Aalto-yliopisto
Perustieteiden
korkeakoulu

Päästösääntelyn vaikutusten tarkastelu ympäristöinvestointeihin dynaamisen ohjelmoinnin mallin avulla (valmiin työn esittely)

Jonna Jantunen

16.09.2026

Ohjaaja: Kai Virtanen

Valvoja: Kai Virtanen

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Aalto-yliopisto
Perustieteiden
korkeakoulu

Tausta

- Hiilikaivostoiminnalla on merkittäviä ympäristövaikutuksia
- Päästöjä rankaisevalla lainsäädännöllä on tärkeä rooli kaivosten päästöjen ehkäisemisessä
  - Keinoina muun muassa verotus ja päästökauppajärjestelmät
- Sääntely vaikuttaa yritysten investointipäätöksiin ja niiden ajoitukseen

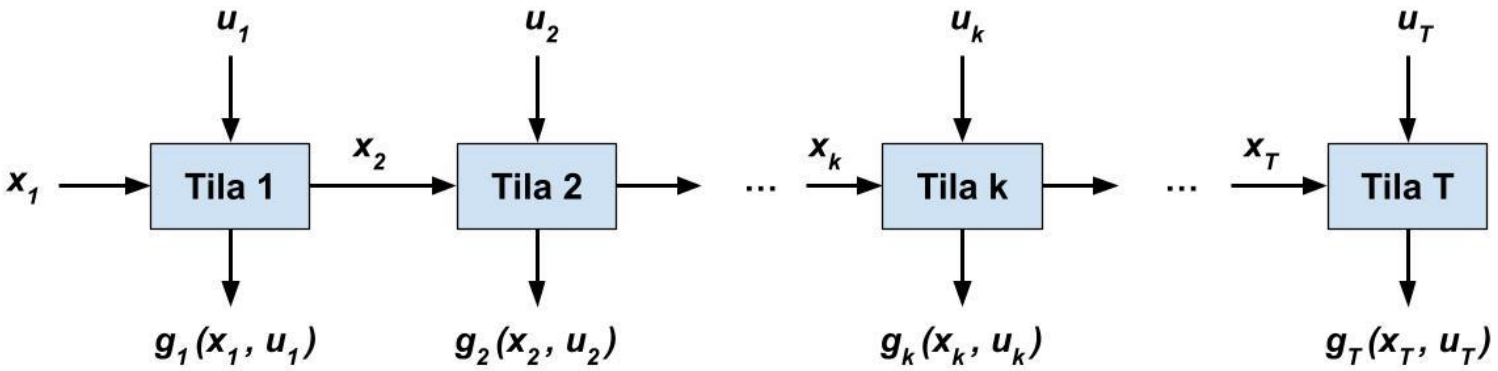
Tausta

- Dynaamisella ohjelmoinnilla voidaan mallintaa kaivosten toimintaa ja päätöksentekoa vaiheittain
- Yu et al. (2016): dynaamisen ohjelmoinnin malli hiilikaivoksen ympäristöinvestointien ajoituksen optimointiin
- Investointien ajoituksen arvioinnissa otetaan huomioon lainsäädännölliset sanktiot ja kapasiteetin vajaakäytöstä johtuvat kustannukset

Tavoitteet

- Kehitetään alkuperäistä mallia (Yu et al.) kuvaamaan erilaisia päästösääntelyn ratkaisuja
  - Erilaiset verotusmallit
  - Päästökauppa
- Analysoidaan mallin käyttäytymistä ja vertaillaan tuloksia esimerkkitapauksessa

Dynaamisen ohjelmoinnin malli (1/2)



- Tilamuuttuja x_k: saasteiden käsittelyn nykyinen kapasiteetti tilassa *k,* kertyneet kapasiteetin vajaakäytön kustannukset ja jäljellä oleva vuosibudjetti kullekin vuodelle
- Päätösmuuttuja u_k: lisättävä kapasiteetti tilassa *k* päästöjä käsittelevän projektin valmistuessa
- Tilayhtälö $x_{k+1} = f(x_k, u_k)$ määrittää seuraavan tilan
- Tilakustannus $g_k(x_k, u_k)$*:* kustannukset tilassa *k*

(Yu et al.)

Dynaamisen ohjelmoinnin malli (2/2)

- Bellmanin rekursioyhtälö (eteenpäin rekursoidessa), jossa J_k = arvofunktio tilassa k:

$$J_{k+1}(f(x_k, u_k)) = \min_{u_k \in U_k(x_k)} (g_k(x_k, u_k) + J_k(x_k))$$

- Arvofunktio löytää optimaalisen reitin saapua tilaan $x_{k+1} = f(x_k, u_k)$ löytämällä päätöksen $u_k^*(x_k)$, joka minimoi kustannukset tähän tilaan mennessä
- Tässä työssä malli on toteutettu Pythonilla

Kustannusfunktiot

- Projekti-investointien ajoitus suunnitellaan siten, että kokonaiskustannukset minimoituvat tutkitulla aikavälillä
- Kussakin tilassa syntyvät kustannukset määräytyvät kapasiteetin vajaakäytön ja päästösääntelyn kustannusten perusteella
- Kapasiteetin vajaakäytön kustannukset *LO* (Yu et al.):

$$LO_{kj} = \begin{cases} r \cdot w \cdot (s_{kj} - p_{kj}) \cdot (CP_j + PL'_{kj}) & \text{jos } s_{kj} - p_{kj} \geq 0 \\ 0 & \text{jos } s_{kj} - p_{kj} < 0 \end{cases}$$

r	diskonttauskorko
w	kapasiteetin vajaakäytön painokerroin
s_{kj}	saasteiden käsittelyn kapasiteetti saasteelle j vuonna k
p_{kj}	saasteen j päästöt vuonna k
CP_j	projektin j investointi kapasiteettiyksikköä kohden
PL'_{kj}	kapasiteetin vajaakäytön kustannukset ylimääräisen kapasiteetin yksikköä kohden aiemmilta vaiheilta

Päästösääntelyn kustannusfunktiot PN (1/2)

- Tasavero, (Yu et al.)

$$PN_{kj} = \begin{cases} (p_{kj} - s_{kj}) \cdot TR_k & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} \geq 0 \\ 0 & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} < 0 \end{cases}$$

- Päästökauppa

$$PN_{kj} = \begin{cases} -PO \cdot TR_k & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} \leq 0 \\ (p_{kj} - s_{kj} - PO) \cdot TR_k & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} > 0 \end{cases}$$

TR_k	veroaste / päästöoikeuksien markkinahinta
PO	ilmaiseksi jaetut päästöoikeudet

Päästösääntelyn kustannusfunktiot PN (2/2)

- Neliöllinen

$$PN_{kj} = \begin{cases} TR_k \cdot \left(\frac{p_{kj} - s_{kj}}{VA}\right)^2 & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} \geq 0 \\ 0 & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} < 0 \end{cases}$$

- Asteittainen

$$PN_{kj} = \begin{cases} 0 & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} < RA_1 \\ (p_{kj} - s_{kj} - RA_1) \cdot TR_k & \text{jos } RA_1 \leq p_{kj} - s_{kj} < RA_2 \\ (RA_2 - RA_1) \cdot TR_k + (p_{kj} - s_{kj} - RA_2) \cdot K \cdot TR_k & \text{jos } p_{kj} - s_{kj} \geq RA_2 \end{cases}$$

VA	päästöjen vertausarvo
RA_i	päästöraja
K	veroasteen kerroin

Tapaustutkimus

- Kiinalainen hiilikaivos (Yu et al.)
  - Suunnitteluaikaväli 2016-2021
  - Päästöt kasvavat, nykyinen käsittelykapasiteetti ei riitä
  - 5 erilaista saastetta, kunkin päästöjen vähentämiseksi investoidaan yhteen projektiin

- Päästösääntelyn kustannusfunktioiden kokonaiskustannukset normalisoidaan keskenään siten, että ne ovat yhtä suuret silloin kun kaivos ei toteuta projekteja päästöjen vähentämiseksi

Tulokset: alkuperäiset parametrit

- Optimaalinen ajoitus on sama päästösääntelystä riippumatta

Kustannus-funktio	P1	P2	P3	P4	P5	Kustannukset (milj. yuan)	Päästöt (milj. tonnia)
Tasavero	2019	2016	2018	2017	2016	44,37	12,32
Neliöllinen	2019	2016	2018	2017	2016	29,46	12,32
Asteittainen	2019	2016	2018	2017	2016	38,04	12,32
Päästökauppa	2019	2016	2018	2017	2016	22,17	12,32

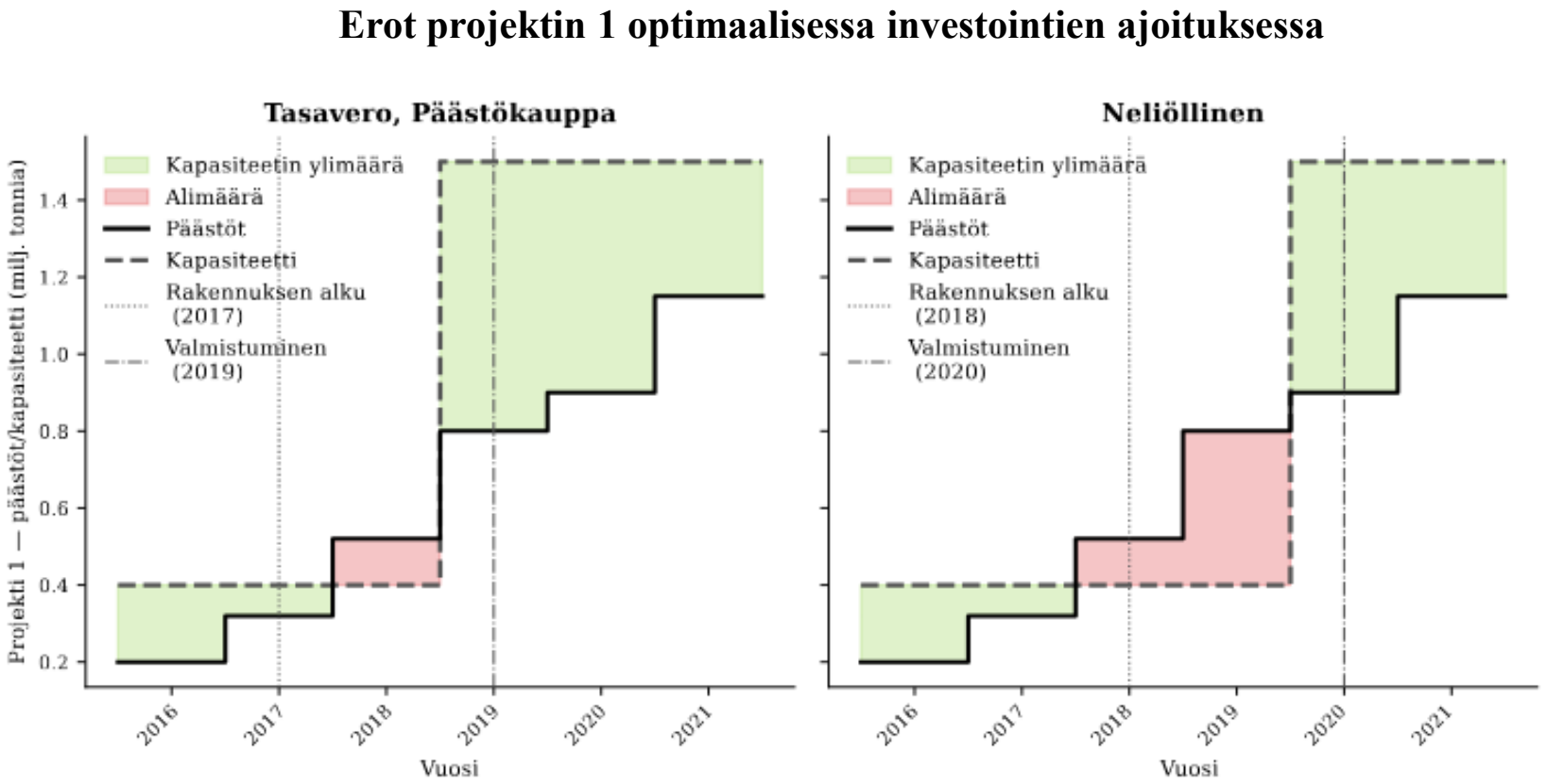
- Vuosibudjetti rajaa mahdolliset projektien ajoitusvaihtoehdot 900:sta vain 55:teen
- Kapasiteetin vajaakäytön kustannukset kokoluokaltaan hyvin pienet verrattuna päästösääntelyn kustannuksiin

Tulokset: muokatut parametrit

- Tasapainotetaan kahden eri kustannustyypin kokoluokkia kapasiteetin vajaakäytön painokertoimella *w*
- Kasvatetaan vuosibudjetin kokoa 13 milj. → 16 milj.
  - 363 mahdollista ajoitusvaihtoehtoa

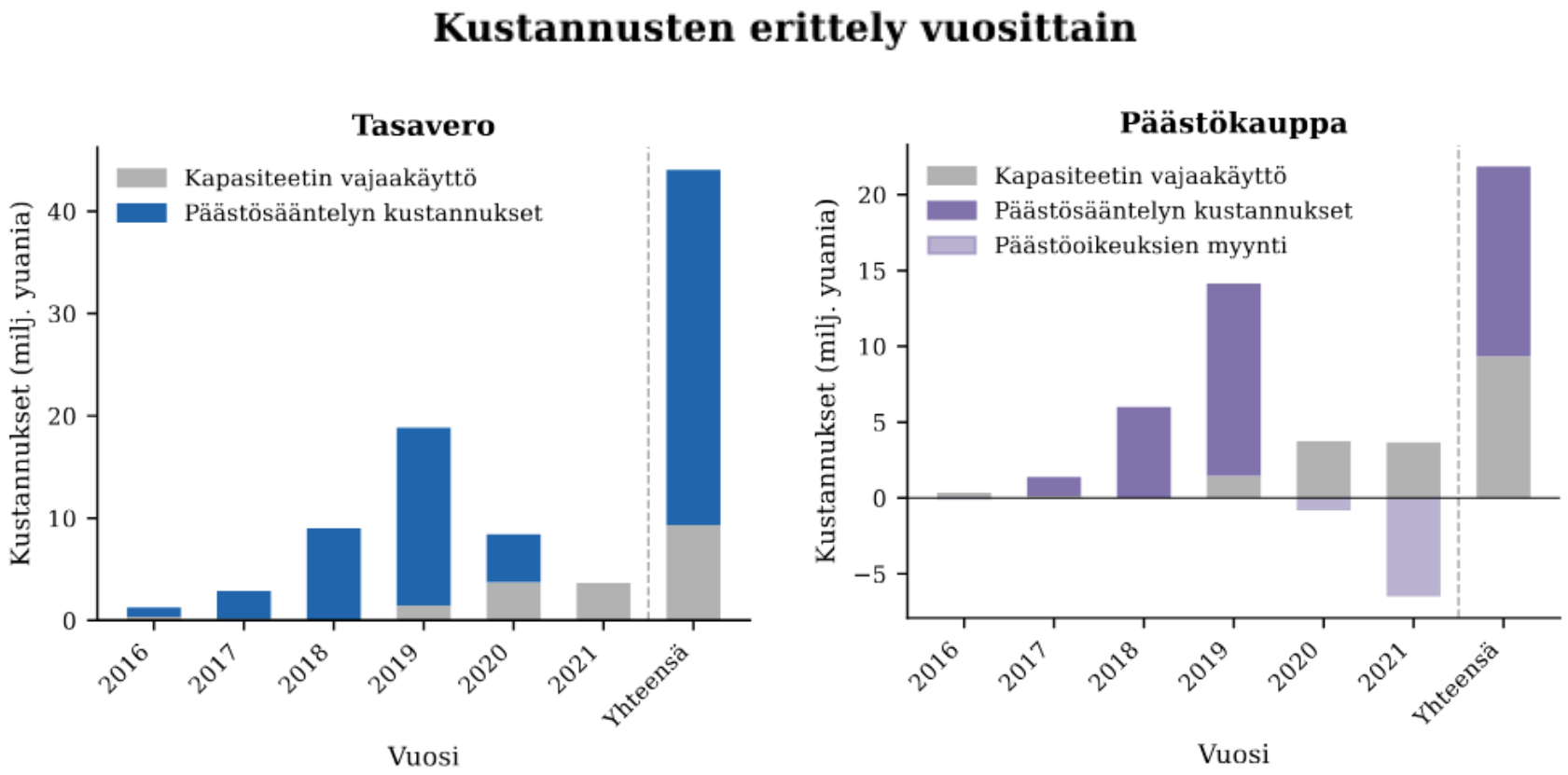
Kustannus-funktio	P1	P2	P3	P4	P5	Kustannukset (milj. yuan)	Päästöt (milj. tonnia)
Tasavero	2017	2016	2018	2017	2016	44,07	10,30
Neliöllinen	2018	2016	2018	2018	2016	33,54	11,05
Asteittainen	2018	2016	2018	2017	2016	41,59	10,70
Päästökauppa	2017	2016	2018	2017	2016	21,87	10,30

Tulokset: erot optimaalisessa ajoituksessa



- Konveksien kustannusfunktioiden tapauksessa projektien viivästyttäminen optimaalista kasvavista päästöistä huolimatta

Tulokset: kustannukset eri vaiheissa



- Suurin kvalitatiivinen ero päästökaupassa, jossa päästöoikeuksien myynti mahdollistuu projektien valmistuttua

Yhteenveto

- Kyseessä on yksi tapaustutkimus, jonka tuloksia ei voi yleistää laajemmin
- Mallin oletukset ja rakenteelliset tekijät kuitenkin ohjaavat päästösääntelyn vaikutuksia
  - Kapasiteetin vajaakäytön merkitys ja diskonttauskorko
  - Konveksien päästösääntelyn funktioiden normalisointi
- Mallin mahdollista jatkokehitystä
  - Stokastisuus, erityisesti päästökaupan mallinnuksessa
  - Useamman samaa saastetta käsittelevän hankkeen vertailu

Viitteet

- S. Yu, S. Gao, ja H. Sun (2016). A dynamic programming model for environmental investment decision-making in coal mining. Applied Energy. 166, 273-281.
- R. Bellman (1954). The theory of dynamic programming. Bulletin of the American Mathematical Society. 60, No. 6, 503–515.