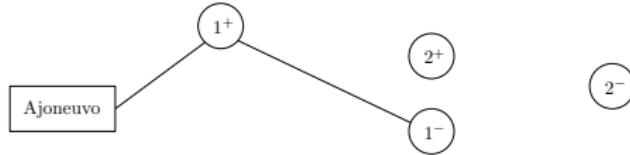
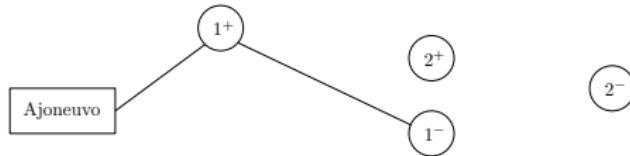
Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



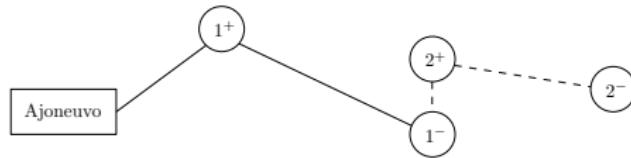
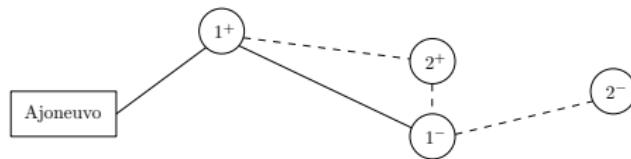
Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



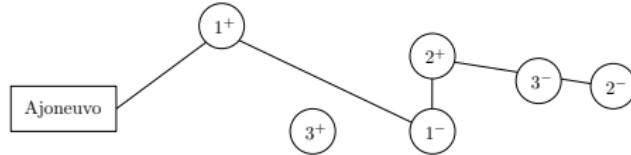
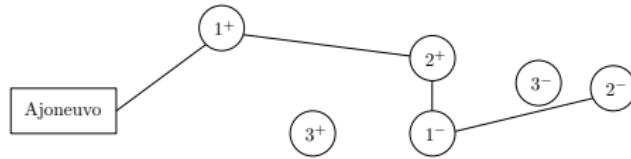
Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



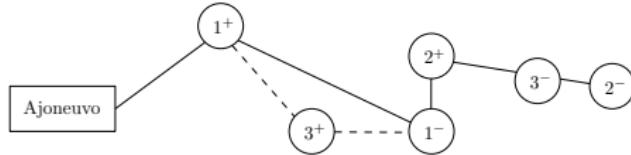
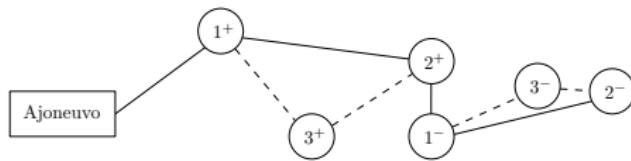
Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



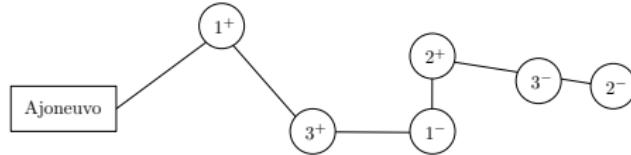
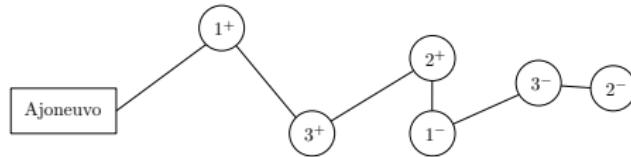
Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



Laajennettu lisäysalgoritmi (Adaptive insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain useampi vaihoehtoinen reitti ja valitaan niistä paras



Täydellinen lisäysalgoritmi (Exact insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain kaikki mahdolliset reitit (enintään $\frac{(2n)!}{2^n}$ kpl)
- ▶ Osa reiteistä voidaan hylätä rajoitusten perusteella

$1^+, 1^-$

$1^+, 1^-, 2^+, 2^-, 3^+, 3^-$
 $1^+, 1^-, 2^+, 3^+, 2^-, 3^-$

$1^+, 1^-, 2^+, 2^-$

$1^+, 1^-, 3^+, 2^+, 2^-, 3^-$
 $1^+, 3^+, 1^-, 2^+, 2^-, 3^-$

$1^+, 2^+, 1^-, 2^-$

$3^+, 1^+, 1^-, 2^+, 2^-, 3^-$
 $1^+, 1^-, 2^+, 3^+, 3^-, 2^-$

$1^+, 2^+, 2^-, 1^-$

$1^+, 1^-, 3^+, 2^+, 3^-, 2^-$
 $1^+, 3^+, 1^-, 2^+, 3^-, 2^-$

$2^+, 1^+, 1^-, 2^-$

$3^+, 1^+, 1^-, 2^+, 3^-, 2^-$
 $1^+, 1^-, 3^+, 3^-, 2^+, 2^-$

$2^+, 1^+, 2^-, 1^-$

$1^+, 1^-, 3^+, 1^-, 3^-, 2^+, 2^-$
 $1^+, 3^+, 1^-, 3^-, 2^+, 2^-$

$2^+, 2^-, 1^+, 1^-$

$3^+, 1^+, 1^-, 3^-, 2^+, 2^-$
...

Täydellinen lisäysalgoritmi (Exact insertion algorithm)

- ▶ Rakennetaan lisäysperiaatteella rinnakkain kaikki mahdolliset reitit (enintään $\frac{(2n)!}{2^n}$ kpl)
- ▶ Osa reiteistä voidaan hylätä rajoitusten perusteella

$1^+, 1^-$

$1^+, 1^-, 2^+, 2^-$

~~$1^+, 2^+, 1^-, 2^-$~~

$1^+, 2^+, 2^-, 1^-$

~~$2^+, 1^+, 1^-, 2^-$~~

~~$2^+, 1^+, 2^-, 1^-$~~

$2^+, 2^-, 1^+, 1^-$

$1^+, 1^-, 2^+, 2^-, 3^+, 3^-$
 $1^+, 1^-, 2^+, 3^+, 2^-, 3^-$

~~$1^+, 1^-, 3^+, 2^+, 2^-, 3^-$~~

$1^+, 3^+, 1^-, 2^+, 2^-, 3^-$
 ~~$3^+, 1^+, 1^-, 2^+, 2^-, 3^-$~~

$1^+, 1^-, 2^+, 3^+, 3^-, 2^-$
 ~~$1^+, 1^-, 3^+, 2^+, 3^-, 2^-$~~

$1^+, 3^+, 1^-, 2^+, 3^-, 2^-$
 ~~$3^+, 1^+, 1^-, 2^+, 3^-, 2^-$~~

$1^+, 1^-, 3^+, 3^-, 2^+, 2^-$
 ~~$1^+, 3^+, 1^-, 3^-, 2^+, 2^-$~~

$1^+, 1^-, 3^+, 3^-, 2^+, 2^-$
 ~~$3^+, 1^+, 1^-, 3^-, 2^+, 2^-$~~

Lisäysalgoritmi, tuloksia

- ▶ Tiukkojen aika- tai kapasiteettirajoitusten vallitessa kaikkien mahdollisten reittien lukumäärä pysyy kohtuullisena ja täydellinen algoritmi tuottaa nopeasti optimaalisen ratkaisun
- ▶ Jos rajoitukset eivät ole tiukkoja, saadaan tehokas ratkaisu rajoittamalla rinnakkaisen reittien lukumäärää

Rajoitettu määrä reittejä

Kaikki mahdolliset reitit



Nopea laskenta

Ei välttämättä optimaalinen ratkaisu

Hidas laskenta

Optimaalinen ratkaisu

- ▶ Yksinkertainen lisäysalgoritmi on täydellinen, kun $n < 3$

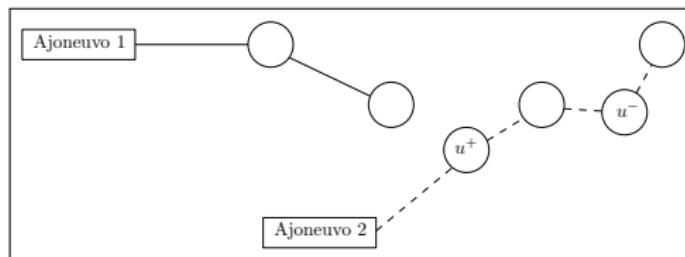
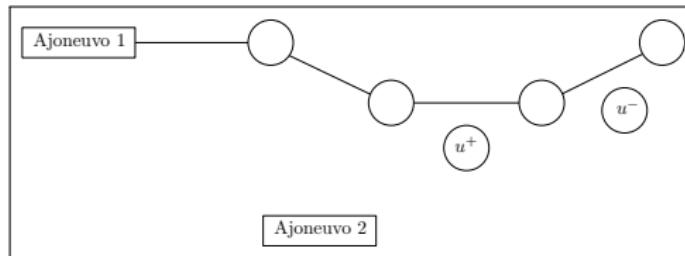
Lisäysalgoritmi, jatkotutkimus

- ▶ Millä ehdolla yksinkertainen lisäysalgoritmi tuottaa optimaalisen ratkaisun? Kuinka suuri on virhe?
- ▶ Mikä heuristinen kustannusfunktio tuottaa kävän ratkaisun suurimmalla todennäköisyydellä, kun säilytetään vain osa reiteistä?
 - ▶ Numeeriset tulokset: Total time slack, max-min time slack, route duration

Keskitetty ratkaisu

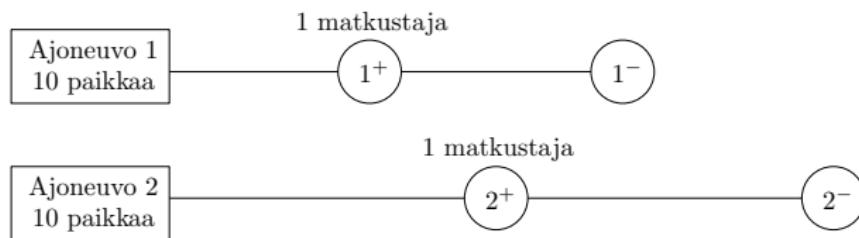
- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa etsitään parasta mahdollista asiakkaiden, ajoneuvojen ja reittien yhdistelmää
- ▶ Toistaiseksi noutamattomien asiakkaiden ajoneuvo voi vaihtua
- ▶ Periaate sisältää hajautetut ratkaisut

Keskitetty ratkaisu, esimerkki 1



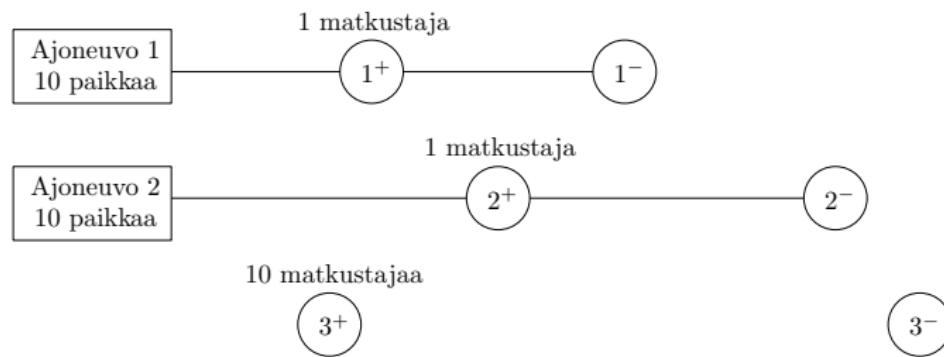
Keskitetty ratkaisu, esimerkki 2

- ▶ Keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu rajoitetuissa tapauksissa



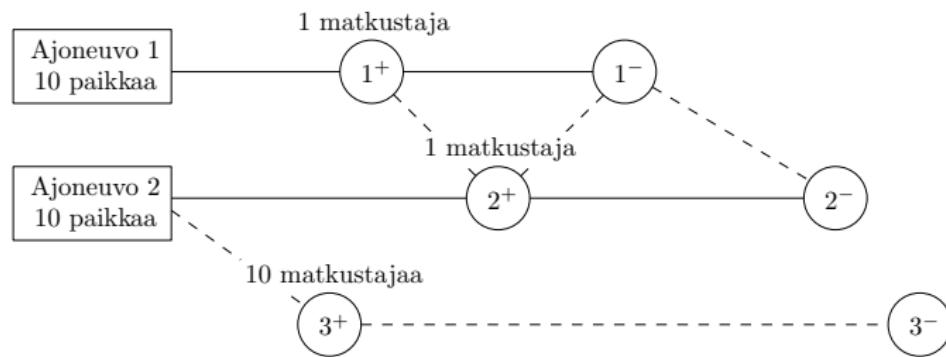
Keskitetty ratkaisu, esimerkki 2

- ▶ Keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu rajoitetuissa tapauksissa



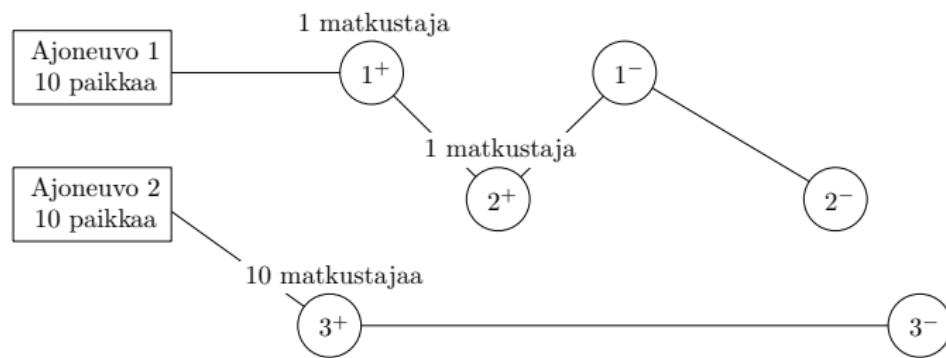
Keskitetty ratkaisu, esimerkki 2

- ▶ Keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu rajoitetuissa tapauksissa



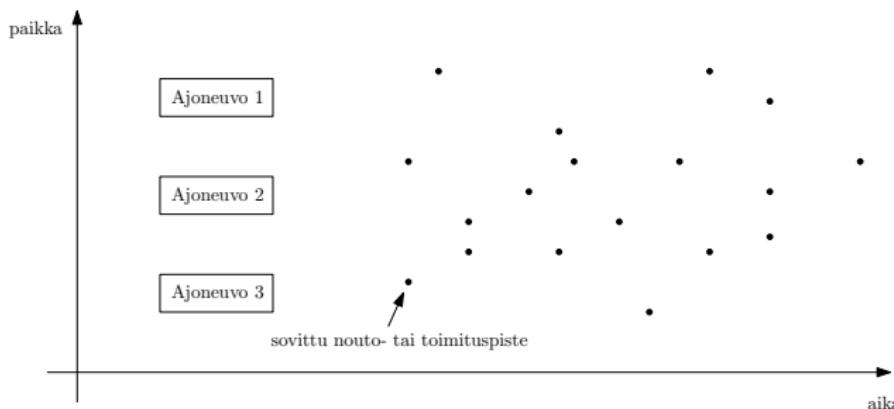
Keskitetty ratkaisu, esimerkki 2

- ▶ Keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu rajoitetuissa tapauksissa



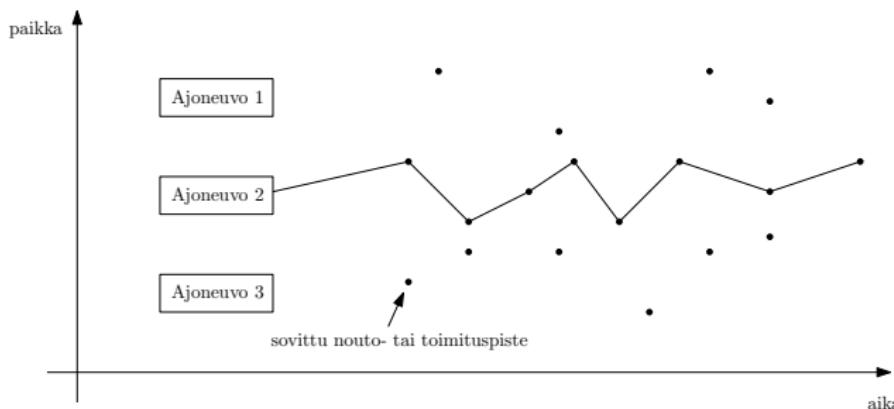
Maksimiklusteriperiaate (Maximum cluster algorithm)

- ▶ Perusidea: Etsitään suurin asiakasjoukko (klusteri), joka sopii yhden ajoneuvon reitille
- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa klusterit lasketaan uudelleen



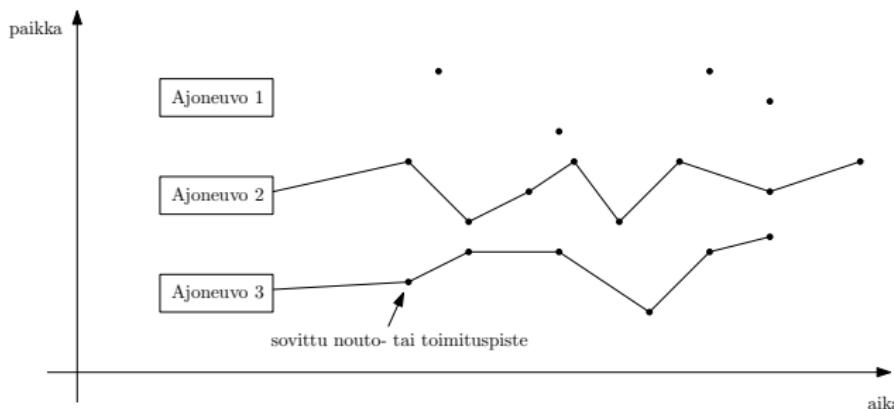
Maksimiklusteriperiaate (Maximum cluster algorithm)

- ▶ Perusidea: Etsitään suurin asiakasjoukko (klusteri), joka sopii yhden ajoneuvon reitille
- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa klusterit lasketaan uudelleen



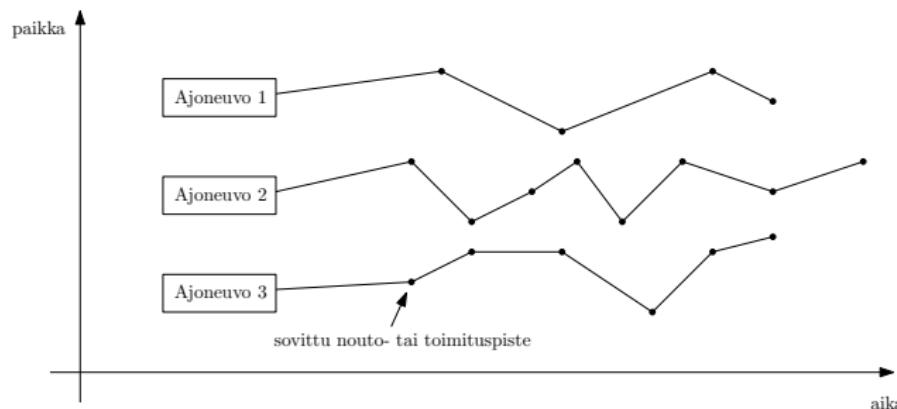
Maksimiklusteriperiaate (Maximum cluster algorithm)

- ▶ Perusidea: Etsitään suurin asiakasjoukko (klusteri), joka sopii yhden ajoneuvon reitille
- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa klusterit lasketaan uudelleen



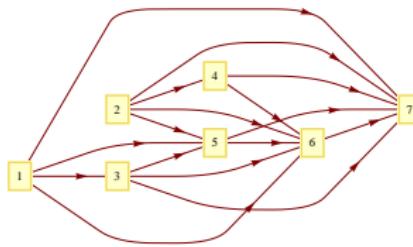
Maksimiklusteriperiaate (Maximum cluster algorithm)

- ▶ Perusidea: Etsitään suurin asiakasjoukko (klusteri), joka sopii yhden ajoneuvon reitille
- ▶ Uuden matkatilauksen saapuessa klusterit lasketaan uudelleen



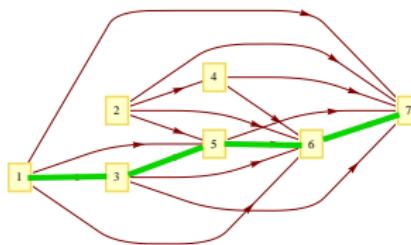
Arvojärjestysmenetelmä (Routing by Ranking)

- ▶ Maksimiklusterit voidaan määrittää tehokkaasti järjestämällä nouto- ja toimituspisteet arvojärjestykseen
- ▶ Suurimman arvon saavat pisteet, joista on mahdollista siirtyä mahdollisimman moneen arvokkaaseen pisteeseen aikarajojen sisällä, $h_i = \sum_{j \in N_i} h_j$
- ▶ Arvojärjestys saadaan laskemalla suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori (ks. HITS-hakualgoritmi)



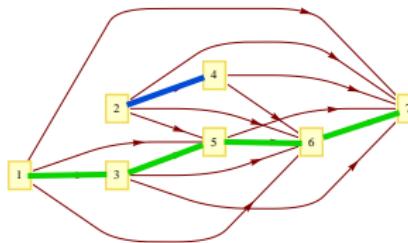
Arvojärjestysmenetelmä (Routing by Ranking)

- ▶ Maksimiklusterit voidaan määrittää tehokkaasti järjestämällä nouto- ja toimituspisteet arvojärjestykseen
- ▶ Suurimman arvon saavat pisteet, joista on mahdollista siirtyä mahdollisimman moneen arvokkaaseen pisteeseen aikarajojen sisällä, $h_i = \sum_{j \in N_i} h_j$
- ▶ Arvojärjestys saadaan laskemalla suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori (ks. HITS-hakualgoritmi)



Arvojärjestysmenetelmä (Routing by Ranking)

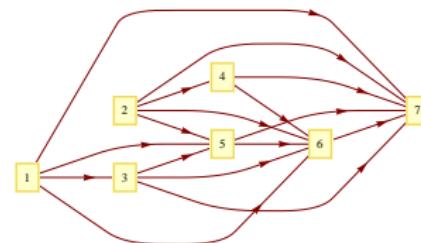
- ▶ Maksimiklusterit voidaan määrittää tehokkaasti järjestämällä nouto- ja toimituspisteet arvojärjestykseen
- ▶ Suurimman arvon saavat pisteet, joista on mahdollista siirtyä mahdollisimman moneen arvokkaaseen pisteeseen aikarajojen sisällä, $h_i = \sum_{j \in N_i} h_j$
- ▶ Arvojärjestys saadaan laskemalla suurinta ominaisarvoa vastaava ominaisvektori (ks. HITS-hakualgoritmi)



Arvojärjestysmenetelmä (Routing by Ranking)

- ▶ Sink graph: = DAG, jossa yhdelle solmulle (päätepiste) on lisätty silmukka
- ▶ Dominantin ominaisvektorin arvot vastaavat polkujen lukumäärää eri pisteistä päätepisteisiin

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



$$h = (8, 4, 6, 2, 2, 1, 1)$$

Keskitetty ratkaisu, tuloksia

- ▶ Arvojärjestysmenetelmä tuottaa tehokkaasti käypiä ratkaisuja tiukkojen rajoitusten vallitessa
- ▶ Kertaluokkaa nopeampi aikaisempiin menetelmiin verrattuna
- ▶ Yleisesti keskitetyn ratkaisun merkitys korostuu, kun
 - ▶ rajoitteet ovat tiukkoja
 - ▶ reitit ovat pitkiä (pitkät ennakkotilausajat)
- ▶ Testiaineistossa ratkaisematon ongelma: 5 ajoneuvoa, 84 asiakasta, onko olemassa käypä ratkaisu?
- ▶ Jatkotutkimus: Arvojärjestysmenetelmän soveltaminen muihin ongelmiin

Matkansuunnittelu

Matkansuunnittelu

- ▶ Matkansuunnittelu (Journey planning) = joukkoliikennevälilineen ja reitin valinta
- ▶ Tarkoituksena on löytää matkustajalle paras reitti ja aikataulu lähtöpisteestä määränpäähän, esim.
 - ▶ 16:27: kävely pysäkille A,
 - ▶ 16:39: bussi numero 58 pysäältä A pysäkille B
 - ▶ 16:53: kävely pysäältä B määränpäähän, perillä klo 17:11

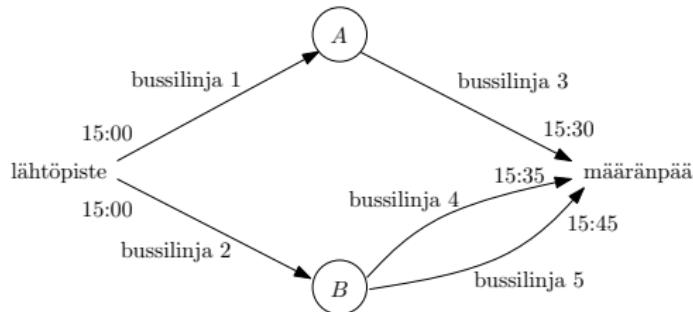


Deterministinen ja stokastinen malli

- ▶ *Deterministisillä* menetelmillä voidaan laskea etukäteen paras reitti esim. matka-ajan, odotusajan, kävelymatkan tai vaihtojen lukumäärän suhteeseen
- ▶ Todellisuudessa etukäteen laskettu reitti ei välittämättä toteudu esim. myöhästymisien tai vuorojen peruutuksien takia
- ▶ *Stokastinen* malli ottaa huomioon mahdolliset reittimuutokset matkan varrella
- ▶ Mallin avulla voidaan laskea parhaan reitin lisäksi paras matkastrategia eri tavoitteiden suhteeseen

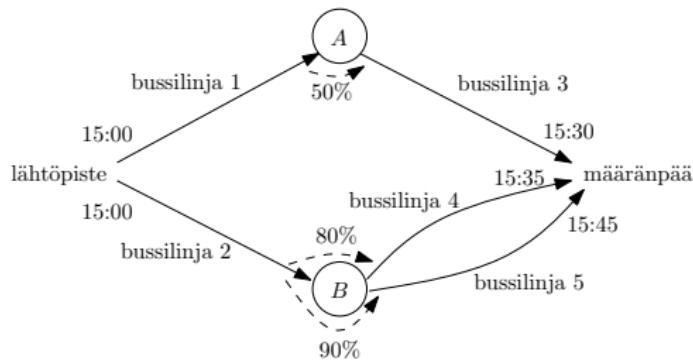
Deterministinen malli, esimerkki

- ▶ Tavoitteena on saapua mahdollisimman aikaisin määränpäähän, vaihto pysäkillä A tai B
- ▶ Kaikki bussilinjat kulkevat 20 minuutin välein
- ▶ Nopein matka: bussi 1 klo 15:00, vaihto pysäkillä A, perillä klo 15:30



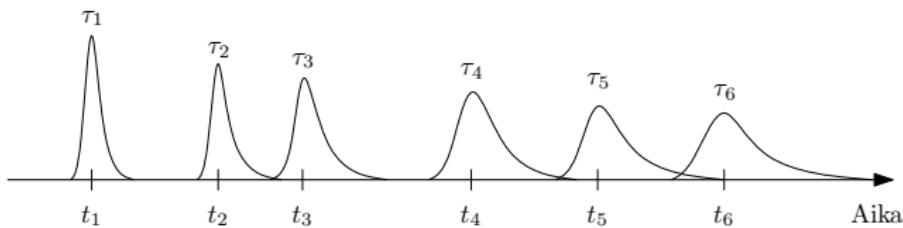
Stokastinen malli, esimerkki

- ▶ Lisätään malliin vaihtojen onnistumisien todennäköisyydet
- ▶ Jos kuljetaan busseilla 1 ja 3 pysäkin A kautta, saapumisajan odotusarvo on 15:40
- ▶ Paras matkastrategia: bussilla 2 pysäkkeille B, vaihto seuraavaksi saapuvaan bussiin, odotettu saapumisaika 15:37



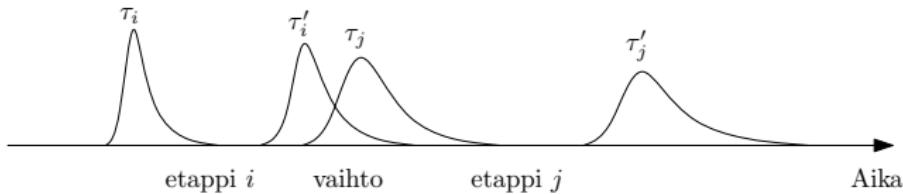
Matka-ajat stokastisessa mallissa

- ▶ Liikennepalvelujen arviodut ohitusajat pysäkeillä määritellään satunnaismuuttujina (esim. gammajakauma) odotusarvojen sijaan



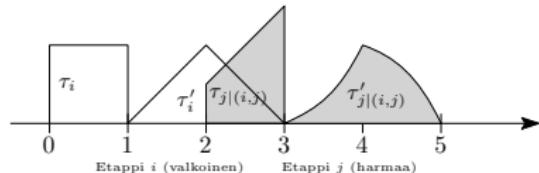
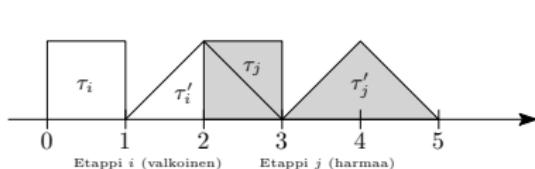
Vaihdon onnistumisen todennäköisyys

- ▶ Matka voidaan esittää etappeina, joista jokaisella on alkamis- ja päätymisaika
 - ▶ $\tau_i :=$ etapin i alkamisaika
 - ▶ $\tau'_i :=$ etapin i päätymisaika
- ▶ Vaihto etapilta i etapille j onnistuu todennäköisyydellä $p_{ij} = P(\tau'_i \leq \tau_j)$



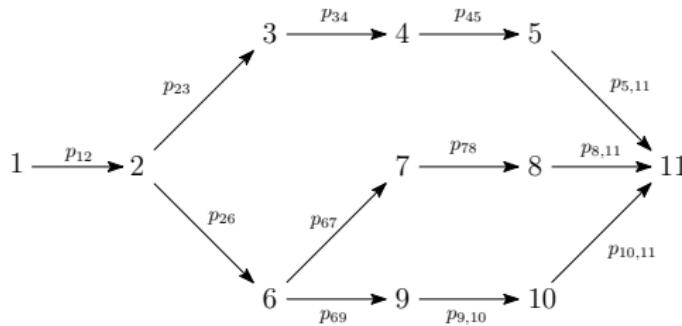
Todennäköisyyksien ehdollisuus matkansuunnittelussa

- ▶ Onnistuneet vaihdot eivät ole riippumattomia tapahtumia
 - ▶ Esim. Jos bussit 1 ja 2 lähtevät aikataulun mukaan samaan aikaan, on todennäköistä että vaihto onnistuu joko kumpaan tahansa tai ei kumpakaan
- ▶ Toteutuneet vaihdot vaikuttavat tulevien vaihtojen onnistumiseen
 - ▶ Esim. Jos tiukka vaihto bussista 3 bussiin 4 on onnistunut, on todennäköistä että bussi 4 on ollut myöhässä



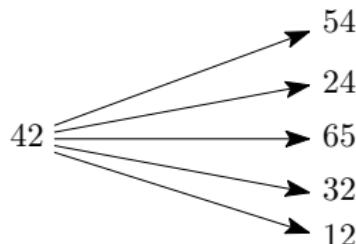
Markov-päätösprosessi (Markov Decision Process, MDP)

- ▶ Matka voidaan esittää Markov-päätösprosessina etappien verkossa
- ▶ *Tilat* ovat etappeja ja *toiminnat* matkustajan valintoja
- ▶ Tietty toiminta tietyssä tilassa johtaa toiseen tilaan siirtymiseen
- ▶ Jokaiselle tilalle voidaan määritää optimaalinen valinta (=matkastrategia, optimaalinen politiikka)



Markov-päätösprosessi (Markov Decision Process, MDP)

- ▶ Toiminta määritellään seuraavien etappien “preferenssijärjestyksenä”
- ▶ Poikkeustapauksissa voidaan laskea politiikka uudelleen, jolloin preferenssijärjestys voi muuttua



Ranking of successors of leg 42	End of leg 42: transfer options are revealed
1 : 32	1 : 32
2 : 65	2 : 65
3 : 12 ←	3 : 12 ←
4 : 54	4 : 54
5 : 24	5 : 24

Stokastinen matkansuunnittelu, tuloksia

- ▶ Stokastisen matkansuunnittelun merkitys korostuu kun
 - ▶ vaihtojen lukumäärä on suuri
 - ▶ vaihtoihin liittyy epävarmuutta
 - ▶ halutaan maksimoida matkan luotettavuutta
- ▶ Laskentaa voidaan tehostaa yksinkertaistamalla todennäköisyysmallia
 - ▶ Vaihtojen onnistumisien riippumattomuus
 - ▶ Riippumattomuus matkahistoriasta eli aiempien vaihtojen onnistumisesta
- ▶ Millä ehdolla optimaalinen poliittikka säilyy (approksimaatioiden tarkkuus)?

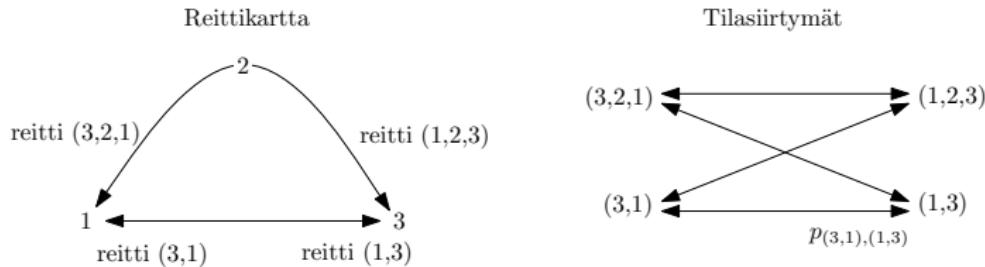
Taloudellinen tasapaino

Taloudellinen tasapaino

- ▶ Taloudellisessa tarkastelussa otetaan samanaikaisesti huomioon sekä matkustajien että liikennöitsijän päätökset
- ▶ Tasapaino = kysynnän ja tarjonnan kohtaamispiste liikenneverkossa

Kysyntäohjautuva joukkoliikenne stokastisena prosessina

- ▶ Kysyntäohjautuvaa joukkoliikennettä voidaan kuvata stokastisena prosessina, joka muodostuu *tiloista* ja tilojen välisistä *siirtymätodennäköisyyksistä*
- ▶ Ajoneuvon tila \approx reitti

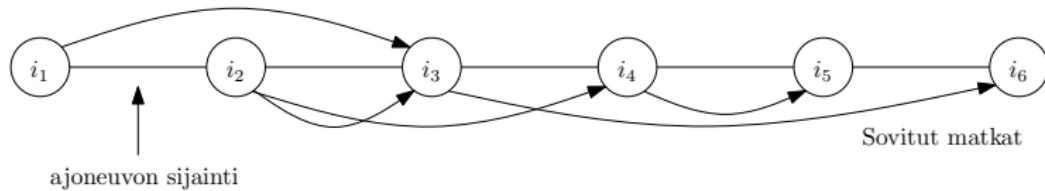


Tilan tarkempi määritelmä

► Tilan määrittelee

- Reitti ja ajoneuvon sijainti reitillä
- Kyydissä olevien matkustajien nouto- ja toimituspisteet
- Sovittujen matkojen nouto- ja toimituspisteet

Kyydissä olevat matkustajat

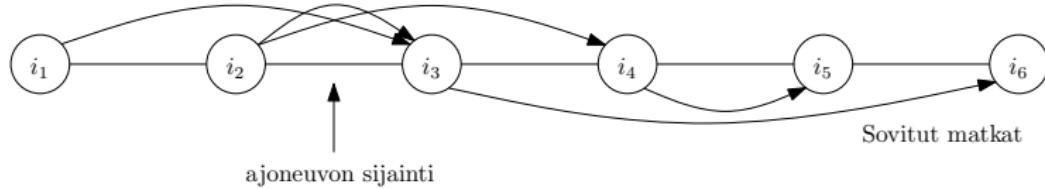


Tilan tarkempi määritelmä

► Tilan määrittelee

- Reitti ja ajoneuvon sijainti reitillä
- Kyydissä olevien matkustajien nouto- ja toimituspisteet
- Sovittujen matkojen nouto- ja toimituspisteet

Kyydissä olevat matkustajat

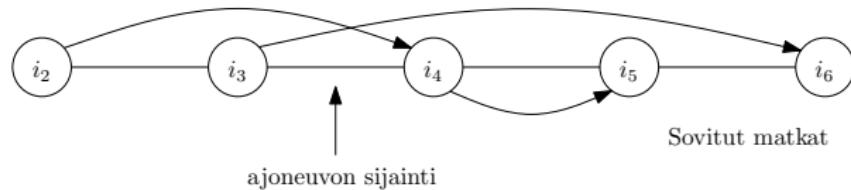


Tilan tarkempi määritelmä

► Tilan määrittelee

- Reitti ja ajoneuvon sijainti reitillä
- Kyydissä olevien matkustajien nouto- ja toimituspisteet
- Sovittujen matkojen nouto- ja toimituspisteet

Kyydissä olevat matkustajat

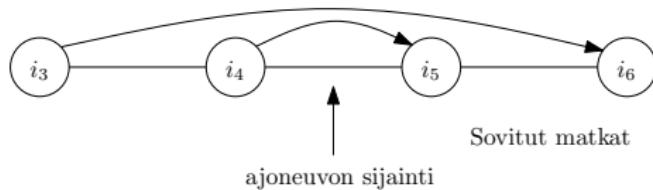


Tilan tarkempi määritelmä

► Tilan määrittelee

- Reitti ja ajoneuvon sijainti reitillä
- Kyydissä olevien matkustajien nouto- ja toimituspisteet
- Sovittujen matkojen nouto- ja toimituspisteet

Kyydissä olevat matkustajat

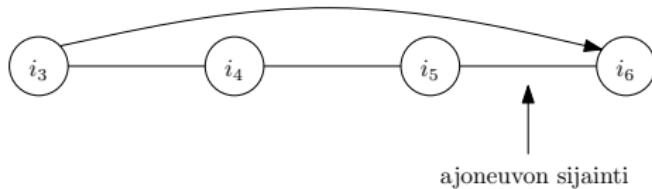


Tilan tarkempi määritelmä

► Tilan määrittelee

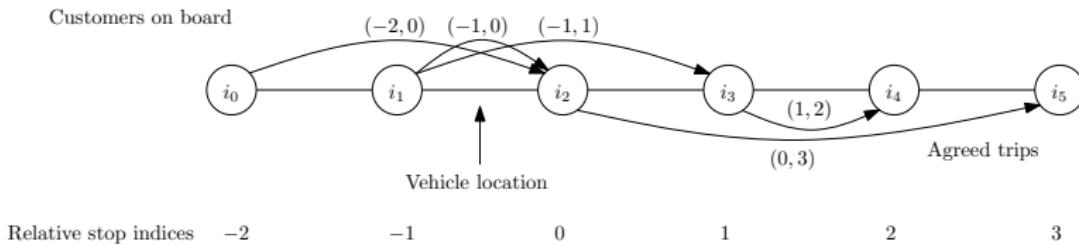
- Reitti ja ajoneuvon sijainti reitillä
- Kyydissä olevien matkustajien nouto- ja toimituspisteet
- Sovittujen matkojen nouto- ja toimituspisteet

Kyydissä olevat matkustajat



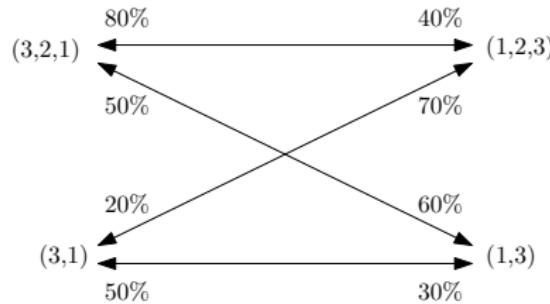
Tilan tarkempi määritelmä

- ▶ Tilan määrittelee
 - ▶ Reitti ja ajoneuvon sijainti reitillä
 - ▶ Kyydissä olevien matkustajien nouto- ja toimituspisteet
 - ▶ Sovittujen matkojen nouto- ja toimituspisteet



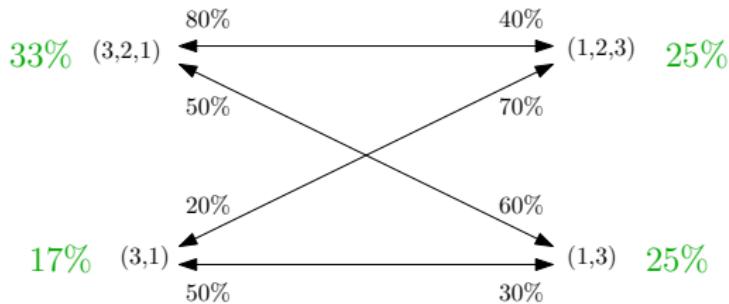
Reititysstrategia

- ▶ Tilojen r ja s välinen siirtymätodennäköisyys p_{rs} kuvailee kuinka suuri osuus ajoneuvoista siirtyy reitille s kuljettuaan reitin r
- ▶ Siirtymätodennäköisydet määrittelevät ns. reititysstrategian, joka johtaa tiettyyn ajoneuvojen tasapainojakaumaan



Reititysstrategia

- ▶ Tilojen r ja s välinen siirtymätodennäköisyys p_{rs} kuvailee kuinka suuri osuus ajoneuvoista siirtyy reitille s kuljettuaan reitin r
- ▶ Siirtymätodennäköisydet määrittelevät ns. reititysstrategian, joka johtaa tiettyyn ajoneuvojen tasapainojakaumaan



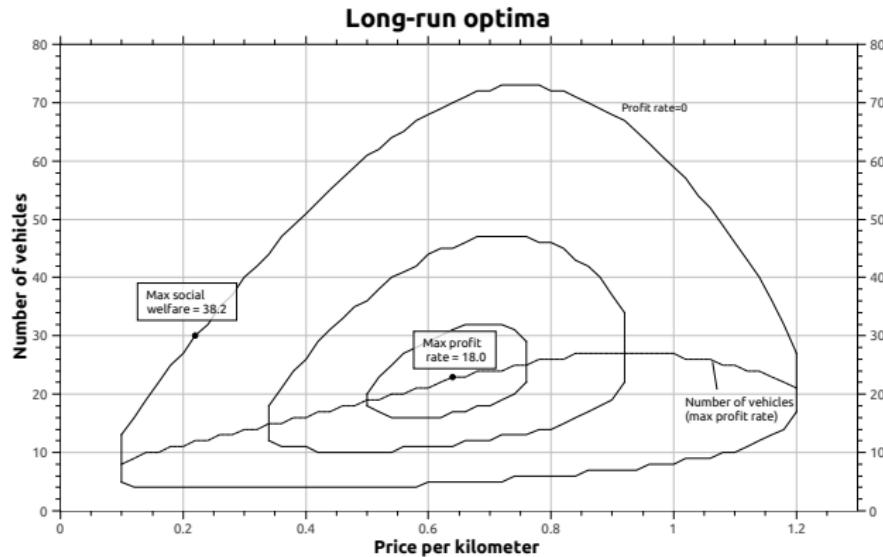
Palvelutaso ja kysyntä

- ▶ Tietty reititysstrategia tuottaa tietyn palvelutason eri matkoille
- ▶ Matkojen kysyntä määräytyy palvelutason ja vaihtoehtoisten kulkumuotojen mukaan
- ▶ Logit-valintamallissa matkustusvaihtoehdon i utiliteetti muodostuu tunnetusta osasta V_i ja satunnaisesta osasta $\epsilon_i \sim \text{Gumbel}$
- ▶ Todennäköisyys valinnalle i :

$$P_i = \frac{e^{V_i}}{\sum_j e^{V_j}}$$

Taloudellinen optimi

- ▶ Mallin avulla voidaan optimoida ajoneuvojen lukumäärä ja matkojen hinnoittelu



Taloudellinen tasapaino, tulokset

- ▶ Analyyttinen malli, jolla voidaan kuvata kysyntääöhjautuvaa joukkoliikennettä
- ▶ Mikrosimulointiin verrattuna etuna on skaalautuvuus ajoneuvojen ja matkustajien lukumäärän suhteen
- ▶ Mallin sovelluksia:
 - ▶ Optimaalisen reititysstrategian, hinnoittelun ja ajoneuvojen lukumäärän määrittäminen eri tilanteissa
 - ▶ Säännöstelyn vaikutusten tutkiminen

Taloudellinen tasapaino, jatkotutkimus

- ▶ Peliteoria ja yleinen tasapainoteoria
 - ▶ Yleisessä tasapainoteoriassa "pelaajien" lukumäärä on niin suuri, että yksi asiakas ei voi vaikuttaa hintaan
- ▶ Mallin soveltaminen Kutsuplus-datalla

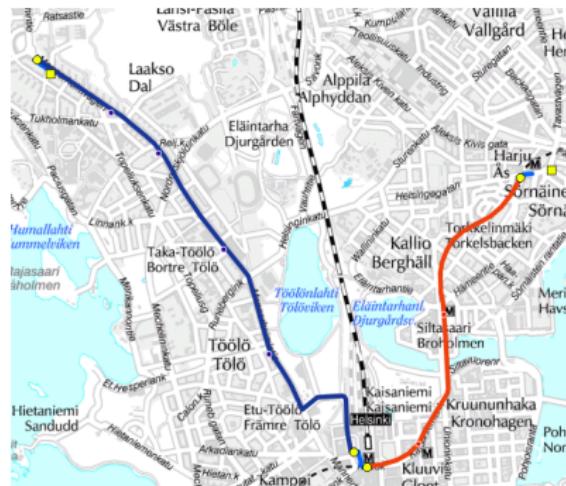
Tulosten tarkastelu

Tulosten tarkastelu

- ▶ Reitinlaskennassa tulee ottaa huomioon sekä kustannukset että palvelutaso: paras kokonaisratkaisu löytyy kahden optimin välistä
- ▶ Suuri kysyntä mahdollistaa hyvän palvelutason tuottamisen tehokkaasti
- ▶ Pidemmät ennakkotilausajat mahdollistavat tarkemman optimoinnin

Tulosten tarkastelu

- ▶ Matkansuunnittelun avulla voidaan liittää kysyntäohjautuva palvelu olemassaolevaan joukkoliikennejärjestelmään
 - ▶ Vaihdolliset yhteydet (sisäiset ja kulkumuotojen väliset vaihdot)



Tulosten tarkastelu

- ▶ Matkansuunnittelun avulla voidaan liittää kysyntäohjautuva palvelu olemassaolevaan joukkoliikennejärjestelmään
 - ▶ Vaihdolliset yhteydet (sisäiset ja kulkumuotojen väliset vaihdot)



Tulosten tarkastelu

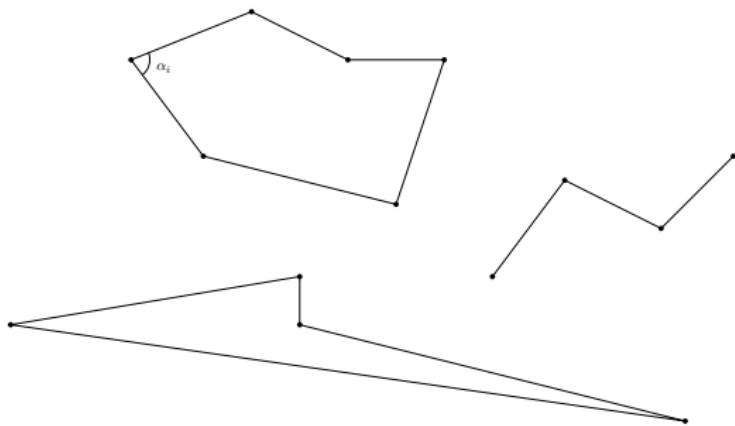
- ▶ Joukkoliikenteen lisäksi reitinlaskenta- ja matkansuunnittelumenetelmiä voidaan hyödyntää
 - ▶ rahti- ja lentoliikenteessä
 - ▶ lähetti- ja ruoankuljetuspalveluissa
 - ▶ sotilaslogistiikassa
- ▶ Menetelmät soveltuvat erityisesti
 - ▶ tehtäviin, joihin liittyy rajoitusehtoja (aika, kapasiteetti)
 - ▶ luotettavuuden optimointiin

Tulosten tarkastelu

- ▶ Helsingin seudun liikenne käynnisti vuoden 2013 alussa kaikille avoimen kysyntäohjautuvan joukkoliikenepalvelun
- ▶ Enintään 60 minuutin ennakkotilausaika
- ▶ Useita erihintaisia matkavaihtoehtoja
- ▶ Toimii noin 10 kilometrin säteellä Helsingin keskustasta
- ▶ 10 minibussia, määrää kasvatetaan
- ▶ Teoria on käytäntöä edellä
 - ▶ Reitinlaskennan merkitys korostuu suurissa järjestelmissä

Jatkotutkimus: TSP:n kulmat

- ▶ N pistettä tasossa, $S =$ pisteiden kautta kulkeva lyhin polku
- ▶ S avoin polku: onko kulmien keskiarvo aina $\geq 60^\circ$?
- ▶ S suljettu polku: onko kulmien keskiarvo aina $\geq \frac{n}{n-2} 60^\circ$?



Jatkotutkimus: Kaupunkipyöräongelma

- ▶ Vuokrattavien polkupyörien jakauman tasoitus kuljetusajoneuvoilla
- ▶ Polkupyörät kerääntyvät tiettyihin paikkoihin tiettyinä aikoina
- ▶ Data: asemilla olevien polkupyörien lukumäärä 15 min välein, puolen vuoden ajalta (Barcelona)