

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Portfoliomalli turpeenoton optimointiin

Kandidaatintyö
7.12.2012

Joonas Ollila

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

AALTO-YLIOPISTO PERUSTIETEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		KANDIDAATINTYÖN TIIVISTELMÄ
Tekijä: Joonas Ollila		
Työn nimi: Portfoliomalli turpeenoton optimointiin		
Tutkinto-ohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma		
Pääaine: Systemianalyysi	Pääaineen koodi: F3010	
Vastuopettaja(t): Raimo P. Hämäläinen		
Ohjaaja(t): Juuso Liesiö		
<p>Tiivistelmä: Tässä työssä kehitetään portfoliomalli turvetuotannon optimointiin. Mallin tavoitteena on minimoida turpeentuotannosta aiheutuvaa vesistöhaittariskiä tuotantovaatimukset huomioiden. Vesistöhaittariski koostuu kahdesta pääkriteeristä, vesistön <i>arvosta</i> ja <i>herkkydestä</i>. Näiden pääkriteerien keskinäiseen tärkeyteen ei oteta kantaa, vaan annetaan niiden painoarvojen vaihdella vapaasti. Jokaiselle turvemäärälle identifioidaan tehokkaat portfoliot ja tutkitaan kunkin suon kohdalla esiintyykö se kaikissa tehokkaissa portfoliossa (ydinprojekti), osassa niistä (rajaprojekti) vai ei yhdessäkään (ulkoprojekti).</p> <p>Työ pohjautuu Suomen Ympäristökeskuksen SYKEN vuonna 2011 laatiman raportin arviointiaineistoon. SYKEN raportissa tarkastellaan 206:ta Keski-Suomessa sijaitsevaa suota, jotka listataan suhteellisen vesistöhaittariskin perusteella. Listausta perustuu usean eri tahon mielipiteisiin vesistöhaittariskin koostumuksesta. SYKEN raportti ei vastaa kysymykseen mistä turvetta tulisi ottaa kun turvemäärälle on jokin tuotantovaatimus.</p> <p>Portfoliomallin antamat tulokset ovat samansuuntaisia SYKEN tulosten kanssa, merkittävimmät erot aiheutuvat soiden erisuurista turvemääristä. Portfoliomalli välttää pienten soiden valitsemista malliin, sillä pääkriteerien arvo ei ole riippuvainen turpeen määrästä suolla. Tällöin suurempien soiden valinnalla saadaan enemmän turvetta samalla vesistöhaittariskin kasvulla. Asiaan puututtiin asettamalla vesistön herkkyys suoraan riippuvaiseksi turvemäärästä, jolloin tulokset ovat enemmän SYKEN tulosten kaltaisia.</p>		
Päivämäärä: 23.11.2012	Kieli: suomi	Sivumäärä: 30
Avainsanat: RPM, portfoliomalli, ydinluku, suo, turvetuotanto, päätöksenteko, alataso,		

Sisältö

1	Johdanto	1
2	SYKE:n menetelmä turpeenoton vesistövaikutusriskien arviointiin	3
2.1	Tarkasteltavat suot	7
2.2	SYKE:n arvioinnin kokonaistulos	8
3	Portfoliomalli turpeenoton vesistöhaittariskin määrittämiseen	9
3.1	Epätäydellinen informaatio ja tehokkaat portfoliot	10
3.2	Soiden ydinluvut	12
4	Portfoliomallin soveltaminen Keski-Suomen suoainestoon	13
4.1	Turpeenoton jakautuminen valuma-alueille	16
4.2	Vesistön herkkyyden alatasen valinta	20
4.3	Herkkyyden riippuvuus turvemäärästä	23
5	Yhteenveto	27

1 Johdanto

Turpeeksi kutsutaan eloperäistä maa-ainesta, joka syntyy kasvi-materiaalin maatuessa epätäydellisesti. Turvetta voidaan ottaa suoalueilta ja käyttää energiantuotantoon. Suomen energiantuotannossa turpeella on kohtalaisen suuri merkitys, sillä 2000-luvulla turpeella on katettu 5-7 % vuotuisesta energiantarpeesta (Tilastokeskus 2011). Turpeenotolla on vaikutuksia ympäristöön ja iso osa näistä ympäristövaikutuksista kohdistuu vesistöihin. Tuotantoalueiden lähijärvissä kuormitus voi aiheuttaa merkittävää haittaa vesiekosysteemille, vesien virkistyskäytölle ja kalastukselle (Mickwitz ja Rekolainen 2012). Joskus vesistö kuitenkin on jo kuormittunut muista syistä tai on luonnostaan sameampi. Tällöin turpeenoton vaikutus vesistön tilaan jää pienemmäksi kuin kirkasvetisen ja luonnontilaisen vesistön ollessa kyseessä.

Suomen ympäristökeskus (SYKE) on tehnyt arvioinnin vesistövaikutusriskeistä Keski-Suomessa (Marttunen ja muut 2011), jossa turpeenoton odotetaan lisääntyvän lähivuosina jopa kaksinkertaiseksi. SYKEN arviointimenetelmä ottaa huomioon eri intressiryhmien eriävät mielipiteet ja tarjoaa läpinäkyvän menetelmän niiden arviointiin ja kommunikointiin (katso esim. Mustajoki ja muut 2004, Hämäläinen ja muut 2001), mikä edistää yhteisen ratkaisun löytämistä. Menetelmässä rakennetaan arvopuu vesistöille aiheutuvien suhteellisten haittariskien arvioimiseksi. Haittariski koostuu vesistön arvosta ja herkkyydestä; mitä arvokkaampi ja mitä herkempi vesistö, sitä suurempi haittariski. Vesistön arvoa ja herkkyyttä arvioidaan useilla kriteereillä. SYKEN raportti yhdistää tulokset ja asettaa suot suhteellisten haittariskien mukaiseen järjestykseen. Arviointimenetelmä ei kuitenkaan ota huomioon todellisen turvetuotannon toteutumisen laajuutta.

Tässä työssä kehitetään portfoliomalli, jonka avulla minimoidaan turpeenottoon valittavan suo yhdistelmän (portfolio) vesistöhait-

tariskii eri tuotantovaatimusten vallitessa. Portfoliomallissa ei tarvitse ottaa kantaa vesistön arvoa ja herkkyyttä kuvaavien pääkriteerien suhteellisen tärkeyteen, sillä viime aikoina kehitettyjen menetelmien (Liesiö ja muut 2008, Salo ja muut 2011) avulla mallissa tunnistetaan kaikki tehokkaat portfoliot eri tuotantovaatimuksille pääkriteerien painoarvojen vaihdellessa. Suot jaetaan ydin-, raja- ja ulkoprojekteihin jokaisen tuotantovaatimuksen kohdalla. Ydinprojektit ovat perusteltuja valintoja turvetuotantoon, sillä ne tulevat valituksi kaikilla painokertoimien arvoilla. Ulkoprojektit toisaalta tulisi jättää tuotannon ulkopuolelle, koska ne eivät tule valituksi millään painokertoimilla. Jatkoanalyysit voidaan siten kohdistaa rajaprojekteihin, joita oli enimmillään 33% aineistosta (69 kpl), tämä rajaa tehtävää huomattavasti.

Kappaleessa 2 tutustutaan SYKEN kehittämään turpeenoton vesistövaikutusriskien arviointimalliin. Kappaleessa 3 kuvaillaan portfoliomallia, joka ottaa huomioon tuotantovaatimukset ja vastaa siis kysymykseen mistä soista turve tulisi ottaa. Kappaleessa 4 sovelletaan portfoliomallia Keski-Suomen suoaineistoon, analysoidaan tuloksia sekä niiden eroja SYKEN arviointimallin tuloksiin. Lisäksi tutkitaan miten tulokset muuttuvat, jos kokonaisriskin kuvaavaa arvofunktiota muutetaan. Kappaleessa 5 todetaan portfoliomallin edut ja rajoitukset sekä pohditaan mallin jatkokehitysmahdollisuuksia.

2 SYKEN menetelmä turpeenoton vesistövaikutusriskien arviointiin

SYKEN menetelmässä turpeenoton vesistöhaittariskiä mallinnettiin arvopuun avulla (kuva 1). Pääkriteerit ovat *vesistön arvo* ja *vesistön herkkyys*. *Vesistön arvo* koostuu virkistyksellisestä, matkailullisesta ja kalataloudellisesta arvosta sekä suojeluarvoista. *Vesistön herkkyys* vuorostaan koostuu veden väristä, vesipolitiikan puitteidirektiivin mukaisesta kuormitusalenemataavoitteesta (Euroopan komissio 2010) ja muusta kuormituksesta. Nämä seitsemän kriteeriä puolestaan jakautuvat yhteensä 13 alatasen kriteeriin.

Jokaisesta suosta tiedetään alakriteerien mittaustulokset (13 kpl, kts. taulukot 1 ja 2), jolloin suota j kuvaa mallissa vektori $x^j = (x_1^j, \dots, x_{13}^j)^T$. Pienimmän vesistöhaittariskin lisäyksen aiheuttavaa mitta-asteikon arvoa merkitään \underline{x} ja suurimman lisäyksen aiheuttavaa \bar{x} . Näinollen turpeenotto suolta aiheuttaa vähiten vesistöhaittariskiä, jos suon mittaustulokset ovat $x = (\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_{13})^T$. Vastaavasti jos suon mittaustulokset ovat $x = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_{13})^T$ niin turpeen ottaminen suolta aiheuttaa suurimman mahdollisen vesistöhaittariskin. Alakriteerien mittaustulokset kuvataan välille $[0,1]$ arvofunktion v_i avulla siten, että vähiten arvokaalle mittaustulokselle $v_i(\underline{x}_i) = 0$ ja arvokkaimmalle mittaustulokselle $v_i(\bar{x}_i) = 1$. Kullekin alakriteerille määritellään painokerroin w_i , joka kuvaa alakriteerin vaikutusta kokonaisvesistöhaittariskiin mittaustuloksen noustessa tasolta \underline{x}_i tasolle \bar{x}_i (tasot \underline{x}_i ja \bar{x}_i löytyvät taulukoista 1 ja 2).

Kunkin kriteerin $k \in \{1, \dots, 7\}$ alla olevien alatason kriteerien $i \in I_k$ painot w_i normeerataan siten, että ne summautuvat yhdeksi. Tässä $I_k \subset \{1, \dots, 13\}$. Tällöin suon j arvo kriteerin k suhteen saadaan summana

$$V_k(x^j) = \sum_{i \in I_k} w_i v_i(x_i^j).$$

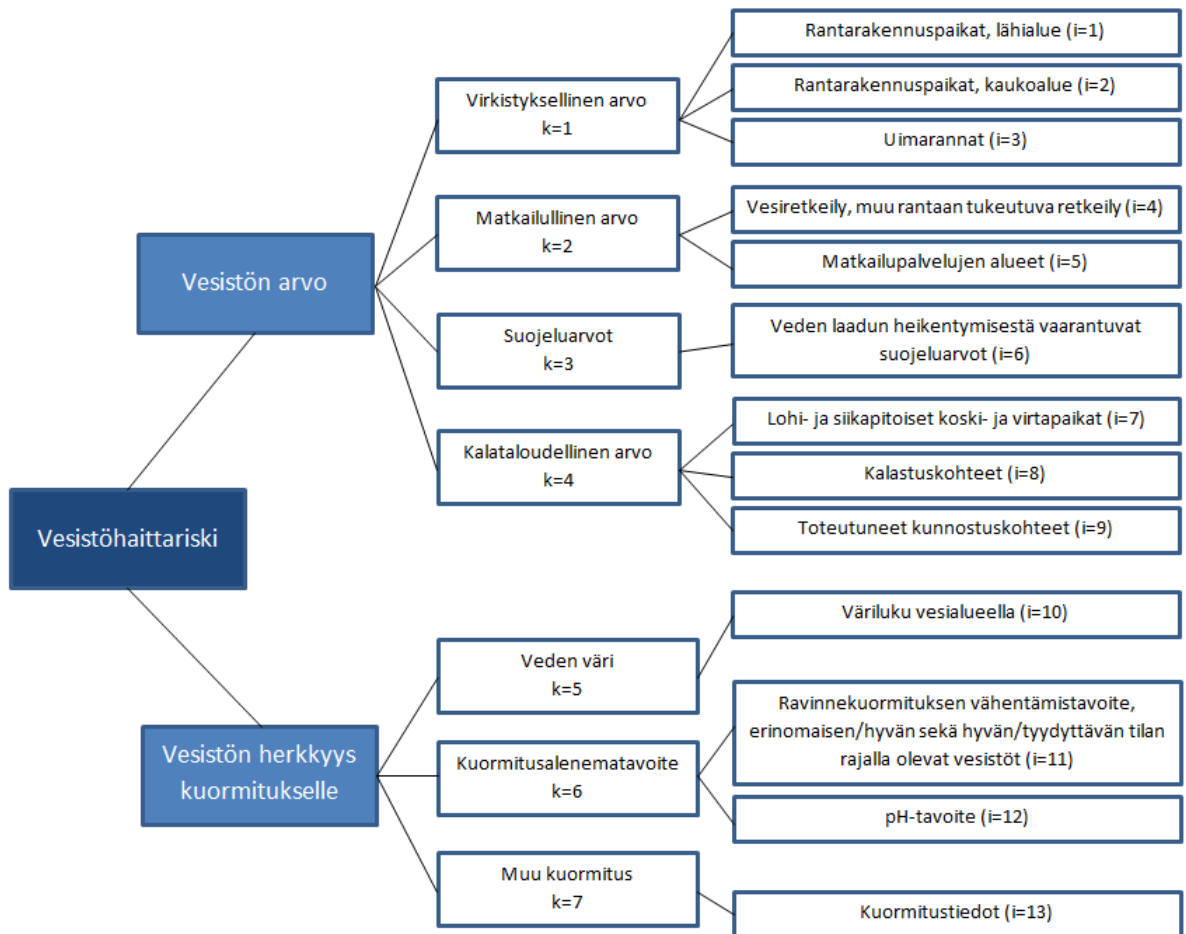
Keskitason kriteerien painokertoimet W_1, \dots, W_7 puolestaan kuvaavat vesistöhaittariskin nousua kun kyseisen kriteerin kaikkien alakriteerien I_k mittaustulokset nousevat tasolta \underline{x}_i tasolle \bar{x}_i ($i \in I_k$). Molempien pääkriteerien alla olevat painokertoimet W_k normeerataan siten, että ne summautuvat yhdeksi. Tällöin vesistön arvo -pääkriteerin pistemäärä saadaan laskemalla sen kriteerien ($k = 1, 2, 3, 4$) painotettu summa

$$V_A(x) = \sum_{k=1}^4 W_k V_k(x).$$

Vastaavasti vesistön herkkyys -pääkriteerin pistemäärä saadaan laskemalla sen kriteerien ($k = 5, 6, 7$) painotettu summa

$$V_H(x) = \sum_{k=5}^7 W_k V_k(x).$$

Additiivista arvofunktiota käytettäessä kokonaisuus saadaan kriteerien painotettuna summana, jossa painot kuvaavat kriteerien keskinäistä tärkeyttä. Additiivisen arvofunktion teoreettisia perusteita ovat määritelleet mm. Dyer ja Sarin (1979). Additiivista mallia ei tulisi käyttää jos kriteerit eivät ole keskenään preferenssiriippumattomia. Esimerkiksi jos veden värin halutaan olevan kirkas kuormituksen ollessa alhainen, mutta muutoin veden värin halutaan olevan samea, eivät preferenssiriippumattomuuden oletukset täyty.



Kuva 1: Vesistöhaittariskin koostumus

Taulukko 1: Vesistön arvon kriteerit, alakriteerit ja alakriteerien mitta-asteikot.

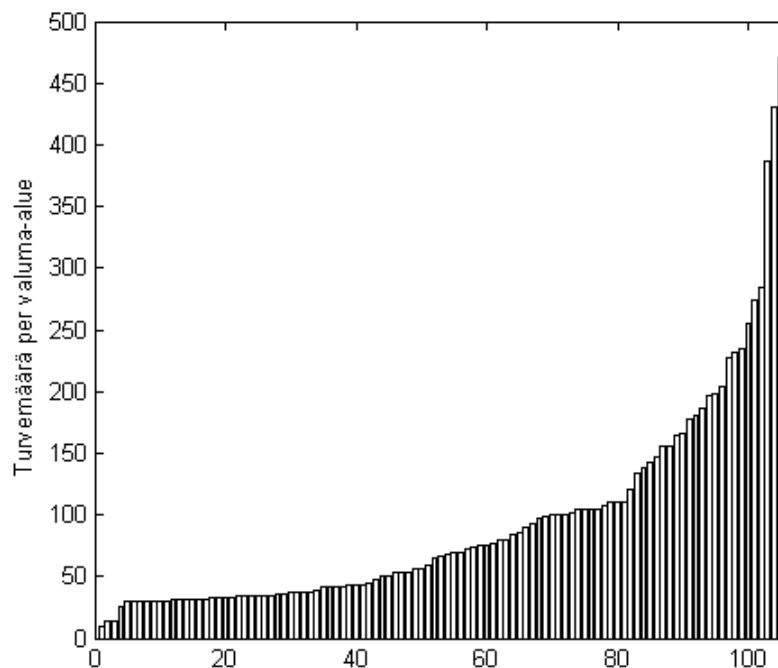
Kriteeri	Alakriteeri	Mitta-asteikko	x_i	\bar{x}_i
Virkistykseellinen arvo ($k = 1$)	Rantarakennuspaikat, lähialue ($i = 1$)	Lukumäärä $x_1 \in \{0, \dots, 254\}$	0	254
	Rantarakennuspaikat, kaukoalue ($i = 2$)	Lukumäärä $x_2 \in \{0, \dots, 171\}$	0	171
	Uimarannat ($i = 3$)	$x_3 = 0$: ei uimarantoja $x_3 = 1$: vähintään yksi uimaranta kaukoalueella $x_3 = 2$: vähintään yksi uimaranta lähialueella	0	2
Matkailullinen arvo ($k = 2$)	Vesiretkeily, muu rantaan tuettava retkeily ($i = 4$)	$x_4 = 0$: ei ole $x_4 = 1$: vähäistä $x_4 = 2$: vähäistä merkittävämpää	0	2
	Matkailupalvelut alueella ($i = 5$)	$x_5 = 0$: ei ole $x_5 = 1$: vähäisiä palveluja $x_5 = 2$: vähäistä merkittävämpiä palveluja	0	2
Suojeluarvot ($k = 3$)	Veden laadun heikentymisestä vaarantuvat suojeluarvot ($i = 6$)	$x_6 = 0$: ei ole $x_6 = 1$: muu kuin Natura kaukoalueella $x_6 = 2$: muu kuin Natura lähialueella $x_6 = 3$: Natura kaukoalueella $x_6 = 4$: Natura lähialueella	0	4
Kalataloudellinen arvo ($k = 4$)	Lohi- ja siikapitoiset koski- ja virtapaikat ($i = 7$)	$x_7 = 0$: ei $x_7 = 1$: kyllä	0	1
	Kalastuskohteet ($i = 8$)	$x_8 = 0$: ei $x_8 = 1$: kyllä	0	1
	Toteutuneet kunnostuskohteet ($i = 9$)	$x_9 = 0$: ei, eikä kunnostusaikeita $x_9 = 1$: tavoite kunnostaa $x_9 = 2$: hanke vireillä $x_9 = 3$: kunnostettu	0	3

Taulukko 2: Vesistön herkkyuden kriteerit, alakriteerit ja alakriteerien mitta-asteikot.

Kriteeri	Alakriteeri	Mitta-asteikko	x_i	\bar{x}_i
Veden väri ($k = 5$)	Väri-luku vesialueella ($i = 10$)	Väri-luku $x_{10} \in [21.7, 262.1]$	262.1	21.7
Kuormitus-alenemataavoite ($k = 6$)	Ravinnekuormituksen vähentämistavoite, erinomaisen/hyvän sekä hyvän/tydyttävän tilan rajalla olevat vesistöt ($i = 11$)	$x_{11} = 0$: ei vähentämistavoitetta ja vesistö ei ole kahden tilan rajalla $x_{11} = 0.75$: ei vähentämistavoitetta, mutta vesistö on kahden tilan rajalla $x_{11} = 1$: vähentämistavoite	0	1
	pH-tavoite ($i = 12$)	$x_{12} = 0$: pH normaali $x_{12} = 1$: havaittu alhainen pH	0	1
Muu kuormitus ($k = 7$)	Kuormitustiedot ($i = 13$)	Fosforimäärä $x_{11} \in [1.1, 20.5]$	1.1	20.5

2.1 Tarkasteltavat suot

Tarkastelun kohteena on 206 suota Keski-Suomen maakunnassa. Aineisto ei kata kaikkia Keski-Suomen soita, sillä osa on poistettu tarkastelusta mm. koska ne eivät sovellu turvetuotantoon teknis-taloudellisten syiden vuoksi tai ne ovat tärkeitä lintualueita (katso Marttunen ja muut 2011, sivu 3). Tarkasteltavilla soilla on vähintään 1.5 metrin paksuista turvekerrosta yhteensä 9818.4 hehtaaria (ha). Yksittäisen suon koko vaihtelee välillä 5–178 ha. Jokaiselle suolle on määritetty valuma-alue, joita on yhteensä 105. Usealla suolla voi siis olla yhteinen valuma-alue ja enimmillään kymmennellä suolla on yhteinen valuma-alue. Tässä työssä tarkastellaan 3. jakovaiheen valuma-alueita (kts. Marttunen ja muut 2011, s. 28). Valuma-alueiden yhteydessä olevat turvemäärät vaihtelevat paljon, pienimmillään yhden valuma-alueen turvemäärä on 7 ha ja suurimmillaan 450 ha (kts. kuva 2).



Kuva 2: Turvemäärä per valuma-alue.

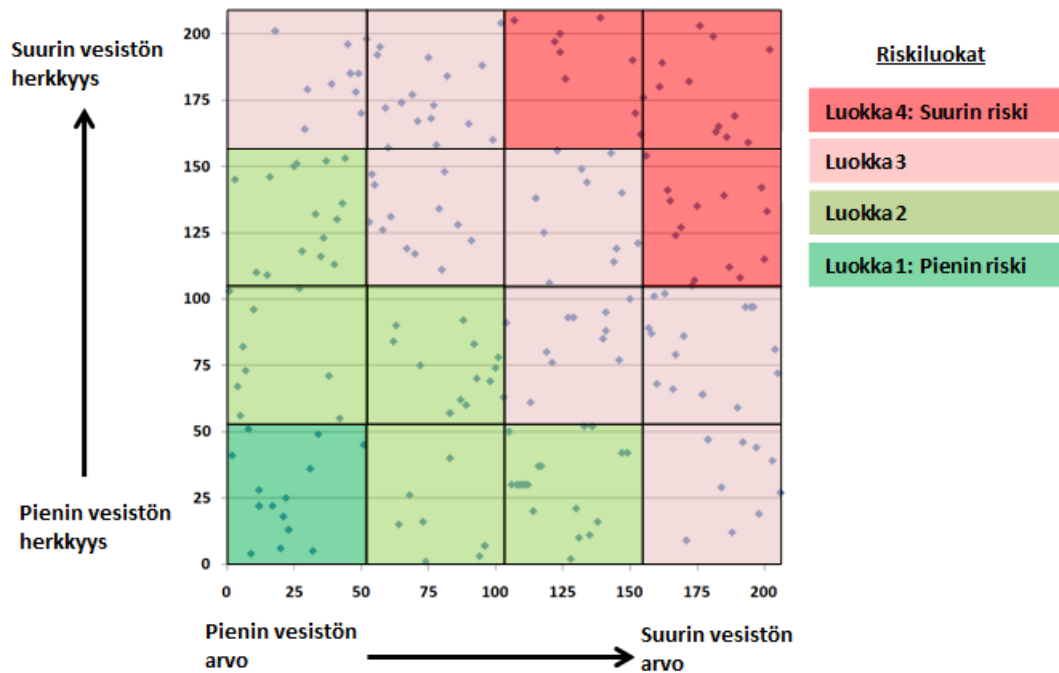
2.2 SYKE:n arvioinnin kokonaistulos

SYKE:n raportissa suot asetetaan eri vastaajien mieltymykset huomioonottaen suhteellisen vesistöhaittariskin mukaiseen järjestykseen. Vesistöhaittariskin arviointiin osallistui 9 vastaajaa eri intressiryhmistä (mm. VAPO, ELY-keskus ja Keski-Suomen maakuntaliitto). Vastaajat antoivat oman arvionsa W_k eri kriteerien tärkeydestä. Jokaisen vastaajan kohdalla suot asetettiin niiden molempien pääkriteerien saamien arvojen mukaiseen järjestykseen. Näiden kahden paremmuusjärjestyksen perusteella suot jaettiin molempien pääkriteerien kohdalla neljään kategoriaan:

1. Pienin riski - Suot, joiden pääkriteerin arvo on suuruusjärjestyksessä pienimmästä suurimpaan välillä 1-52
2. Suot, joiden pääkriteerin arvo on suuruusjärjestyksessä pienimmästä suurimpaan välillä 53-103
3. Suot, joiden pääkriteerin arvo on suuruusjärjestyksessä pienimmästä suurimpaan välillä 104-154
4. Suurin riski - Suot, joiden pääkriteerin arvo on suuruusjärjestyksessä pienimmästä suurimpaan välillä 155-206

Näiden kategorioiden 16 yhdistelmää jaettiin neljään eri riskiluokkaan, pienimmästä riskistä (luokka 1) suurimpaan riskiin (luokka 4), tarkempi selvitys jaosta kuvassa 3.

Lopuksi suot listattiin niiden saaman huonoimman luokka-arvion perusteella (Marttunen ja muut 2011, s. 24-27). Saatiin siis kaikkien vastaajien preferenssit huomioiva lista, jossa ylimpänä olivat parhaat luokka-arviot saaneet suot (pienin vesistöhaittariski suhteessa muihin tarkasteltuihin soihin) ja alimpana suurimman vesistöhaittariskin suot.



Kuva 3: Soiden jako eri riskiluokkiin. (Marttunen ja muut 2011, s. 15)

3 Portfoliomalli turpeenoton vesistöhaittariskin minimointiin

SYKEN malli ei anna vastausta kysymykseen, mitkä suot tulisi käyttää turvetuotantoon kun turvetta tarvitaan määrä T . Tätä varten tässä työssä kehitetään portfoliomalli, joka ottaa tuotantovaatimukset huomioon. Merkitään kaikkien soiden joukkoa $X = \{x^1, \dots, x^m\}$, missä m on soiden lukumäärä. Portfolio $p \subseteq X$ on jokin osajoukko soista. Täten kaikkien mahdollisten portfolioiden joukko on potenssijoukko $P = 2^X$. Esimerkiksi tässä työssä käytettävässä Keski-Suomen aineistossa erilaisia portfolioita on siis $2^{206} \approx 10^{62}$ kpl.

Portfolion p sisältämien soiden vesistöjen arvoa mallinnetaan yksittäisten soiden vesistöjen arvojen summana

$$V_A(p) = \sum_{x^j \in p} V_A(x^j)$$

ja sen sisältämien vesistöjen herkkyyttä puolestaan yksittäisten soiden vesistöjen herkkyyksien summana

$$V_H(p) = \sum_{x^j \in p} V_H(x^j).$$

Portfolion vesistöhaittariskillä tarkoitetaan sitä mahdollista haittaa, joka aiheutuu portfolioon kuuluvien soiden turvetuotannosta. Portfolion vesistöhaittariski kasvaa mitä herkempiä tai arvokkaampia portfolioon kuuluvien soiden vesistöt ovat. Näin ollen, portfolion p sisältämien soiden vesistöhaittariski on painotettu summa

$$V(p) = W_A V_A(p) + W_H V_H(p). \quad (1)$$

Tavoitteena on siis valita portfolio $p \in P$, joka sisältää turveta vähintään T hehtaaria, mutta aiheuttaa pienimmän mahdollisen vesistöhaittariskin (1). Tämä portfolio voidaan ratkaista optimointitehtävästä

$$\begin{aligned} \min_p V(p) \\ p \in P(T), \end{aligned} \quad (2)$$

missä $P(T)$ on niiden portfolioiden joukko jotka sisältävät turveta vähintään määrän T .

3.1 Epätäydellinen informaatio ja tehokkaat portfoliot

Painokertoimien W_A ja W_H tarkka määrittäminen yhtälössä (1) voi olla vaikeaa, koska tällöin täytyy ottaa kantaa kumpi on tärkeämpää (ja kuinka paljon tärkeämpää) vesistöhaittariskin kannalta, vesistön arvo vai vesistön herkkyyys. Tässä työssä tehtävä

ratkaistaan ottamatta kantaa arvon ja herkkyyden suhteelliseen tärkeyteen. Tämä mallinnetaan olettamalla painokertoimien olevan ei-negatiivisia ja summautuvan yhteen. Näin ollen on tarkoituksenmukaista tutkia mitä tehtävän (2) ratkaisusta voidaan päätellä, jos painokertoimet voivat saada mitä tahansa arvoja joukossa

$$S_W = \{(W_A, W_H)^T \in \mathbb{R}_+^2 | W_A + W_H = 1\}. \quad (3)$$

Tällöin portfolion vesistöhaittariski $V(p)$ ei ole yksikäsitteinen numero, vaan riippuu siitä mitä painokertoimia W_A ja W_H käytetään. Voidaan kuitenkin identifoida portfolioita p , joilla on aina pienempi tai korkeintaan yhtä suuri vesistöhaittariski kuin portfolioilla p' . Portfolioita p' kutsutaan dominoiksi portfolioiksi.

Määritelmä 1 *Portfolio p dominoi portfolioita p' mikäli*

$$\begin{aligned} V(p) &\leq V(p') \quad \forall (W_A, W_H) \in S_W \\ V(p) &< V(p') \quad \text{jollain } (W_A, W_H) \in S_W \end{aligned} \quad (4)$$

Merkitään $p \succ_{S_W} p'$.

Dominoitua portfolioita p' ei ole syytä valita, sillä tällöin löytyy vaihtoehto p , jolla on pienempi tai yhtä suuri vesistöhaittariski kaikilla painokertoimien arvoilla (Liesjö ja muut 2007). Näin ollen dominoitut portfolioit voidaan poistaa tarkasteltavien portfolioiden joukosta ja voidaan keskittyä tarkastelemaan ei-dominoitujen eli *tehokkaiden portfolioiden* joukkoa

$$P_N(S_W, T) = \{p \in P(T) | \nexists p' \in P(T) \text{ s.e. } p' \succ_{S_W} p\} \quad (5)$$

Tehokkaiden portfolioiden joukko (5) ratkaistaan RPM-Decisions-ohjelmistolla maksimoimalla portfolion turvemäärää samanaikaisesti minimoiden portfolion vesistöjen arvoa ja herkkyyttä. Määritellään päätösmuuttujat $z_j, j = 1, \dots, 206$, jotka saavat arvon $z_j = 1$ jos suo j kuuluu portfolioon ja arvon $z_j = 0$ jos suo j ei kuulu portfolioon. Tehokkaiden portfolioiden joukko saadaan

ratkaisemalla tehtävä

$$\begin{aligned} \min_{z_j \in \{0,1\}} \sum_{j=1}^{206} z_j (W_A V_A(x^j) + W_H V_H(x^j)) \\ \sum_{j=1}^{206} z_j T_j \geq T \end{aligned} \quad (6)$$

useilla eri painokerroinyhdistelmillä $W_A, W_H \in S_W$ ja tuotanto-vaatimuksilla $T \in [0, \sum T_j]$.

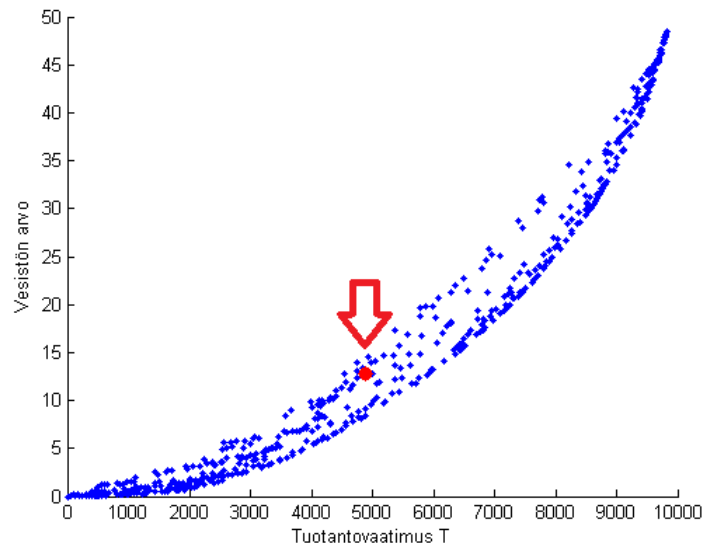
3.2 Soiden ydinluvut

Tehokkaita portfolioita on lukuisia ja toisaalta päätöksentekijää kiinnostaa mitä malli pystyy kertomaan yksittäisestä suosta. Yksittäisille soille määritellään ydinluku (Core Index, CI, Liesiö ja muut 2007), joka kertoo kuinka suureen osaan tehokkaista portfolioista suo kuuluu. Suon x^j ydinluku on

$$CI(x^j, S_W, T) = \frac{|\{p \in P_N(S_W, T) | x^j \in p\}|}{|P_N(S_W, T)|},$$

missä $|\{\cdot\}|$ tarkoittaa portfolioiden määrää joukossa $\{\cdot\}$. Suo, jonka ydinluku on 1 kuuluu kaikkiin tehokkaisiin portfolioihin ja tulee siis valituksi kaikilla painoyhdistelmillä W_A ja W_H . Tällaista suota kutsutaan *ydinprojektiksi* (Liesiö ja muut 2007). Vastaavasti ydinluvun 0 suo ei kuulu mihinkään tehokkaaseen portfolioon p , kutsutaan sitä *ulkoprojektiksi*. Suot, joiden ydinluku on välillä $(0,1)$, ovat *rajaprojekteja*.

Liesiö ja muut (2007) ovat osoittaneet, että ydin- ja ulkoprojektien tila ei muutu vaikka painokertoimien W_A ja W_H arvoja rajoitettaisiin. Lisärajoitus voi olla esimerkiksi vaatimus $W_A \geq W_H$.

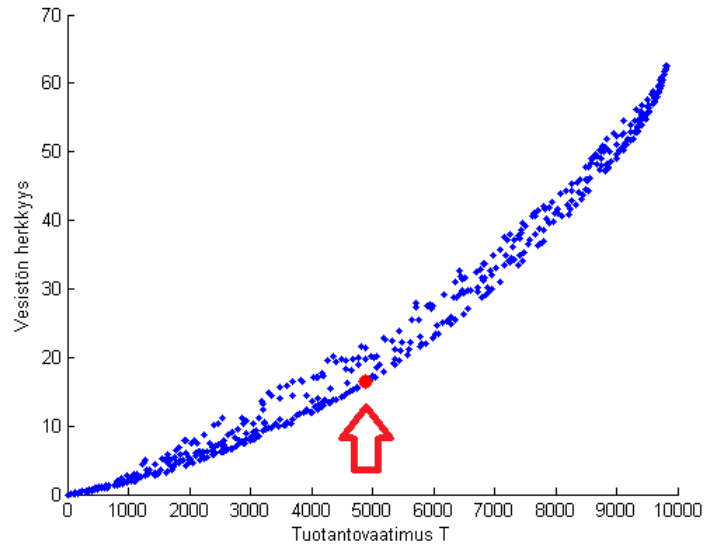


Kuva 4: Tehokkaat portfoliot (505 kpl): Pystyakselilla portfolion sisältämien soiden yhteenlaskettu vesistön arvo ja vaaka-akselilla yhteenlaskettu turvemäärä.

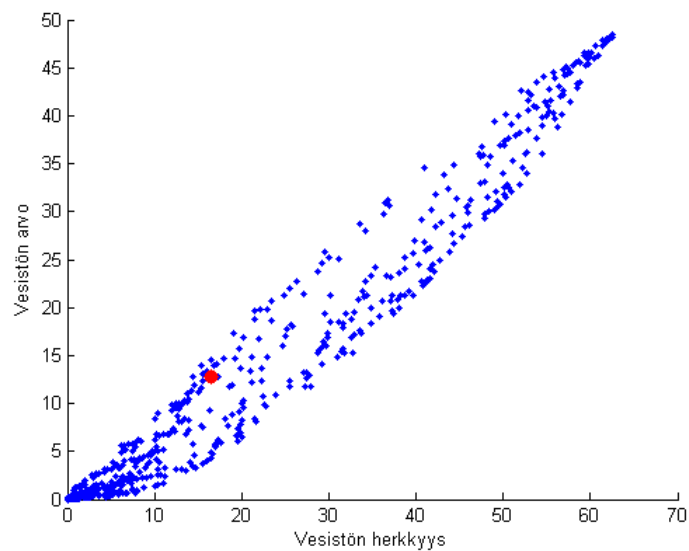
4 Portfoliomallin soveltaminen Keski-Suomen suoaineistoon

Portfoliomallia sovellettiin Keski-Suomen suoaineistoon. Tulokseksi saatiin 505 tehokasta portfolioita. Portfolion sisältämien soiden yhteenlaskettu vesistöarvo turvemäärän suhteen kaikille tehokkaille portfolioille on havainnollistettu kuvassa 4. Kuvasta havaitaan, että punaisella merkitylle portfolioille löytyy parempi vaihtoehto – on olemassa portfolioita, jotka ovat vesistön arvon suhteen parempia ja sisältävät yhtä paljon turvetta. Punaisella merkitty portfolio on kuitenkin tehokas, sillä vesistön herkkyyden suhteen samalle turvemäärälle ei löydy parempaa portfolioa (kts. kuva 5). Kuvasta 6 havaitaan minkälaisia vesistön arvo ja herkkyys-yhdistelmiä portfoliojoukosta löytyy.

Jokaisen tuotantovaatimuksen T kohdalla laskettiin soiden ydinluvut (kts. kappaleet 3.1 ja 3.2). Kuvista 7 ja 8 ilmenee kunkin



Kuva 5: Tehokkaat portfoliot (505 kpl): Pystyakselilla portfolion sisältämien yhteenlaskettu vesistön herkkyys ja vaaka-akselilla yhteenlaskettu turvemäärä.



Kuva 6: Tehokkaat portfoliot (505 kpl): Pystyakselilla portfolion sisältämien soiden yhteenlaskettu vesistön arvo ja vaaka-akselilla yhteenlaskettu vesistön herkkyys.

suon ydinluku $CI(x^j, S_W, T)$ turvemäärän T funktiona. Jokaisesta suota vastaa vaakasuora palkki, jonka väri kertoo ydinluvun eri turvemäärille - mitä tummempi väri, sitä suurempi ydinluku. Mitä pidemmälle oikealle kuvassa siirrytään, sitä suurempi on vaadittu turvemäärä T , luonnollisesti myös ydinprojektien määrä kasvaa oikealle mentäessä. Suot ovat järjestettynä SYKE:n raportin mukaisessa järjestyksessä huonoimman luokka-arvion perusteella (kts. kuva 3), korkeimpana suo jolla on raportin mukaan pienin vesistöhaittariski suhteessa muihin soihin.

Kuvista 7 ja 8 havaitaan, että suot joilla on SYKE-raportin mukaan pieni vesistöhaittariski ovat myös useammilla turvemäärillä mukana tehokkaissa portfolioissa. Tämä vastaavuus ei kuitenkaan ole täydellistä: Kuvan 7 kolme punaisella ympäröityä suota Hietikonneva, Iso Kelloneva ja Sarvineva ovat kaikki ulkoprojekteja tuotantovaatimukseen $T = 8500$ ha asti vaikka ovat SYKE-listauksessa verrattain korkealla. Näille soille yhteistä on pieni koko: Hietikonneva on koko aineiston pienin suo, sillä on turvetta vain 5 hehtaaria, Iso Kelloneva on kolmanneksi pienin 10.5 hehtaarilla ja Sarvineva kuudenneksi pienin 13.5 hehtaarilla. Vesistövaikutusriski on suon turvemäärästä riippumaton, siksi kahdesta muuten samankaltaisesta suosta kannattaa mallin puitteissa aina valita se jossa on enemmän turvetta. Tästä syystä pienet suot pysyvät ulkoprojekteina kunnes turvemäärä kasvaa niin suureksi, että ne on pakko ottaa mukaan portfolioon.

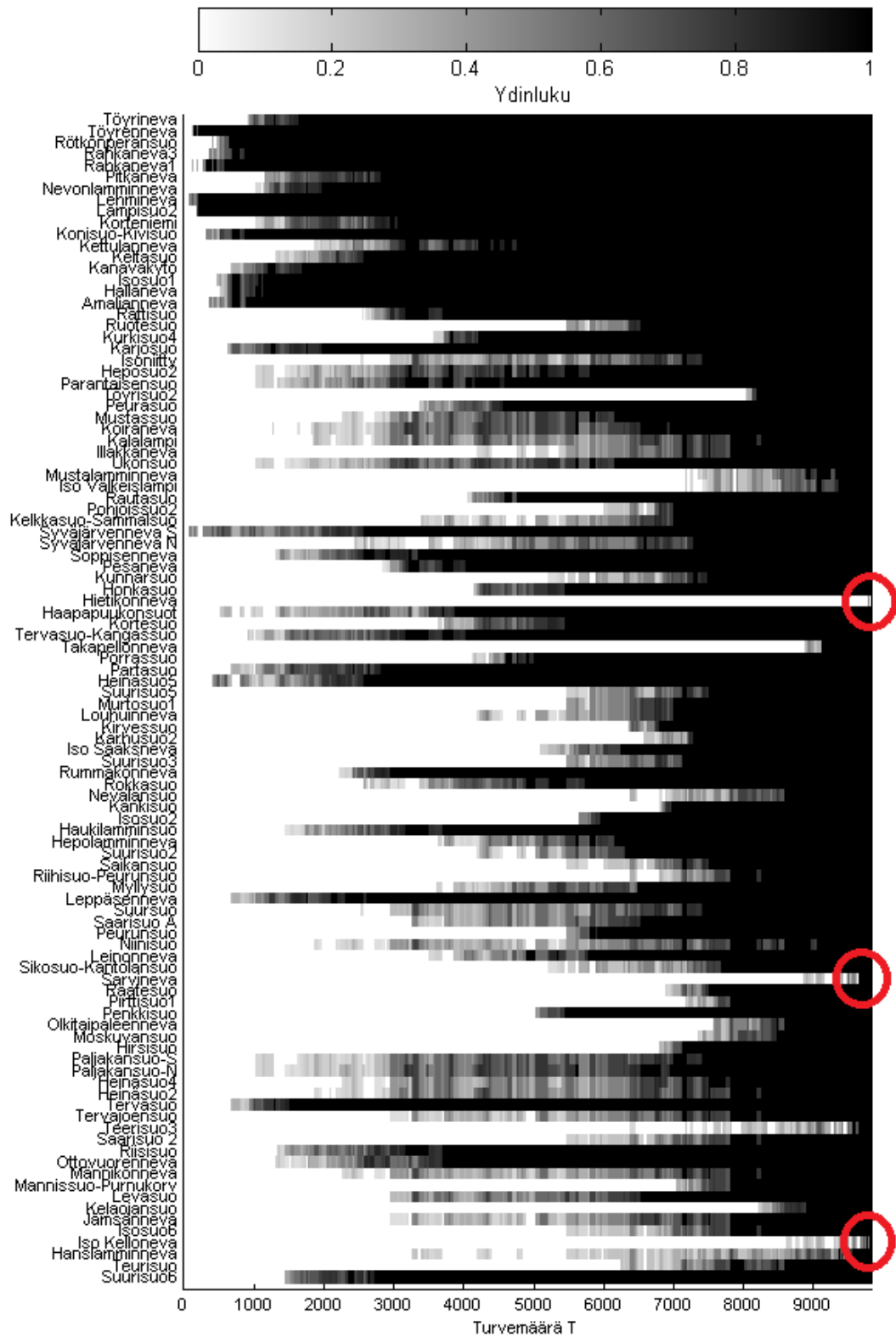
Suuret turvesuot kannattaa ottaa jo aikaisessa vaiheessa mukaan portfolioon, sillä verrattain pienellä vesistöhaittariskin kasvulla saadaan suuri turvemäärä. Kuvan 8 kolme ympäröityä suota (Palosuo, Köpinneva-Kokkosuo ja Joutensuo) ovat ydinprojekteja jo pienillä tuotantovaatimuksilla T vaikka ne ovat SYKE-listauksessa verrattain alhaalla. Turvemäärältään Joutensuo onkin aineiston toiseksi suurin 163 hehtaarilla, Köpinneva-Kokkosuo kolmanneksi

suurin 134 hehtaarilla ja Palosuo neljänneksi suurin 133 hehtaarilla.

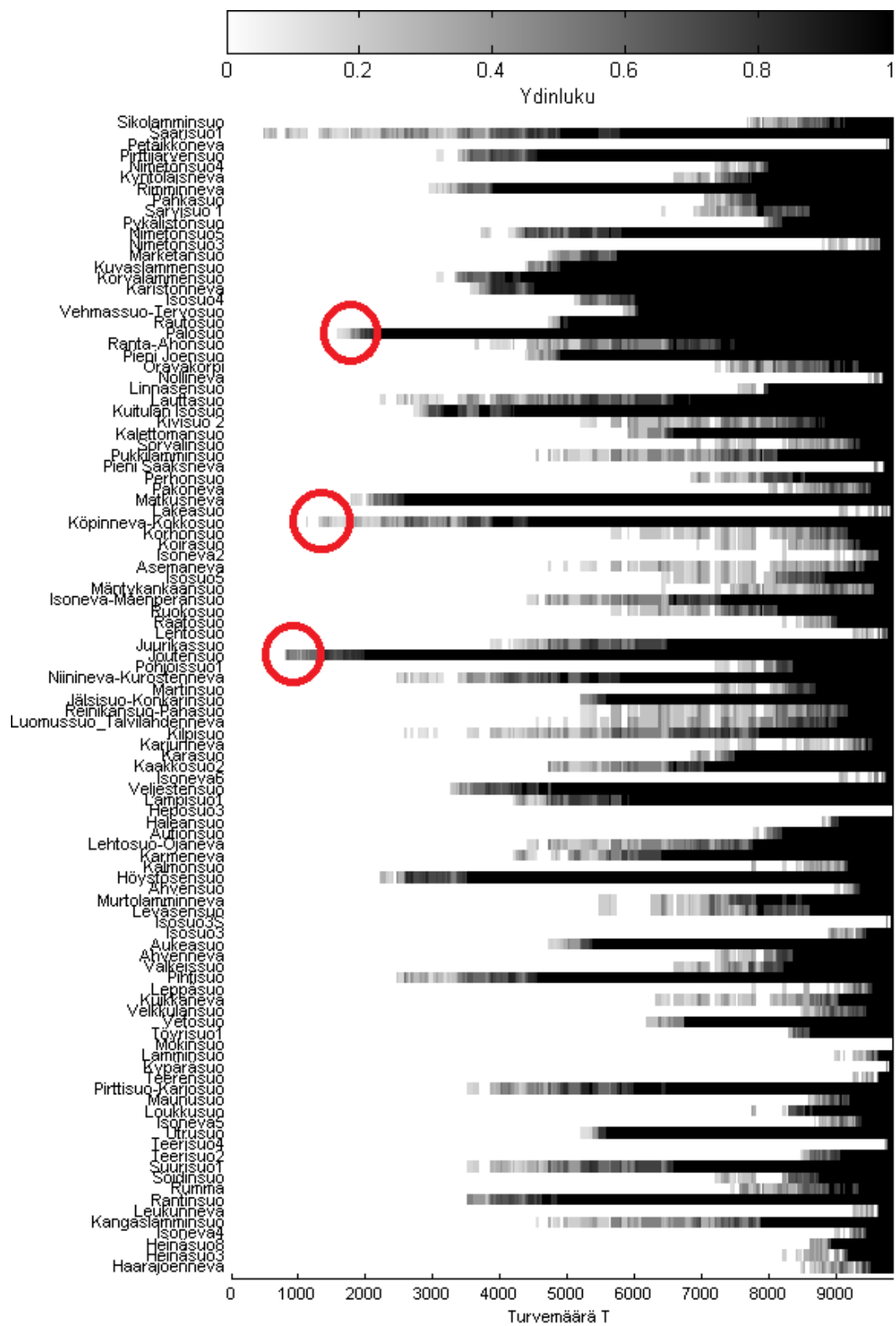
Suurin osa soista oli joko ydin- tai ulkoprojekteja, rajaprojekteja oli enimmillään kolmannes kaikista projekteista (69 kpl, 33%), tarkempi jaottelu on esitetty kuvassa 9. Ydinprojektien määrä kasvaa tasaisesti tuotantovaatimuksen T kasvaessa, ulkoprojektien määrä vastaavasti vähenee. Rajaprojektien määrä on pienin tuotantoskaalan ääripäissä ja suurin keskivaiheilla.

4.1 Turpeenoton jakautuminen valuma-alueille

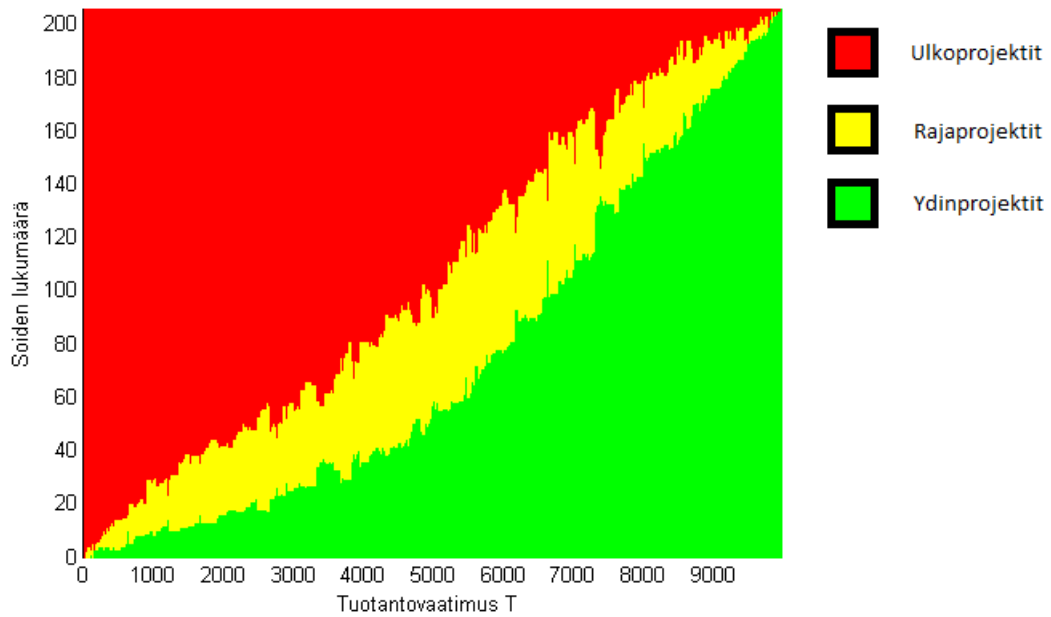
Turpeenoton vesistöhaittariskejä tarkasteltaessa eräs tärkeä kysymys on, mihin vesistöihin turpeenoton vaikutus kohdistuu. Oletetaan turpeenoton toteutuvan tässä työssä esitettyjen suositusten mukaan, eli ydinprojektit otetaan mukaan tuotantoon ja ulkoprojektit säästetään. Tällöin vesistövaikutus kohdistuu varmasti ydinprojektien valuma-alueisiin. Toisaalta valuma-alueisiin, joilla on pelkkiä ulkoprojekteja, ei turpeenotto vaikuta. Kuvasta 10 näkee kuinka moneen valuma-alueeseen vesistövaikutus varmasti kohdistuu eri tuotantovaatimuksilla. Samassa kuvassa voidaan tarkastella turpeenotolta säästyvien valuma-alueiden lukumäärää, joka laskee jokseenkin tasaisesti, kunnes yli 9000 hehtaarin tuotanto vaatii turpeenottoa lähes kaikilta valuma-alueilta. Valuma-alueilla, jotka eivät kuulu kumpaankaan ryhmään, on pelkkiä rajaprojekteja.



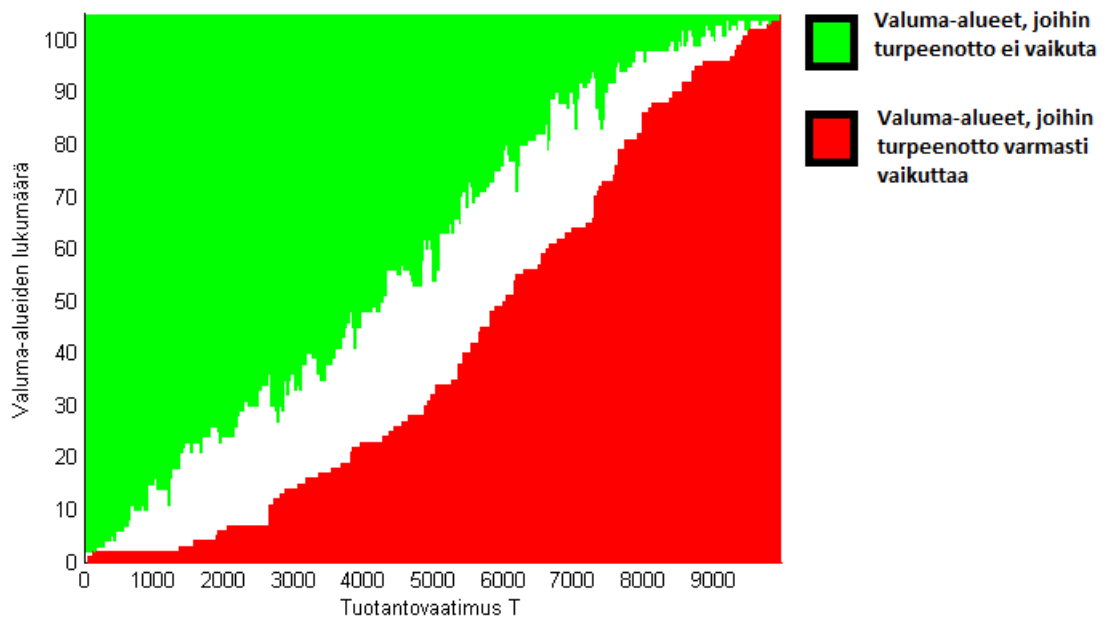
Kuva 7: Soiden ydinluvut (1/2). Suot on järjestetty SYKEN raportin huonoimman luokka-arvion perusteella; Töyrinevalla on pienin vesistöhaittariski.



Kuva 8: Soiden ydinluvut (2/2). Suot on järjestetty SYKEN raportin huonoimman luokka-arvion perusteella; Haarajoennevalla on suurin vesistöhaittariski.

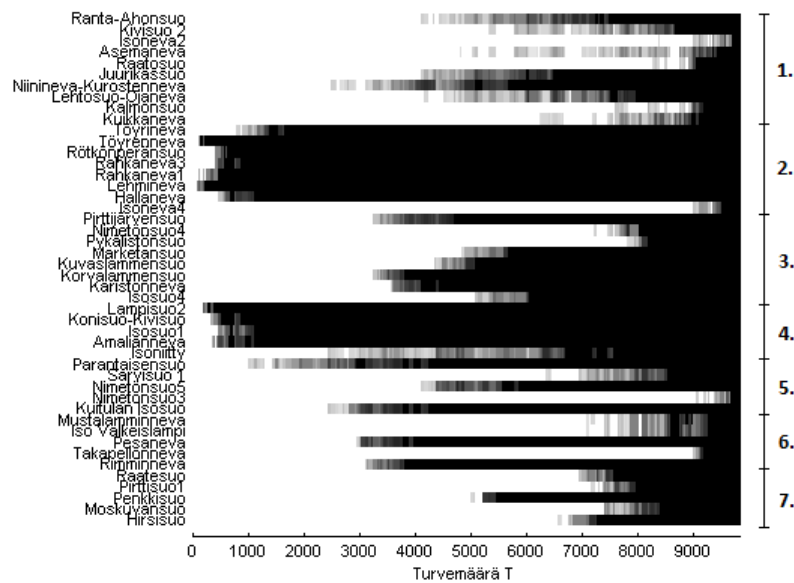


Kuva 9: Ydin-, raja- ja ulkoprojektien lukumäärä eri turvemäärille.



Kuva 10: Turpeenotolta säästyvien valuma-alueiden lukumäärä sekä niiden valuma-alueiden lukumäärä, joihin turpeenotto varmasti kohdistuu.

Aineistossa on muutama laajempi valuma-alue, joista suurimpien piirissä on 10 suota. Saman valuma-alueen suot käyttäytyvät mallissa etenkin neljän suurimman valuma-alueen kohdalla samankaltaisesti. Kuvasta 11 näkee miten suurimmalla alueella kaikki suot ovat ulkoprojekteja tuotantovaatimukseen $T = 2500$ ha asti. Toiseksi suurimmalla valuma-alueella vuorostaan kaikki suot (paitsi Isoneva4) ovat ydinprojekteja jo T :n ollessa 1500 ha.



Kuva 11: Seitsemän suurimman valuma-alueen soiden ydinluvut. Suot ovat kuvassa ryhmiteltyinä valuma-alueiden mukaan suurimmasta valuma-alueesta seitsemänneksi suurimpaan.

4.2 Vesistön herkkyden alatason valinta

Käytetty malli olettaa että suon $\underline{x} = (x_1, \dots, x_{13})$ vesistöhaittariski on sama kuin vesistöhaittariski silloin, kun ei valita suota turvetuotantoon lainkaan ($V(\{\underline{x}\}) = V(\emptyset) = 0$). Tällaisen suon lisääminen portfolioon ei lisää portfolioon riskiä, sillä $V(p \cup \{\underline{x}\}) = V(p)$. Vesistön arvon suhteen tämä vaikuttaa järkeenkäyvältä; jos suon valuma-alueella ei ole yhtään rantarakennuspaikkaa, vesi-

retkeilyä tai kalastuskohteita (katso taulukko 1) sen ottaminen turvetuotantoon ei vaikuta negatiivisesti vesistön arvoon. Vesistön herkkyyden suhteen oletus ei vaikuta yhtä realistiselta. Vaikka suon valuma-alueella ei ole kuormitusalenematavoitetta, muu kuormitus on pientä ja väriluku on suuri (katso taulukko 2), turpeenoton suolta voidaan silti olettaa vaikuttavan negatiivisesti vesistön herkkyyteen.

Vesistön herkkyyden suhteen voi olla perusteltua käyttää arvo-funktiota, jossa $V_H(\{\underline{x}\}) > V_H(\emptyset) = 0$ (Clemen ja Smith 2009). Valitaan alataso $V_H(\{\underline{x}\})$ vertailemalla kahta hypoteettista suota x^1 ja x^2 vesistön herkkyyden suhteen. Molempien vesistön arvo on nolla, $V_A(x^1) = V_A(x^2) = 0$ ja molemmilla soilla on täsmälleen sama määrä turvetta, $T_1 = T_2$. Suon x^1 alakriteereillä $k = 10, \dots, 13$ on suurimman vesistöhaittariskin aiheuttavat arvot eli suon x^1 vesistöhaittariski on

$$V(\{x^1\}) = W_H V_H(\{(\bar{x}_{10}, \dots, \bar{x}_{13})\}) = W_H V_H(\bar{x}). \quad (7)$$

Suon x^2 alakriteereillä $k = 10, \dots, 13$ on pienimmän vesistöhaittariskin aiheuttavat arvot, siten suon vesistöhaittariskiksi saadaan

$$V(\{x^2\}) = W_H V_H(\{(\underline{x}_{10}, \dots, \underline{x}_{13})\}) = W_H V_H(\underline{x}). \quad (8)$$

Vertaillaan seuraavia muutoksia:

1. Suon x^1 sijaan valitaan suo x^2 turvetuotantoon.
2. Suon x^2 sijaan ei valita yhtään suota turvetuotantoon.

Jos muutos 1 on mieluisampi kuin muutos 2 niin tällöin pätee

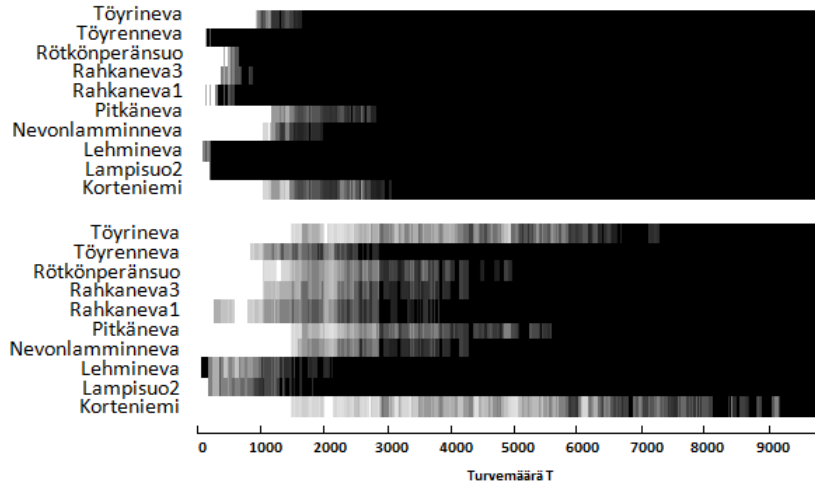
$$\begin{aligned} V(\{x^1\}) - V(\{x^2\}) &> V(\{x^2\}) - V(\emptyset) \\ \Leftrightarrow W_H V_H(\{\bar{x}\}) - W_H V_H(\{\underline{x}\}) &> W_H V_H(\{\underline{x}\}) \\ \Leftrightarrow 1 - V_H(\{\underline{x}\}) &> V_H(\{\underline{x}\}) \\ \Leftrightarrow V_H(\{\underline{x}\}) &< \frac{1}{2}, \end{aligned} \quad (9)$$

missä $V_H(\{\bar{x}\}) = 1$ ja $V(\emptyset) = 0$. Jos muutokset 1 ja 2 ovat yhtä mieluisia, niin kaavasta (9) seuraa että $V_H(\{\underline{x}\}) = \frac{1}{2}$. Toisaalta jos muutos 2 koetaan mieluisammaksi kuin muutos 1 niin $V_H(\{\underline{x}\}) > \frac{1}{2}$.

Tutkitaan miten mallin tulokset muuttuvat, jos valitaan $V_H(x) = \frac{1}{2}$ (muutokset ovat yhtä mieluisia) ja muunnetaan pääkriteerin vesistön herkkyys saamat pistemäärät väliltä $[0, 1]$ välille $[\frac{1}{2}, 1]$. Uusi vesistön herkkyuden arvofunktiio on

$$\tilde{V}_H(\{p\}) = \sum_{x^j \in p} \frac{V_H(\{x^j\}) + 1}{2} \quad (10)$$

Kuvassa 12 on esitetty kymmenen ensimmäisen suon ydinluvut käytettäessä vesistön herkkyydelle arvofunktiota V_H (yllä) ja \tilde{V}_H (alla). Uusien pistemäärien vaikutus käy hyvin ilmi etenkin Töyrinevan ja Korteniemen kohdalla (ensimmäinen ja viimeinen suo kuvassa 12), sillä Töyrinevan vesistön herkkyys muuttui 0.09:stä 0.54:ään ja Korteniemen 0.10:sta 0.55:een. Käytettäessä arvofunktiota \tilde{V}_H muut kuvan suot ovat ydinprojekteja vasta arvosta $T = 5500$ eteenpäin, kun arvofunktiolla V_H ne olivat ydinprojekteja jo kun $T = 3000$.



Kuva 12: Ydinlukujen vertailu perusmallin (yllä) ja nollatason huomioivan mallin (alla) välillä. SYKEN listauksen kymmenen ensimmäistä suota.

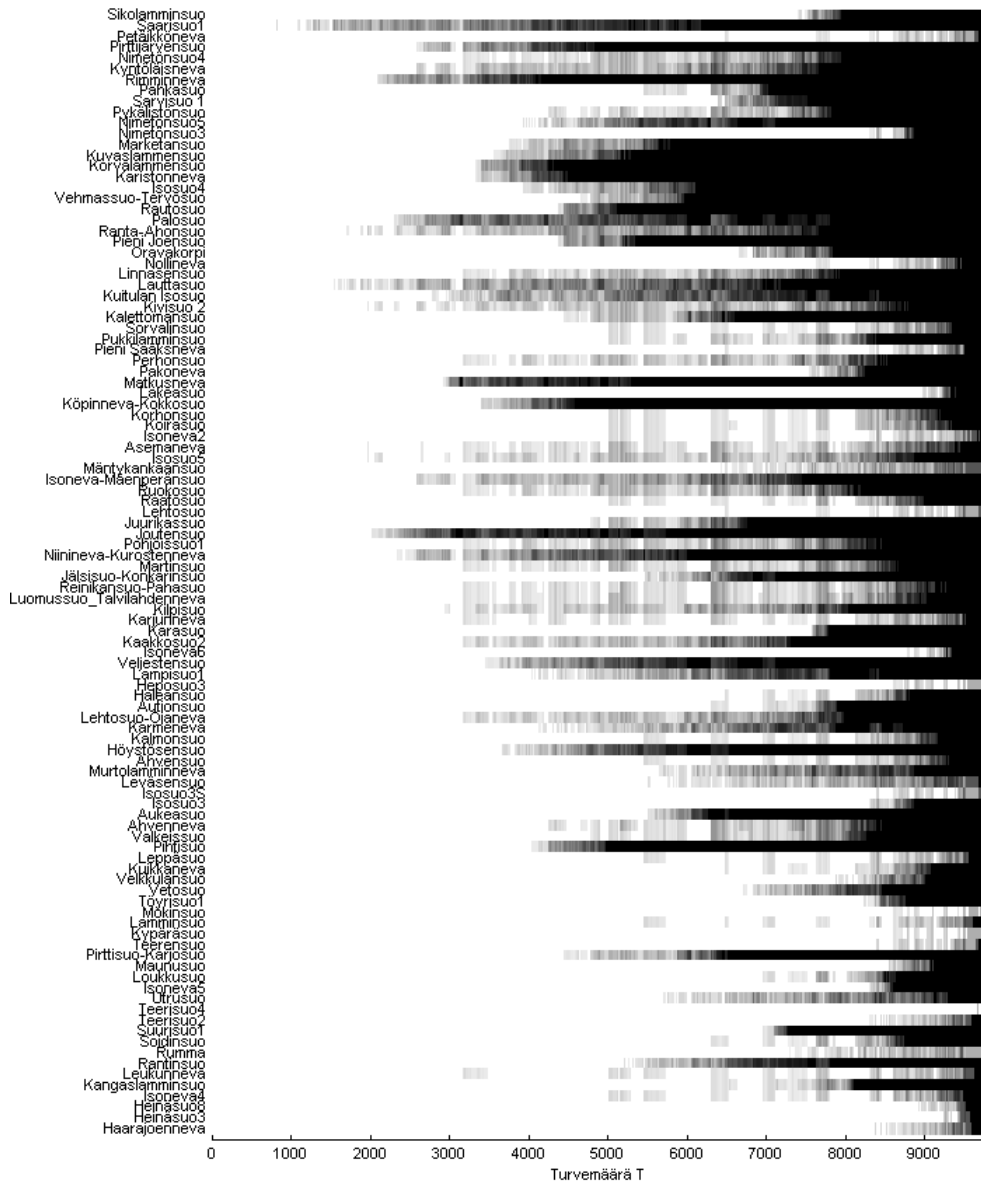
4.3 Herkkyiden riippuvuus turvemäärästä

Mallissa vesistöhaittariski koostuu suon lähivesistöjen arvosta ja herkkydestä. Arvo ja herkkyys eivät ole riippuvaisia soiden turvemäärästä, vaan lähivesistön ominaisuuksista. Aineiston suot ovat kovin erikokoisia (5-178 ha), suurin suo on monikymmenkertaisesti kookkaampi kuin pienin. Kuitenkin jos kaksi suota ovat samalla valuma-alueella niin niillä on lähes sama vesistön herkkyys. Esimerkiksi Kuitulan Isosuo (91 ha) ja Nimetönsuo3 (17 ha) ovat samalla valuma-alueella, niiden vesistöjen herkkyudet ovat 0.44 ja 0.38. Tällöin vesistön herkkyuden suhteen Kuitulan Isosuon turpeenotto aiheuttaa 1.16 kertaa suuremman riskin kuin Nimetönsuo3:n, vaikka Kuitulan Isosuo on yli 5 kertaa Nimetönsuo3:n kokoinen. Tutkitaan miten tulokset muuttuvat jos turvemäärät otetaan huomioon soiden herkkyyttä määritettäessä. Asetetaan vesistön herkkyys suoraan riippuvaiseksi turvemäärästä ja alatasoksi 0.25 (katso kappale 4.2), tällöin uusi vesistön herkkyys $\hat{V}_H(x^j)$ on $\hat{V}_H(x^j) = (0.75V_H(x^j) + 0.25) \cdot T_j$.

Kun vesistön herkkyys asetetaan riippuvaksi turvemäärästä, havaitaan tulosten noudattavan SYKE:n suosituksia tarkemmin kuin aiemmin. Kuvia 7 ja 13 (sekä 8 ja 14) vertailemalla nähdään pienimmän riskin soiden tulevan tasaisesti aikaisemmin ydinprojekteiksi kuin suuremman riskin soiden. Eroja esiintyy edelleen, mutta vähemmän kuin ennen.



Kuva 13: Turvesoiden ydinluvut, ylinnä suurimman riskin suot. Analyysissä on asetettu vesistön herkyys riippuvaiseksi turvemäärästä ja lisäksi on otettu huomioon alataso (0.25).



Kuva 14: Turvesoiden ydinluvut, alinna pienimmän riskin suot. Analyysissä on asetettu vesistön herkkyyksi riippuvaiseksi turvemäärästä ja lisäksi on otettu huomioon alataso (0.25).

5 Yhteenveto

Tässä työssä otettiin lähtökohdaksi, että vesistöhaittariski riippuu ainoastaan suon lähivesistöjen arvosta ja herkkyydestä. Kappaleessa 4.3 asetettiin vesistöhaittariski lisäksi riippumaan turvemäärästä. Tämä tehtiin, koska aineiston soiden pinta-alojen hajonta oli suurta (5-178 hehtaaria) ja isommat suot oletettavasti aiheuttavat suuremman riskin vesistöille.

Portfoliomallin vahvuutena on, että määrittelemättä vesistön arvon ja herkkyyden keskinäistä tärkeyttä, saatiin aineistosta kaikissa tapauksissa ydinlukujen perusteella vähintään kaksi kolmannesta luokiteltua tuotantoon (ydinprojektit) tai tuotannon ulkopuolelle (ulkoprojektit). Näiden soiden luokitukset eivät tule muuttumaan, vaikka vesistön arvon ja herkkyyden keskinäinen tärkeysjärjestys tarkentuisi (Liesiö ja muut 2008), sillä lisäinformaatio tarkentaa päätöksiä ainoastaan epävarmojen tapauksien, rajaprojektien, osalta. Perustellusti voi kysyä miksei kaikkia alakriteerien (13 kpl) painoarvoja jätetty määrittelemättä jotta saataisiin yleispätevämpiä tuloksia. Tällöin kuitenkin ydin- ja ulkoprojektien määrä vähenisi ja rajaprojektien määrä kasvaisi niin, ettei päätösuosituksista olisi juuri apua soiden valinnassa turvetuotantoon.

Kappaleessa 4.2 määriteltiin turvetuotantoon valittavalle suolle alin mahdollinen vesistön herkkyys, josta käytettiin nimitystä vesistön herkkyuden alataso. Alataso katsottiin olevan tarpeen, sillä turpeentuotanto vaikuttaa negatiivisesti vesistön herkkyyden kriteereihin, vaikka kyseisen suon mittaustulokset olisivatkin herkkyyden kannalta alhaisimmalla mahdollisella tasolla. Vesistön arvolle ei valittu alatasoa, koska sen kriteerien ei katsottu vahingoittuvan lisäturpeenotosta mikäli ne olivat jo alhaisella tasolla (esimerkiksi virkistysellinen arvo ei laske, jos sitä ei alun alkaenkaan ole). Alatason huomiointi vaikutti tuloksiin etenkin SYKEN listauksessa korkealla olevien soiden osalta (katso kappale 4.2).

Työn 206 turvesuota ovat jakautuneet 105 valuma-alueelle. Näistä valuma-alueista seitsemällä on viisi suota tai enemmän. Mikäli turpeenotto toteutettaisiin tämän työn kappaleen 4 suositusten mukaisesti, kävisi suurimmille (5 suota tai enemmän) valuma-alueille karkeasti ottaen siten, että ne joko säästyisivät kokonaan turpeenotolta tai kaikilta niillä sijaitsevilta soilta otettaisiin turvetta. Tulos on odotettu, koska saman valuma-alueen soilla on pitkälti samat lähivesistöt ja siten myös samat alakriteerien pistemäärät, mikä johtaa vesistöhaittariskien samankaltaisuuteen.

Tämän työn portfoliomallissa oletettiin vesistöhaittariskin kasvavan lineaarisesti, toisin sanoen jos turpeenotto samalta suolta kaksinkertaistetaan niin myös vesistöhaittariski kaksinkertaistuu. Myös muut vaihtoehdot ovat mahdollisia, esimerkiksi voidaan kuvitella vesistö, jossa vesistöhaittariski nousee alussa nopeasti, mutta kun vesistö on jo kuormittunut niin lisäkuormitus on vähemmän haitallista. Tällöin turpeenoton vesistöhaittariski riippuisi turvemäärästä, joka valuma-alueelta on jo otettu.

Viitteet

- [1] Clemen, R.T., Smith, J.E., 2009. On the Choice of Baselines in Multiattribute Portfolio Analysis: A Cautionary Note. *Decision Analysis* 6, 256-262.
- [2] Dyer, J.S., Sarin, R.K., 1979. Measurable Multiattribute Value Functions. *Operations Research* 27, 810-822.
- [3] Energian kokonaiskulutus, http://www.stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html, Tilastokeskus 2012.
- [4] Euroopan komissio, 2010. Vesipolitiikan puitedirektiivi <http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/wfd/fi.pdf>
- [5] Hämäläinen, R.P., Kettunen, E., Ehtamo, H., 2001. Evaluating a Framework for Multi-Stakeholder Decision Support in Water Resources Management. *Group Decision and Negotiation* 10, 331-353.
- [6] Liesiö, J., Mild, P., Salo, A., 2007. Preference programming for robust portfolio modeling and project selection. *European Journal of Operations Research* 181, 1488-1505.
- [7] Liesiö J., Mild, P., Salo, A., 2008. Robust portfolio modeling with incomplete cost information and project interdependencies. *European Journal of Operations Research* 190, 679-695.
- [8] Marttunen, M., Dufva, M., Nurmi, T., Hjerppe, T., Onkila, H., 2011. Turvetuotantoon soveltuvien soiden vesistövaikutusriskin arviointi Keski-Suomessa - Monitavoitearviointitarkastelun menetelmäkuvaus ja tulokset. Suomen Ympäristökeskus ja Keski-Suomen ELY-keskus.
- [9] MATLAB, <http://www.mathworks.se/products/matlab/>

- [10] Mickwitz, P., Rekolainen, S., 2012. Turvetuotannon haittojen korjaus vie aikaa. Helsingin Sanomat 13.6.2012, Vieraskynä.
- [11] Mustajoki, J., Hämäläinen, R.P., Marttunen, M., 2004. Participatory multicriteria decision analysis with Web-HIPRE: a case of lake regulation policy. *Environmental Modelling & Software* 19, 537-547.
- [12] RPM-decisions for robust portfolio modeling, <http://www.rpm.tkk.fi/rpm-software.html>
- [13] Salo, A., Keisler, J., Morton, A., 2011. *Portfolio Decision Analysis, Improved Methods for Resource Allocation*. Springer.