

KONSERTTISALIAKUSTIIKAN SUBJEKTIIVINEN ARVIOINTI PERUSTUEN BINAURAAALISIIN IMPULSSIVASTEISIIN

Tapio Lokki

Teknillinen korkeakoulu
Tietoliikenneohjelmistojen ja multimedian laboratorio
PL 5400, 02015 TKK
Tapio.Lokki@hut.fi

1 JOHDANTO

Konserttisalien akustiikkaa on pyritty jo vuosikymmenien ajan arvioimaan objektiivisesti mittausten avulla. Mitatuista impulssivasteista lasketaan huoneakustisia tunnuslukuja, jotka kertovat asiantuntijoille tietoja äänikentän luonteesta salissa ja auttavat akustiikan objektiivisen laadun arvioinnissa sekä konserttisalien suunnittelussa. Salien subjektiivinen vertailu kuuntelemalla on pitkään ollut akustikkojen toive, joka nykytekniikalla voidaan toteuttaa.

Tässä artikkelissa käsitellään akustisten tilojen subjektiivista arviointia perustuen auralisoiutuihin binauraalisiin ääninäytteisiin. Auralisointi on toteutettu konvoluoimalla konserttisaleissa mitattuja binauraalisia impulssivasteita kaiuttoman herätesignaalin kanssa.

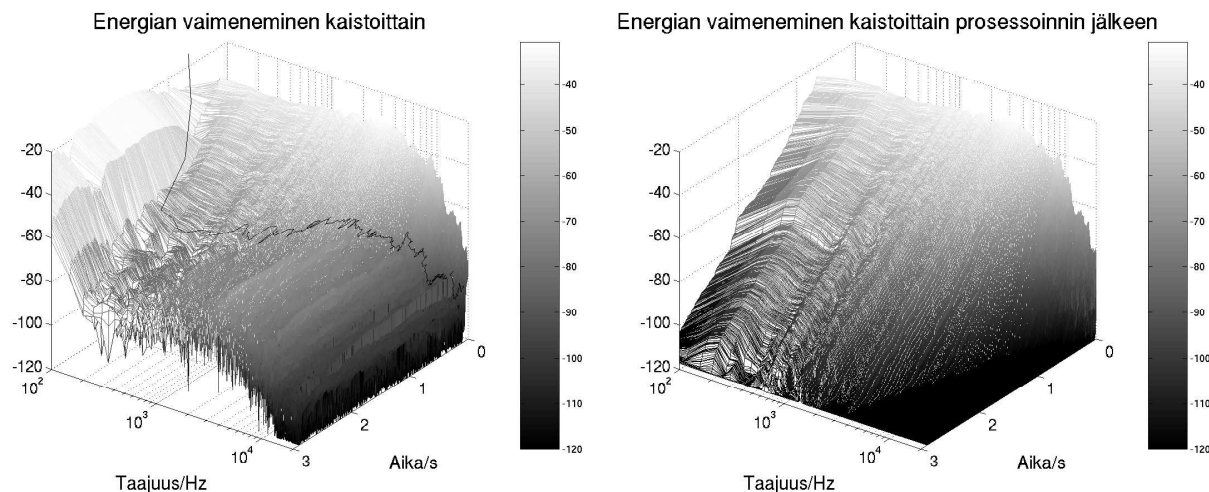
Luvussa 2 käsitellään lyhyesti binauraalisten impulssivasteiden mittaamista. Lisäksi kerrotaan seikkaperäisemmin vasteiden käsittelystä; mittausvälineiden epäideaalisuuksien kompensoinnista ja alikaistoittaisesta signaalikohinasuhteen parantamisesta. Luvussa 3 esitellään kuuntelukoe, jonka avulla koehenkilöt arvioivat konserttisalien ominaisuuksia mm. tilan ja äänilähteen koon perusteella. Kuuntelukokeiden tulokset ja niiden analysointi raportoidaan luvussa 4. Lopuksi tehtyjen kuuntelukokeiden tuloksia arvioidaan ja tehdään johtopäätöksiä binauraalisen subjektiivisen arvioinnin mahdollisuuksista.

2 BINAURAALISTEN IMPULSSIVASTEIDEN MITTAUS JA PROSESSOINTI AURALISOINTIA VARTEN

Tässä tutkimuksessa käytettiin Tekesin ja yritysten rahoittamassa TAKU-tavoitetutkimushankkeessa tehtyjä mittauksia. Mittaukset tehtiin IRMA-monikanavamittausjärjestelmällä [1] syksyllä 2000. Mittauksissa oli kaikissa täsmälleen samat välineet; äänilähteenä 12-elementtinen ympärisäteilevä kaiutin ja vastaanottajana TKK:n akustiikan laboratorion keinopää (Cortex). Mittaussignaaliina käytettiin MLS-sekvenssiä, jolla saadaan kohtuullinen signaali-kohinasuhde, vaikkakin uudella sweep-mittaustekniikalla [2, 3] saadaan vielä kohinattomampia mittauksia. Valitettavasti syksyllä 2000 sweep-mittaustekniikka ei ollut vielä käytettävissä.

Mitatut impulssivasteet käyvät sellaisenaan huoneakustisten tunnuslukujen laskentaan, mutta auralisointia varten vasteita on prosessoitava seuraavasti [4]:

1. Lähteen epäideaalinen taajuusvaste pitää korjata. Tämä toteutettiin suodattamalla mitatut vasteet lähteen käänteisellä tehospektrillä, joka on laskettu eri suunnista mitatuista vapaakenttävasteista. Näin saatiin korjattua magnitudivaste, mutta vaihevaste jätettiin koskematta.
2. Taustakohina tulee poistaa vasteista taajuuskaistoittain. Kohinan poisto toteutettiin Jot et al.



Kuva 1: Aika-taajuusvasteet yhdelle impulssivasteelle ennen prosessointia ja sen jälkeen. Kuvan harmaasävy kertoo vasteen magnitudin desibeleinä. Vasemmassa kuvassa on mustalla viivalla merkitty kohta, jossa taustakohina on voimakkaampaa kuin itse signaali.

1997 [4] esittämän algoritmin mukaisesti. Ensin signaali jaetaan taajuustasossa alikaistoihin käyttäen lyhytaikaista Fourier-muunnosta (STFT). Sen jälkeen kullakin alikaistalla etsitään ajanhetki, jolloin taustakohina peittää vaimenevan signaalin. Tästä hetkestä eteenpäin taustakohina poistetaan ja korvataan valkoisella kohinalla, jonka vaimeneminen ajassa määritellään vasteen alkuosan vaimenemisen mukaiseksi. Yksi esimerkki tällaisesta prosessoinnista on esitetty kuvassa 1.

- Keinopäällä äänitettäessä ja kuulokkeilla kuunneltaessa äänisignaaliin tulee kahteen kertaan korvalehden ja korvakäytävän vaikutus. Niinpä keinopään suuntariippumaton vaikutus pitää poistaa vasteista suodattamalla impulssivaste keinopään diffuusien kentän vasteella, joka saadaan esim. kaikkien suuntien HRTF funktioiden tehokeskiarvona. Kompensointi voidaan toteuttaa esim. taajuustasossa kompleksisella jakolaskulla.
- Kuunteluvaiheessa kuulokkeiden taajuusvaste pitäisi vielä kompensoida, mutta tämä kompensointi jätettiin tässä työssä tekemättä. Kuulokkeiden taajuusvasteen kompensointi on erittäin hankalaa ja voi vääristää signaalia, koska jokainen kuulokepari on yksilö [5].

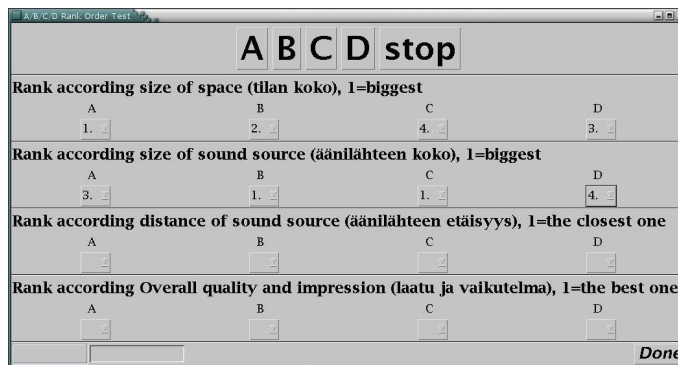
Edellä kuvatulla prosessoinnilla tehtiin kuuntelukoetta varten kohinattomia binauraalisia impulssivasteita. Aivan kaikkia epäideaalisuuksia, kuten esim. äänilähteen soimista tietyillä taajuuksilla ei saatu täysin korjattua. Toisaalta koska mittaukset tehtiin kaikki täsmälleen samoilla välineillä voidaan olettaa, että pienet virheet eivät vaikuttaneet lopputulokseen merkittävästi.

3 KUUNTELUKOE

Kuuntelukoetta varten valittiin neljä konserttisalia, joiden tiedot on lueteltu taulukossa 1. Kustakin salista prosessoitiin kolme vastetta, joiden lähde- ja vastaanottopisteet oli valittu Gaden [6] suosituksen mukaan. Suosituksessa on annettu ohjeet pisteiden valitsemisesta siten, että ne edustavat kussakin salissa vastaavia paikkoja. Kuuntelukokeessa käytettiin kolmea eri herätesignaalia, impulssivasteita sellaisinaan sekä konvoluutioita kaiuttoman pikkurummun ja kaiuttoman kitaramusiikin kanssa. Kaiken kaikkiaan kuuntelukokeessa oli yhdeksän (kolme lähde-kuuntelijaparia ja kolme herätettä) vertailtavaa nelikköä (neljä salia), joita koehenkilöiden tuli arvostella neljän eri kriteerin mu-

Konserttisali	Istumapaikkoja	T30 (s)			EDT (s)			IACC _{early} (corr.)			IACC _{late} (corr.)		
		S1R1	S2R3	S3R2	S1R1	S2R3	S3R2	S1R1	S2R3	S3R2	S1R1	S2R3	S3R2
Kuopio	1060	1,7	1,7	1,7	1,4	1,5	1,6	0,62	0,52	0,37	0,30	0,33	0,27
Mikkeli	690	2,0	2,0	2,1	2,0	2,0	2,0	0,57	0,51	0,54	0,33	0,32	0,32
Pori	700	2,2	2,1	2,1	2,0	2,2	2,2	0,67	0,39	0,36	0,30	0,31	0,36
Tampere	2000	1,8	1,7	1,8	1,6	1,5	1,6	0,62	0,39	0,40	0,31	0,35	0,37

Taulukko 1: Tiedot konserttisaleista. Akustiset tunnusluvut on laskettu mitatuista impulssivasteista neljän oktaavikaistan (250-2000 Hz) keskiarvoina.

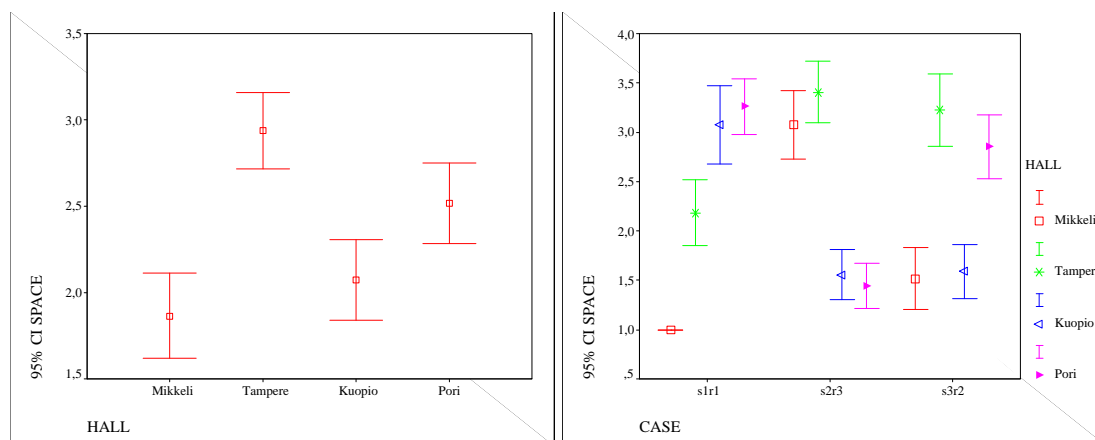


Kuva 2: Kuuntelukokeen vastauspaneeli.

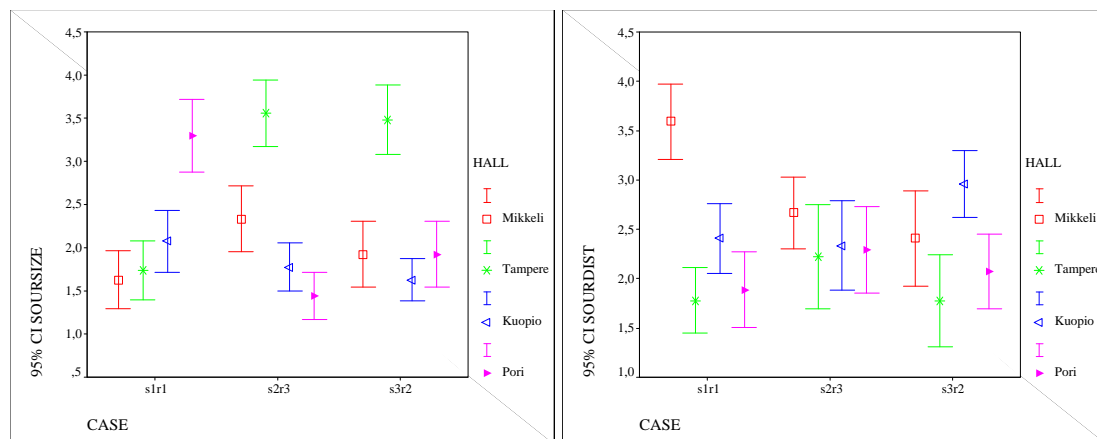
kaan. Nämä olivat tilan koko, äänilähteen koko, äänilähteen etäisyys ja yleinen laatu, kts. Kuva 2. Koehenkilöt kuuntelivat näytteitä kuulokkeilla (Sennheiser HD-590) ja heidän tehtävänä oli laittaa näytteet järjestykseen, erojen suuruuksia ei kysytty. Näytteiden arviointijärjestys oli satunnainen kullekin koehenkilölle.

4 TULOKSET

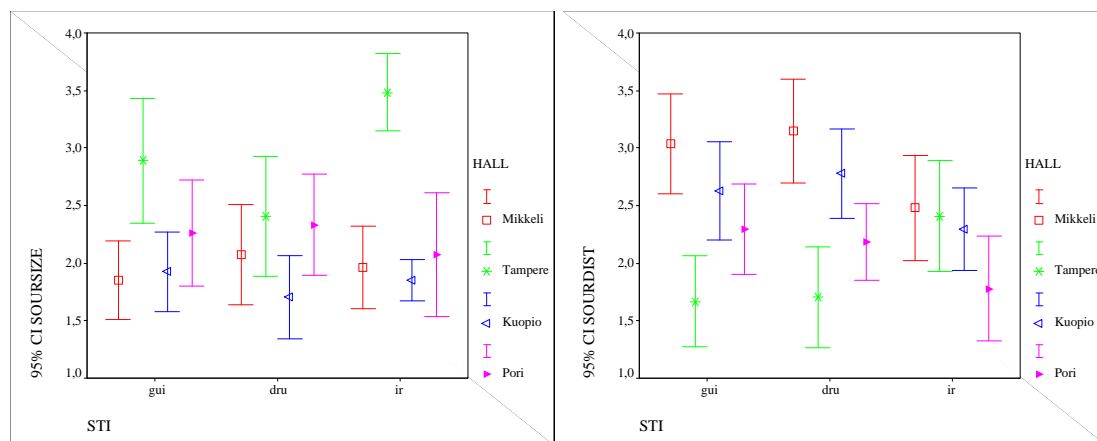
Kuuntelukokeen suoritti yhdeksän henkilöä, jotka olivat TML-laboratorion tutkijoita. Vastaukset kerättiin talteen ja tilastollinen analyysi suoritettiin SPSS-ohjelmalla. Varianssianalyysillä (ANOVA) tutkittiin onko eri salien (HALL), lähde-kuuntelupisteparien (CASE), herätteiden (STI) ja koehenkilöiden (SUBJ) välillä tilastollisesti merkittävää eroa. Analyysi perustuu ryhmien välisen ja ryhmien sisäisen vaihtelun (varianssin) vertaamiseen. Varianssianalyysin lisäksi tilastollista merkittävyyttä



Kuva 3: Kuuntelukokeen tulokset tilan kokoa arvioitaessa. Kuvissa on esitetty vastausten keskiarvot ja 95% luottamusvälit.



Kuva 4: Tulokset äänilähteen kokoa ja etäisyyttä arvioitaessa lähde-kuuntelupisteparien ja salin funktiona.



Kuva 5: Tulokset äänilähteen kokoa ja etäisyyttä arvioitaessa herätteen ja salin funktiona.

tutkittiin jakautumasta riippumattomalla Kruskal-Wallis testillä, joka on ei-parametrinen vastine yksisuuntaiselle varianssianalyysille.

Analyysin tulokset on koottu taulukkoon 2. Tilastollisesti merkittävä ero oli vain salien välillä kaikkiin neljään kysymykseen. Lisäksi varianssianalyysi osoitti, että salin ja lähde-kuuntelupisteparien välillä on voimakas interaktio eli yhdysvaikutus. Tämä tarkoittaa sitä, että pelkkä salin tarkastelu voi olla harhaanjohtavaa ja tarkasteluun pitäisi ottaa sekä sali että lähde-kuuntelupistepari. Vastaavia tilastollisesti merkittäviä yhdysvaikutuksia löytyi salin ja herätteen väliltä arvioitaessa äänilähteen kokoa ja etäisyyttä sekä salin ja koehenkilöiden väliltä arvioitaessa äänilähteen etäisyyttä.

Kuvasta 3 nähdään, että koehenkilöt arvioivat suurimmiksi tiloiksi Mikkelin ja Kuopion salit. Toisaalta, jos katsotaan oikeanpuoleista kuvaa nähdään, että tilan kokoon vaikutti merkittävästi lähde-kuuntelupistepari. Vasteella S1R1 Mikkeli ja Tampere kuultiin suurimpana kun taas vasteella S2R3 suurimmat olivat Kuopio ja Pori ja vasteella S3R2 Mikkeli ja Kuopio.

Äänilähteen kokoa arvioitaessa vasteella S1R1 muita pienemmäksi arvioitiin Pori, vasemmanpuoleinen kuva kuvassa 4, kun taas vasteilla S2R3 ja S3R2 muista merkittävästi pienemmäksi osoittautui Tampere. Äänilähteen etäisyyden tapauksessa Mikkeliä ääni kuulostaisi tulevan merkittävästi kauempaa (vasteella S1R1) kuin muissa saleissa, vasemmanpuoleinen kuva kuvassa 4. Vasteella S2R3 ei merkittäviä eroja löytynyt kun taas vasteella S3R2 Kuopiossa äänilähde kuulosti olevan kauempana

kuin Tampereella ja Porissa.

Kuvasta 5 nähdään vielä kuinka eri herätteet vaikuttivat äänilähteen koon ja etäisyyden arviointiin. Lähteen koon arvioinnissa tilastollisesti merkittävä ero saatiin vain kitaralla ja impulssivasteilla, kun taas lähteen etäisyyttä kuunneltaessa pelkistä impulssivasteista eivät koehenkilöt kuulleet merkittäviä eroja tai mielipiteet menivät ristiin.

Yleisestä laadusta näytteiden välillä ei saatu luotettavia tuloksia. Kysymys oli ilmeisesti huonosti muotoiltu, koska osa koehenkilöistä raportoi kuunnelleensa tilan akustiikkaa, osa äänisignaalien epäluonnollisuuksia ja osa "hyvää kitarasoundia" arvioidessaan yleistä laatua.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTOJA

Kuuntelukokeen tulokset herättävät mielestäni enemmän kysymyksiä kuin antavat vastauksia. Jos vertaa taulukon 1 akustisia tunnuslukuja ja kuuntelukokeen tuloksia niin voidaan todeta, että ne eivät juurikaan korreloi keskenään. Beranek [7] raportoi, että IACC:n arvojen ja tilan tunnun sekä äänilähteen koon välillä olisi selvä korrelaatio, mutta tämä ei tässä kokeessa tullut juurikaan esiin.

Vaikka mitatut vasteet yritettiin prosessoida mahdollisimman hyvin on niissä selviä puutteita verrattuna siihen, että kuuntelisi saleja paikan päällä. Käyttämämme äänilähde ei toista juuri ollenkaan alle 100 Hz ja yli 10 kHz taajuuksia. Lisäksi saleissa ei juuri koskaan kuunnella vain yhtä äänilähdettä kerrallaan.

Lopuksi voidaan todeta, että vaikka auralisointi ja impulssivasteiden kuunteleminen on monessa tapauksessa hyödyllistä ei muutaman vasteen perusteella voi vielä vetää johtopäätöksiä salin kaikista ominaisuuksista. Esimerkiksi tämä koe osoitti, että kuuntelupisteellä on suuri vaikutus tilan koon arvioinnissa.

KIITOKSET

Tässä työssä käytetyt impulssivasteet mitattiin Tekesin ja yritysten rahoittamassa Tila-akustiikan hallinta (TAKU) -hankkeessa (1999-2002). Lisäksi haluan kiittää Juha Merimaata avusta vasteiden prosessoinnissa tarvittavien Matlab-skriptien toteutuksessa.

VIITTEET

- [1] PELTONEN T, *A Multichannel Measurement System for Room Acoustics Analysis*, Master's thesis, Helsinki University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing, 2000, 119 p. Saatavissa: http://www.acoustics.hut.fi/publications/theses/peltonen_mst.pdf.
- [2] FARINA A, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, in *the 108th Audio Engineering Society (AES) Convention*, Paris, France, Feb. 19-22 2000, preprint no. 5093.
- [3] MÜLLER S & MASSARANI P, Transfer function measurement with sweeps, *J. Audio Eng. Soc.*, **49**(2001) 6, 443–471, laajempi versio saatavissa: www.anselngoertz.de/Page10383/Monkey_Forest_dt/Manual_dt/Aes-swp.pdf.
- [4] JOT J M, CERVEAU L, & WARUSFEL O, Analysis and synthesis of room reverberation based on a statistical time-frequency model, in *the 103rd Audio Engineering Society (AES) Convention*, New York, Sept. 26-29 1997, preprint no. 4629.
- [5] HAMMERSHØI D & MØLLER H, Methods for binaural recording and reproduction, *Acta Acustica united with Acustica*, **88**(2002) 3, 303–311.
- [6] GADE A, Acoustical survey of eleven european concert halls – a basis for discussion of halls in denmark, Technical Report 44, The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, 1989.
- [7] BERANEK L, *Concert and Opera Halls — How They Sound*, Acoustical Society of America, New York, 1996.

Tests of Between-Subjects Effects

Source	Dependent Variable	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	Noncent. Parameter	Observed Power(a)
Corrected Model	SPACE	268,892(b)	87	3,091	5,041	,000	438,560	1,000
	SOURSIZE	245,889(c)	87	2,826	3,784	,000	329,184	1,000
	SOURDIST	190,299(d)	87	2,187	2,235	,000	194,424	1,000
	QUALITY	163,154(e)	87	1,875	1,744	,001	151,736	1,000
Intercept	SPACE	1787,410	1	1787,410	2915,246	,000	2915,246	1,000
	SOURSIZE	1617,827	1	1617,827	2165,865	,000	2165,865	1,000
	SOURDIST	1815,707	1	1815,707	1855,057	,000	1855,057	1,000
	QUALITY	1897,086	1	1897,086	1764,319	,000	1764,319	1,000
HALL	SPACE	55,614	3	18,538	30,235	,000	90,706	1,000
	SOURSIZE	58,148	3	19,383	25,949	,000	77,846	1,000
	SOURDIST	47,466	3	15,822	16,165	,000	48,495	1,000
	QUALITY	16,914	3	5,638	5,243	,002	15,730	,925
CASE	SPACE	,451	2	,225	,367	,693	,735	,109
	SOURSIZE	,469	2	,235	,314	,731	,628	,100
	SOURDIST	,691	2	,346	,353	,703	,706	,106
	QUALITY	,117	2	5,864E-02	,055	,947	,109	,058
STI	SPACE	,228	2	,114	,186	,830	,373	,079
	SOURSIZE	2,451	2	1,225	1,640	,196	3,281	,344
	SOURDIST	2,710	2	1,355	1,384	,253	2,769	,296
	QUALITY	9,877E-02	2	4,938E-02	,046	,955	,092	,057
SUBJ	SPACE	4,784	8	,598	,975	,456	7,803	,450
	SOURSIZE	17,451	8	2,181	2,920	,004	23,362	,949
	SOURDIST	11,265	8	1,408	1,439	,181	11,510	,645
	QUALITY	3,136	8	,392	,365	,938	2,916	,173
HALL * CASE	SPACE	175,377	6	29,229	47,673	,000	286,037	1,000
	SOURSIZE	115,852	6	19,309	25,849	,000	155,097	1,000
	SOURDIST	32,469	6	5,412	5,529	,000	33,173	,996
	QUALITY	89,809	6	14,968	13,921	,000	83,523	1,000
HALL * STI	SPACE	6,043	6	1,007	1,643	,136	9,856	,623
	SOURSIZE	15,500	6	2,583	3,458	,003	20,751	,943
	SOURDIST	20,895	6	3,483	3,558	,002	21,348	,949
	QUALITY	10,346	6	1,724	1,604	,147	9,622	,610
HALL * SUBJ	SPACE	18,080	24	,753	1,229	,218	29,489	,892
	SOURSIZE	15,463	24	,644	,863	,653	20,701	,712
	SOURDIST	62,562	24	2,607	2,663	,000	63,918	1,000
	QUALITY	39,753	24	1,656	1,540	,056	36,971	,961
CASE * STI	SPACE	,549	4	,137	,224	,925	,896	,098
	SOURSIZE	1,531	4	,383	,512	,727	2,049	,172
	SOURDIST	,420	4	,105	,107	,980	,429	,072
	QUALITY	,142	4	3,549E-02	,033	,998	,132	,056
CASE * SUBJ	SPACE	2,438	16	,152	,249	,999	3,977	,165
	SOURSIZE	9,753	16	,610	,816	,667	13,057	,554
	SOURDIST	3,420	16	,214	,218	,999	3,494	,148
	QUALITY	1,494	16	9,336E-02	,087	1,000	1,389	,083
STI * SUBJ	SPACE	5,327	16	,333	,543	,922	8,689	,362
	SOURSIZE	9,272	16	,579	,776	,712	12,412	,527
	SOURDIST	8,401	16	,525	,536	,926	8,583	,357
	QUALITY	1,346	16	8,410E-02	,078	1,000	1,252	,079
Error	SPACE	144,698	236	,613				
	SOURSIZE	176,284	236	,747				
	SOURDIST	230,994	236	,979				
	QUALITY	253,759	236	1,075				
Total	SPACE	2201,000	324					
	SOURSIZE	2040,000	324					
	SOURDIST	2237,000	324					
	QUALITY	2314,000	324					
Corrected Total	SPACE	413,590	323					
	SOURSIZE	422,173	323					
	SOURDIST	421,293	323					
	QUALITY	416,914	323					

- (a) Computed using alpha = .05
- (b) R Squared = ,650 (Adjusted R Squared = ,521)
- (c) R Squared = ,582 (Adjusted R Squared = ,429)
- (d) R Squared = ,452 (Adjusted R Squared = ,250)
- (e) R Squared = ,391 (Adjusted R Squared = ,167)

Kruskal Wallis Test Statistics

Source		SPACE	SOURSIZE	SOURDIST	QUALITY
HALL	Chi-Square	44,896	36,819	36,986	12,925
	df	3	3	3	3
	Asymp. Sig.	,000	,000	,000	,005
CASE	Chi-Square	,312	,319	,515	,086
	df	2	2	2	2
	Asymp. Sig.	,856	,853	,773	,958
STI	Chi-Square	,250	2,170	2,046	,084
	df	2	2	2	2
	Asymp. Sig.	,883	,338	,360	,959
SUBJ	Chi-Square	3,712	13,972	8,644	2,353
	df	8	8	8	8
	Asymp. Sig.	,882	,083	,373	,968

Taulukko 2: Tilastollisen analyysin tulokset, yllä varianssianalyysin (ANOVA) ja alla ei-parametrinen Kruskal-Wallis testin tulokset.