

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Malin Moisio ja Satu Huuhka,

Tampereen yliopisto

11.2.2021

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

2

1	Johdanto	3
2	Menetelmä	4
2.1	Hiilijalanjälki	4
3	Tapaustutkimus: betonikoulun ja puukoulun vertailu	6
3.1	Tapausten muodostaminen	6
3.2	Vertailu 1: pieni betonikoulu verrattuna samankokoiseen puukouluun	9
3.2.1	Hiilijalanjälki	10
3.3	Vertailu 2: Iso betonikoulu ja samankokoinen puukoulu	13
3.3.1	Hiilijalanjälki	14
3.4	Pohdinta ja tarkasteluja erilaisilla eristysratkaisuilla	17
4	Tulosten yhteenveto ja johtopäätökset	19
5	Lähteet	20
6	Liitteet	21
6.1	Liite 1. Rakennetyypit	21

1 Johdanto

Tässä raportissa esitetään laskentatuloksia uudisrakentamisen hiilijalanjälkivaikutuksista vertailtaville puu- ja betonirakenteisille koulurakennuksille. Julkaisu on laadittu osana Tampereen yliopiston CE Wood (Kiertotalous – Uusia mahdollisuuksia puurakennusteollisuudelle) tutkimushanketta. CE Wood tutkimushankkeen tavoitteena on parantaa seudullisten puurakennusteollisuuden yritysten kilpailukykyä kansainvälisillä markkinoilla. Tampereen yliopisto toteuttaa hankkeessa osa-aluetta, jossa tavoitteena on lisätä yritysten tietotaitoa uusista teknisistä ratkaisuista ja menetelmistä. Hanke on rahoitettu Botnia Atlantica- ohjelman toimintalinjasta elinkeinoelämä.

Työ on jatkotutkimus Ympäristöministeriön tilaamaan ja Tampereen yliopiston sekä VTT:n toteuttamaan ”Purkaa vai korjata” (Purkuko) tutkimushankkeeseen (Huuha, S. & al. 2021). Purkuko tutkimushankkeessa on ollut tavoitteena kerätä ja tuottaa tietoa rakennuksen peruskorjaamisen hiilijalanjälkivaikutuksista verrattuna purkavan uudisrakentamisen hiilijalanjälkivaikutuksiin. Purkuko tutkimushankkeessa valitut case -kohteet ja muodostetut laskentatapaukset toimivat lähtöaineistona tässä tapaustutkimuksessa. Tässä tutkimuksessa on keskitytty vain uudisrakennusten vertailuun.

2 Menetelmä

2.1 Hiilijalanjälki

CE Wood tutkimushankkeessa toteutettiin vertaileva tapaustutkimus, jonka kohteena oli koulurakennus. Tapaustutkimuksessa hiilijalanjäljen laskenta perustuu ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmään (jatkossa: ympäristöministeriön menetelmä) (Ympäristöministeriö, 2019). Hiilijalanjäljen laskentaan on sisällytetty kaikki elinkaaren vaiheet: tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppu (Kuva 1).

Tuotevaiheen materiaalimäärät on laskettu ArchiCAD-ohjelmassa luotujen rakennusten tietomallien avulla ja niiden päästöt on arvioitu One Click LCA -ohjelmalla. Käytön aikainen energiankulutus on simuloitu kaikille vertailutapauksille niin ikään tietomalliin perustuen dynaamisella laskentamenetelmällä IDA ICE 4.8 -ohjelmalla. Tapauksille on laskettu sekä E-luku kWh_e/m²a että ostoenergiankulutus kWh/a, josta on eritelty kaukolämpö ja -kylmä sekä sähkönkulutus. Energiatohokkuus on laskettu käyttäen asetuksen 1010/2017 käyttötarkoitukseluokka 6 (Opetusrakennus ja päiväkotito) mukaista vakioitua käyttöä. Uudisrakennusten energiatohokkuus täyttää ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisen E-luvun raja-arvon (opetusrakennuksille 100 kWh_e/m²a, massiivipuorakennusten osalta vaatimustaso on 10 % korkeampi) ja lämpöhäviöiden tasauslaskelman vaatimukset.

Varsinainen hiilijalanjälkilaskenta on tehty One Click LCA -ohjelmalla käyttäen 50 vuoden tarkastelujaksoa. Laskenta huomioi sekä käytön aikaisen energiankulutuksen että käytettyjen materiaalien hiilijalanjäljen (kgCO_{2e}) koko tarkastelujakson aikana. Materiaalien päästötiedot on valittu ohjelman sisältämistä päästötietokannoista vastaamaan mahdollisimman hyvin Suomessa yleisesti käytössä olevia ratkaisuja.

Ympäristöministeriön menetelmän mukaisesti tapauksille on laskettu myös elinkaaren aikainen hiilikädenjälki. Hiilikädenjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä vaan se on esitetty hiilijalanjäljen rinnalla. Hiilikädenjäljen arviointiin sisältyvät sellaisten ilmastovaikutusten nettohyödyt, joita ei syntyisi ilman rakennushanketta. Näitä voivat olla rakennuksen hiilivarastot ja hiilinielut, rakennuksen elinkaaren aikana tuotettu ylimääräinen uusiutuva energia sekä rakennustuotteiden uudelleenkäytön tai kierrätyksen myötä syntyvät hyödyt (Ympäristöministeriö, 2019, s. 30).

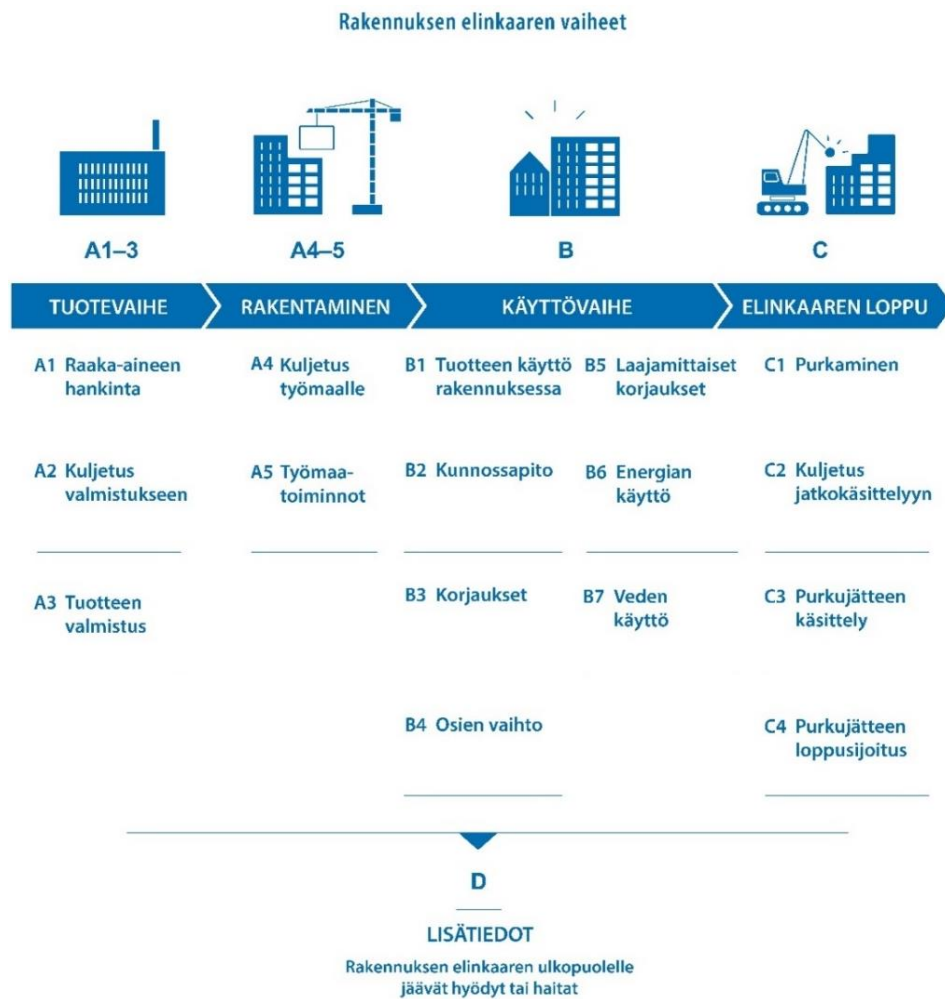
Menetelmässä on oletuksia sähkön ja kaukolämmön päästökertoimista, joiden oletetaan vähähiilistyvän vuoteen 2070 mennessä sähkön osalta 94 % ja kaukolämmön osalta 83 %. Vähähiilistyminen on huomioitu portaittain kymmenen vuoden jaksoissa (Ympäristöministeriö, 2019, s. 46).

Vaiheiden A4 (kuljetus työmaalle), A5 (uudisrakennustyömaan toiminnot), B3-4 (korjausten energiankulutus) C1 (purkutyömaan toiminnot) C2 (kuljetus jatkokäsittelyyn) ja C3-4 (jätteenkäsittely ja loppusijoitus) päästöjen laskennassa on käytetty taulukkoarvoja ympäristöministeriön menetelmän

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

mukaisesti (Ympäristöministeriö, 2019, liite 3). Laajamittaiset korjaukset (B5) on huomioitu rakennuksen eri osien teknisten käyttöikien perusteella RT-korttiin 18-10922 (Rakennustieto, 2008) perustuen.

Laskennassa on tehty tiettyjä ympäristöministeriön menetelmästä poikkeavia rajauksia (vrt. Ympäristöministeriö, 2019, s. 18). Koska laskennan on haluttu keskittyvän rakennukseen, tontin rakentaminen (maasat, tuennat ja vahvistukset, päällysteet ja alueen rakenteet) on jätetty pois laskennasta. Täydentävistä rakenteista laskennan ulkopuolelle on rajattu pintarakenteet sekä tyyppilliset kiintokalusteet. Nämä on oletettu molemmissa kouluissa samoiksi, kun rakennukset ovat samankokoiset. Tulokset ovat siis vertailukelpoisia vain keskenään.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö, 2019, s.14).

3 Tapaustutkimus: betonikoulun ja puukoulun vertailu

3.1 Tapausten muodostaminen

Tapaustutkimuksessa käytettyjen koulurakennusten esikuvana on toiminut Tampereella sijaitsevan Tesoman koulun uudisrakennus (valmistumisvuosi 2018, Kuva 2.) Laskentaa varten Tesoman koulun geometriasta on muodostettu kaksi eri koulurakennusta, iso versio sekä pienennetty laskentaversio. Rakennusten mallinnusta ja pinta-alojen laskentaa on yksinkertaistettu laskentatapauksia muodostettaessa, esimerkiksi katoilla sijaitsevat iv-konehuoneet ja maanalaiset kuilut on jätetty pois rakennusmassojen geometriasta. Talotekniikalle on käytetty ympäristöministeriön menetelmän neliömetripohjaisia taulukkoarvoja (Ympäristöministeriö, 2019, liite 2), käyttäen lämmitettyä nettoalaa.



Kuva 2. Tesoman koulu Tampereella. Kuva Antti Lakka.

Molempien tapausten rakennetyyppejä tarkistettiin vastaamaan tyypillisiä, yleisesti käytössä olevia rakenteita. Betonikoulun rakenteet ovat toteutuneesta Tesoman koulusta. Puukoulun rakenteet on valittu Hoisko CLT (CLT Finland Oy):n toteuttamien kohteiden CLT -rakennetyypeistä, yhdessä Hoisko CLT:n asiantuntijoiden kanssa. Puukoulussa rakennetyypit on vaihdettu puurakenteisiksi vain niiltä osin, kun se on perusteltua ja

mahdollista ilman alkuperäisen suunnitelman muokkausta. Kantavat rakenteet, kuten ulkoseinät, pilarit ja palkit sekä välipohjat ja yläpohjat on toteutettu puisina, CLT- tai liimapuurakenteisina Taulukon 1 mukaan. Väliseinistä teräsrankarunkoiset kipsilevyväliseinät on korvattu puurakenteisilla CLT väliseinillä. Muut väliseinät kuten betoniset kantavat porraskuilut, märkätilojen kalkkihiekkamuuratut seinät sekä ulkotasojen kantavat seinät on pidetty ennallaan. Sama koskee portaita, parvekkeita sekä väestönsuojan rakenteita. Esimerkiksi poistumistieportaiden teräsritiläverhoilua sekä aulatilojen teräsrunkoisia lasiseiniä voidaan pitää arkkitehtuuriin kuuluvana, eikä niitä ole puukoulussa vaihdettu toisiin materiaaleihin.

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Betonikoulun rakenteet, välipohjan jännevälit sekä pilari-palkkilinjastot on otettu olemassa olevasta koulusta. Betonirakennuksessa rakennusmassan siipien leveys vaihtelee n. 15-20 m:n välillä. Kukin siipi on jaettu pilari-palkki -linjalla kahteen osaan. Puukoulussa puuvälipohjien jänneväliksi on oletettu lyhyempi, n. 6-8 m:n jänneväli, jonka vuoksi puukouluun on lisätty kantavia pilari-palkkilinjoja. Pilarien kokoa on kohtuullistettu vastamaan realistista tilannetta, vaikkei varsinaista rakenteiden mitoitusta olekaan tehty. Pilarit ja niiden perustukset on siis huomioitu materiaalilaskennassa mutta ei tilasuunnittelussa. Rakennusten tilat on pidetty ennallaan mutta laskennassa käytetyn rakennusmateriaalin määrään on vaikuttanut eri tapauksissa käytetyt rakennepaksumat. Esimerkiksi puurakennuksessa ohuempi välipohja aiheuttaa enemmän väliseinäpinta-alaa, kun kerroskorkeus on pidetty ennallaan ja ohuemmat ulkoseinät aiheuttavat vähemmän ulkoseinäpinta-alaa, kun lämmitetty nettoala on pidetty ennallaan. Tarkemmat rakennetyypiluettelot on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 1. Tapauksissa käytetyt rakenteet.

Rakennuksen osa	Betonikoulu	Puukoulu
Runko	Betonelementtirakenteinen, paikoin betonipilareita ja palkkeja	CLT-rakenteinen, paikoin liimapuupilareita ja -palkkeja
Julkisivut	Tiililaatoitettuja ja maalattuja betonelementtejä, osittain lasia ja teräsritilöitä	Puuverhoituja massiivisia CLT-elementtejä, osittain lasia ja teräsritilöitä
Vesikatto	Kantavat rakenteet puuta, kumibitumikermikate	Kantavat rakenteet puuta, kumibitumikermikate
Yläpohja	Ontelolaatasto, mineraalivillaeriste	Liimapuupalkisto, puukuitueriste
Välipohjat	Ontelolaattoja	CLT välipohjalaatastoja
Maanvastaiset seinät	Betonelementtirakenteinen, ulkopuolinen vedeneriste	Betonelementtirakenteinen, ulkopuolinen vedeneriste
Alapohja	Alapuolelta lämmöneristetty maanvarainen betonilaatta	Alapuolelta lämmöneristetty maanvarainen betonilaatta
Väliseinät	Teräsrankarunkoisia, muurattuja ja betonisia väliseiniä	CLT väliseiniä, muurattuja ja betonisia väliseiniä
Talotekniikka	Tyypillinen talotekniikka, ei sprinklausta	Tyypillinen talotekniikka, sprinklaus

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Molemmissa versiossa on käytetty asetuksen 1010/2017 mukaisia vertailuarvoja ja käyttötarkoitukseluokan vakioitua käyttöä. Lämpöhäviöiden tasauksessa määräystenmukaisuus on saavutettu vertailuarvoa paremman ilmatiiveyden avulla, joka on molemmissa versioissa 2. Myös kylmäsiilat on oletettu samoiksi molemmissa rakennuksissa. Taulukossa 2 on esitetty keskeisimmät energialaskennassa käytetyt lähtötiedot, versioiden laajuustiedot on esitetty Taulukoissa 3 ja 6.

Tuloksista on muodostettu kaksi erillistä vertailua. Ensimmäinen vertailu tarkastelee pienen betonikoulun päästöjä suhteessa samankokoiseen puukouluun. Toisessa vertailussa lähtökohtana on neljä kertaa niin suuri rakennus kuin ensimmäisessä vertailussa. Tapausten tarkemmat lähtötiedot on annettu luvuissa 3.2 ja 3.3.

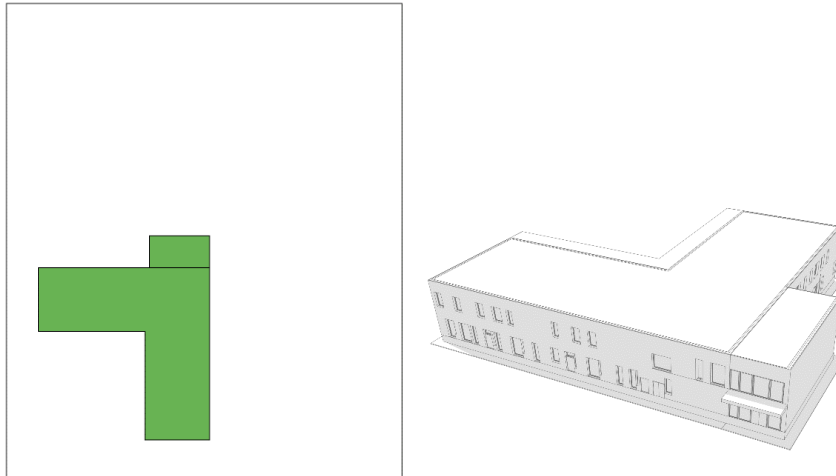
Taulukko 2. Energialaskennan lähtötiedot.

Energialaskennan lähtötiedot			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu	Puukoulu
Rakenteiden ominaisuuksia			
Ilmanvuotoluku (q50)		2	2
Rakenteiden U-arvot			
Ulkoseinä	W/(m²K)	0,19	0,39
Ulkoseinä, kellari	W/(m²K)	0,17	0,17
Yläpohja	W/(m²K)	0,09	0,097
Alapohja	W/(m² K)	0,16	0,16
Ovet	W/(m² K)	1,00	1,00
Ikkunat	W/(m² K)	1,00	1,00
Ikkunoiden ominaisuuksia			
Lasin U-arvo	W/(m²K)	0,90	0,90
Karmiosan U-arvo	W/(m²K)	2,00	2,00
Umpiosan osuus ikkunasta		0,10	0,10
Ikkunoiden g-arvo		0,54	0,54
Laitteet, IV			
IV-koneen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde	%	55	55
Tuloilman lämpötilan asetusarvo	°C	18	18
Ominaisrähköteho/SFP-luku	kW/m³/s	1,8	1,8
Jäteilman minimilämpötila	°C	3	3
Vakioilmavirta, opetusrakennus	dm³/(s m²)	3	3
Lämmitysmuoto		Kaukolämpö	Kaukolämpö

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

3.2 Vertailu 1: pieni betonikoulu verrattuna samankokoiseen puukouluun

Ensimmäisen vertailuparin muodostavat pieni betonirunkoinen koulurakennus sekä samankokoinen pieni puurunkoinen koulurakennus (Kuva 3). Ensimmäistä vertailuparia varten Tesoman koulun geometriasta on pienennetty versio yhtä L-mallista siipeä käyttäen. Vertailtavana pinta-alana on käytetty lämmitettyä nettoalaa (2412 m²) ympäristöministeriön menetelmän mukaisesti.



Kuva 3. Vertailtavien rakennusten havainnekuvat: pohjan jalanjälki ja perspektiivipiirros.

Taulukko 3. Laajuustiedot vertailulle 1.

Laajuustiedot			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu, pieni	Puukoulu, pieni
Lämmitetty nettoala	m ²	2 412	2 412
Kerrosala	m ²	2 597	2 550
Tilavuus	m ³	10 655	10 483
Geometria		Piirustusten mukaan	Piirustusten mukaan
Kerroksia	kpl	2	2

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

3.2.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälkilaskennan tulokset muodostuvat eritellyistä energialaskennan tuloksista sekä koko elinkaaren hiilijalanjälkilaskennan tuloksista. Tuloksista on eritelty myös hiilikädenjälki, joka muodostuu tässä vertailussa materiaalien uudelleenkäytöstä sekä rakennusmateriaaleihin sitoutuneesta eloperäisestä hiilestä. Puupohjaisissa tuotteissa eloperäisen hiilen määräksi on arvioitu 50% puun kuivapainosta Ympäristöministeriön menetelmän mukaisesti.

Energialaskennan tulokset (Taulukko 4) toimivat syötteenä koko elinkaaren hiilijalanjäljen laskentaa varten.

Taulukosta 4 ja Kuvasta 4 nähdään, että pienen puukoulun energiatehokkuus (E-luku) on heikompi kuin pienen betonikoulun. Puukoulun E-luku on 5 % suurempi ja ostoenergiankulutus 8 % suurempi kuin betonikoululla. Tämä johtuu pääosin puurakennuksen heikommista ulkoseinän U-arvoista.

Taulukko 4. Energialaskennan tulokset vertailuparille 1.

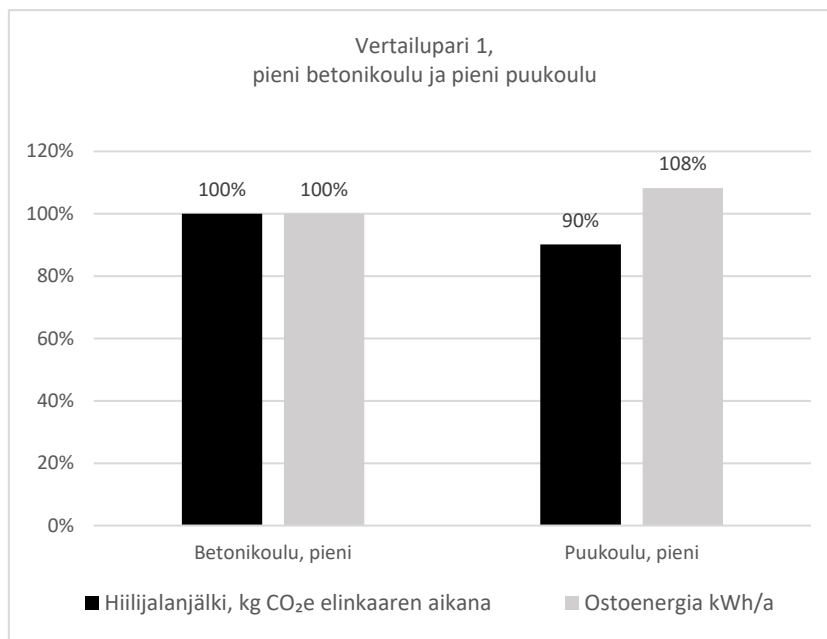
Käytön aikainen energia			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu, pieni	Puukoulu, pieni
E-luku	kWh/(m ² a)	98	103
E-luku, betoni vs. puu	%	100 %	105 %
Kaukolämpö, lämmitys ja LKV	kWh/a	203 327	229 456
Kaukokylmä	kWh/a	21 857	22 942
Kaukolämpö yhteensä	kWh/a	225 184	252 398
Sähkö	kWh/a	106 024	105 996
Ostoenergia yhteensä	kWh/a	331 208	358 394
Ostoenergia / m ² /a	kWh/m ² /a	137	149
Sähkön osuus ostoenergiasta	%	32 %	30 %
Ostoenergia betoni vs. puu	%	100 %	108 %

Hiilijalanjälkilaskennan tulokset on esitetty Taulukossa 5 ja Kuvassa 4. Paremmasta energiatehokkuudesta huolimatta pienen betonikoulun kokonaishiilijalanjälki on 50 vuoden arviointijaksolla noin 10 % suurempi kuin puukoululla.

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Taulukko 5. Hiilijalanjälkilaskennan tulokset vertailuparille 1.

Hiilijalanjälki			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu, pieni	Puukoulu, pieni
hiilijalanjälki kg CO ₂ e /m ² /a	kg CO ₂ e /m ² /a	16,96	15,30
Hiilikädenjälki kg CO ₂ e /m ² /a	kg CO ₂ e /m ² /a	-3,90	-12,42
Hiilijalanjälki kg CO ₂ e /m ² tarkastelujakson aikana	kg CO ₂ e /m ²	848	765
Hiilijalanjälki kg CO ₂ e tarkastelujakson aikana	kg CO ₂ e	2 046 000	1 845 000
Hiilijalanjälki, kg CO ₂ e betoni vs. puu	%	100 %	90 %

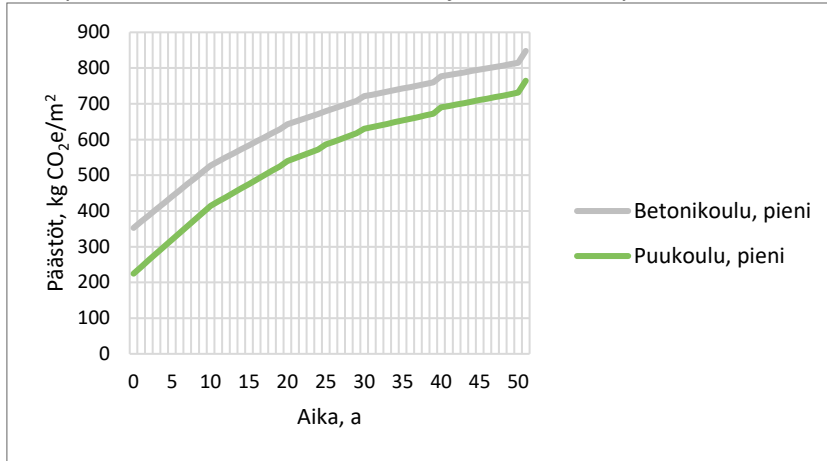


Kuva 4. Tulokset vertailuparille 1.

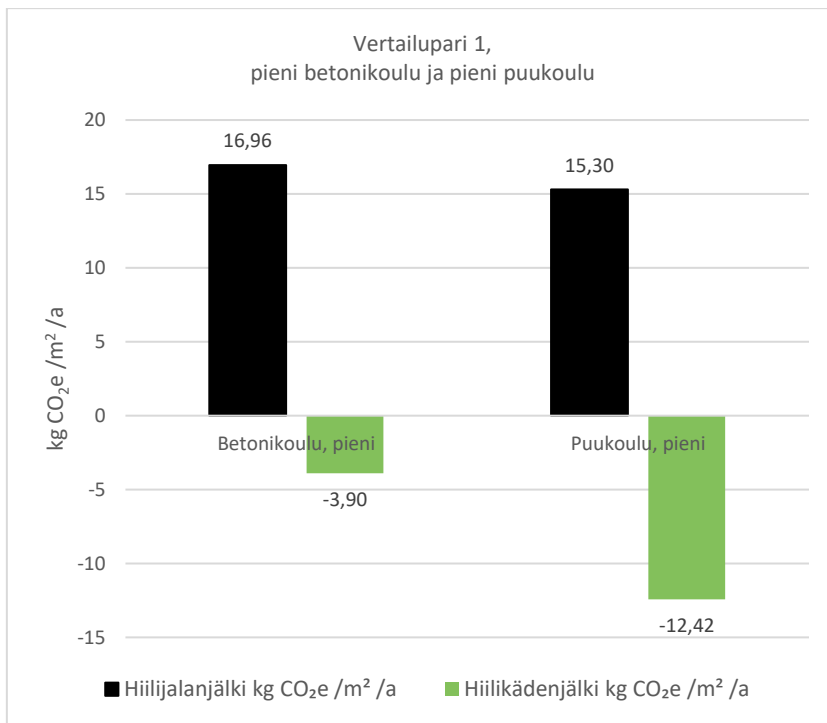
Kun tarkastelujakson aikaisia päästöjä tarkastellaan ajan funktiona, huomataan että betonikoulun ja puukoulun päästötasot ovat kauimpana toisistaan arviointijakson alkupuolella ja lähenevät toisiaan arviointijakson loppupuolelle tultaessa (Kuva 5). Ero pienen puukoulun ja pienen betonikoulun tuote- ja rakentamisvaiheen (A1-A5) välillä on n. 36 %. Betonikoulun paremmasta energiatehokkuudesta huolimatta kuvaajat eivät saavuta toisiaan tarkastelujakson (50 vuotta) aikana, puukoulu säilyy siis vähähiilisempänä vaihtoehtona koko arviointijakson ajan. Pienen puukoulun päästöistä vain n. 30 % muodostuu tuote- ja rakentamisvaiheista, n. 66 % muodostuu käyttövaiheesta ja 4 % purkuvaiheesta.

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Pienen betonikoulun hiilijalanjäljestä puolestaan 41 % muodostuu tuote- ja rakentamisvaiheista ja 55 % käytön aikana ja 4 % käytöstä poistettaessa. Pienen puukoulun hiilikädenjälki on merkittävästi suurempi kuin pienen betonikoulun. Hiilikädenjälki on esitetty miinusmerkkisenä, Taulukossa 5 ja Kuvassa 7.



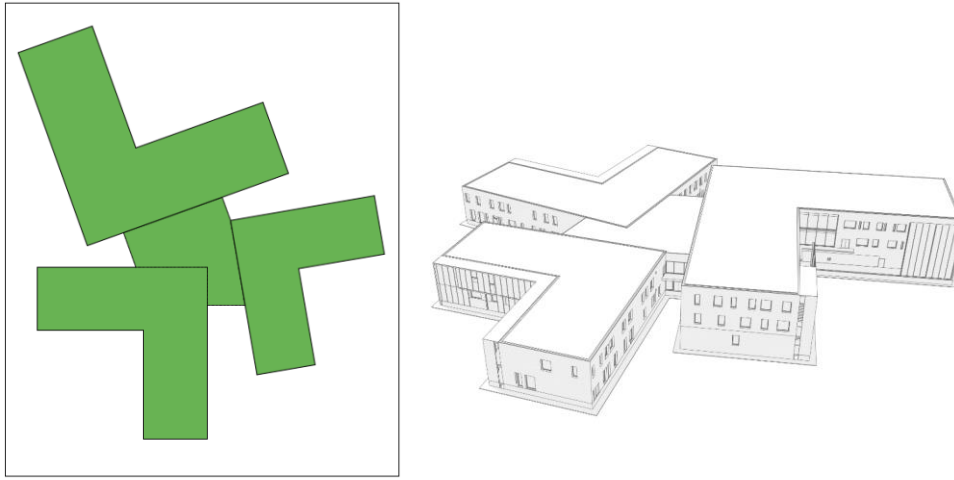
Kuva 5. Hiilijalanjälki ajan funktiona: pieni betonikoulu ja pieni puukoulu.



Kuva 6. Hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki, vertailupari 1.

3.3 Vertailu 2: Iso betonikoulu ja samankokoinen puukoulu

Toisessa vertailuparissa tarkastelun kohteena ovat neljä kertaa niin suuri rakennus kuin ensimmäisessä vertailuparissa, sen lämmitetty nettoala on 9648 m². Vertailupari on muodostettu saman esimerkkirakennuksen perusteella kuin ensimmäinenkin vertailupari, samoin rakenteet ovat kuten vertailuparissa 1 (Taulukko 1 ja Taulukko2). Laajuustiedot on annettu Taulukossa 6.



Kuva 7. Vertailtavien rakennusten havainnekuvat: pohjan jalanjälki ja perspektiivipiirros. Vertailupari 2.

Taulukko 6. Laajuustiedot vertailuparille 2.

Laajuustiedot			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu, iso	Puukoulu, iso
Lämmitetty nettoala	m ²	9648	9648
Kerrosala	m ²	10284	10117
Tilavuus	m ³	41746	41137
Geometria		Piirustusten mukaan	Piirustusten mukaan
Kerroksia	kpl	3	3

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

3.3.1 Hiilijalanjälki

Hiilijalanjälkilaskennan tulokset muodostuvat energialaskennan tuloksista sekä koko tarkastelujakson hiilijalanjälkilaskennan tuloksista kuten vertailuparissa 1. Energialaskennan tulokset on esitetty Taulukossa 7. Vertailtavien rakennusten E-lukujen ero on samansuuntainen kuin vertailuparissa 1. Ison puukoulun E-luku on 4 % suurempi kuin ison betonikoulun ja ison puukoulun ostoenergiankulutus on 7 % suurempi kuin betonikoululla. Ensimmäiseen vertailupariin verrattuna huomataan, että suuremmalla rakennuksella saavutetaan helpommin parempi E-luku.

Taulukko 7. Energialaskennan tulokset vertailuparille 2.

Käytön aikainen energia			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu, iso	Puukoulu, iso
E-luku	kWh/(m ² a)	95	99
E-luku, betoni vs. puu	%	100 %	104 %
Kaukolämpö, lämmitys ja LKV	kWh/a	777 866	865 116
Kaukokylmä	kWh/a	43 200	46 504
Kaukolämpö yhteensä	kWh/a	821 066	911 620
Sähkö	kWh/a	423 142	911 620
Ostoenergia yhteensä	kWh/a	1 244 208	1 334 642
Ostoenergia / m ² /a	kWh/m ² /a	129	138
Sähkön osuus ostoenergiasta	%	34 %	32 %
Ostoenergia betoni vs. puu	%	100 %	107 %

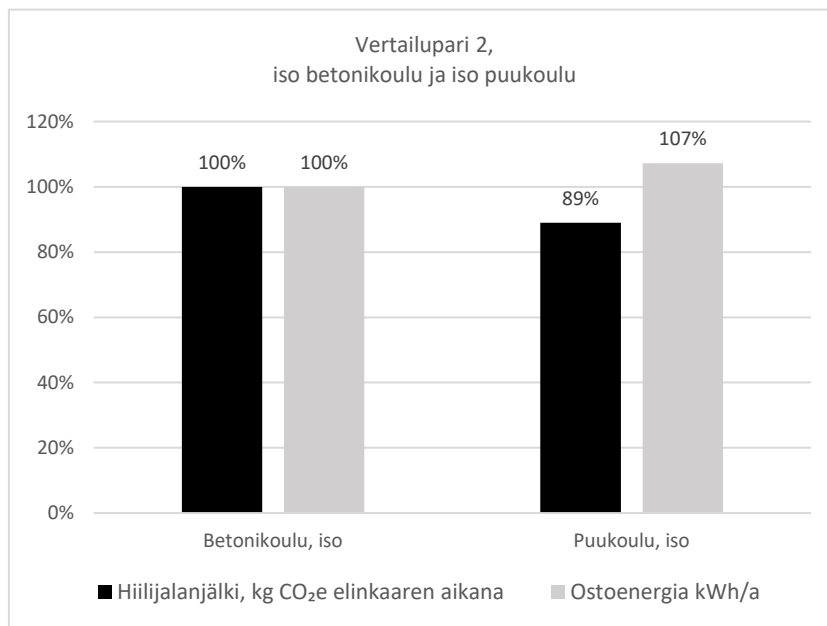
Hiilijalanjäljen laskennan tulokset on esitetty Taulukossa 8 ja Kuvassa 8. Ison puukoulun kokonaishiilijalanjälki on 50 vuoden arviointijaksolla noin 10 % pienempi kuin ison betonikoulun.

Tässä vertailussa materiaalien osuus muodostaa betonikoulussa 37 % koko elinkaaren päästöistä. Betonikoulun tuotevaiheen materiaalien päästöistä yli 60 % muodostuu betonirungosta ja n. 4 % kivivillaeristeestä, muiden materiaalien jäädessä kunkin alle 3 % osuuteen. Isossa puukoulussa materiaalien osuus on n. 23 % kokonaisuudesta, joista suurin osuus (30 %) muodostuu betonista, CLT :stä 12 % ja kalkkihiekkaharkoista märkätilojen väliseinissä 5 %.

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Taulukko 8. Hiilijalanjälkilaskennan tulokset vertailuparille 2.

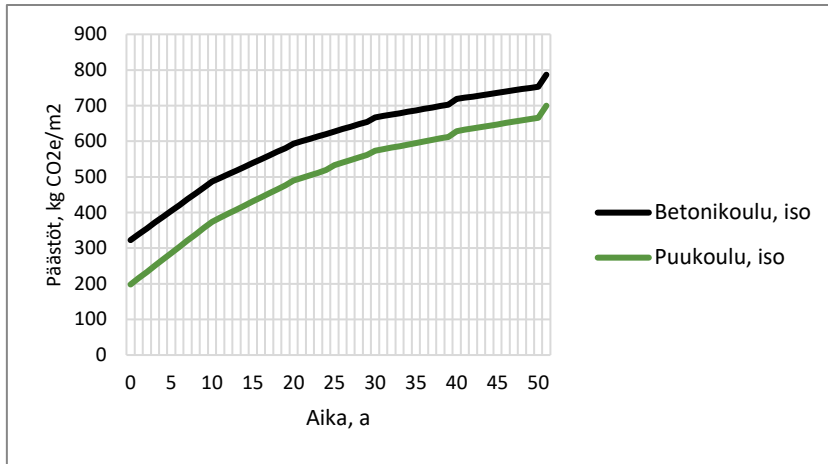
Hiilijalanjälki			
Nimi ja kuvaus	Yksikkö	Betonikoulu, iso	Puukoulu, iso
hiilijalanjälki kg CO ₂ e /m ² /a	kg CO ₂ e /m ² /a	15,74	14,00
Hiilikädenjälki kg CO ₂ e /m ² /a	kg CO ₂ e /m ² /a	-2,98	-11,46
Hiilijalanjälki kg CO ₂ e /m ² tarkastelujakson aikana	kg CO ₂ e /m ²	787	700
Hiilijalanjälki kg CO ₂ e tarkastelujakson aikana	kg CO ₂ e	7 593 000	6 753 000
Hiilijalanjälki, kg CO ₂ e betoni vs. puu	%	100 %	89 %



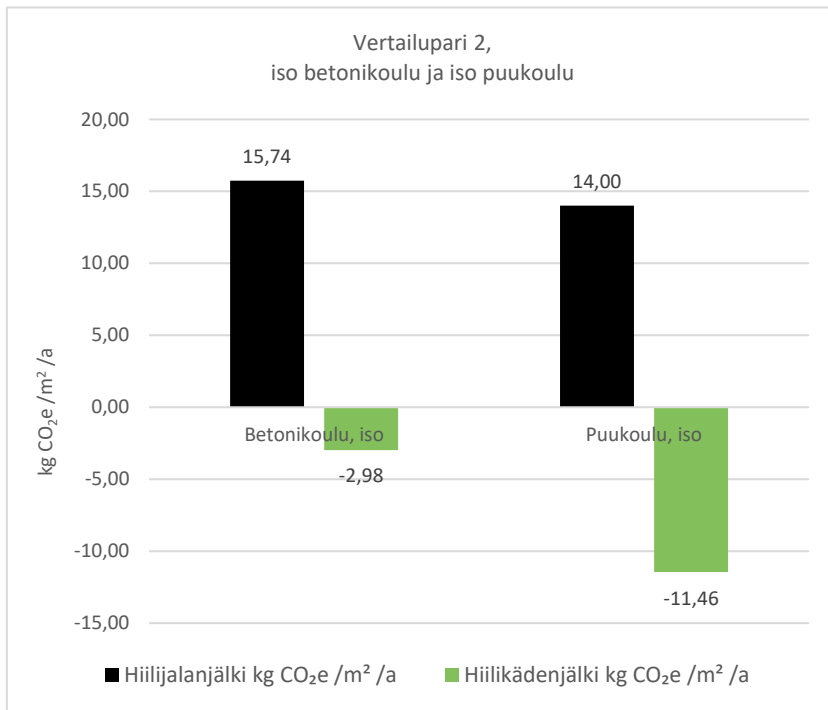
Kuva 8. Hiilijalanjälki ja ostoenergia vertailuparissa 2, iso betonikoulu ja iso puukoulu.

Kuten vertailussa 1, myös vertailussa 2 betonikoulun ja puukoulun päästötasot ovat kauimpana toisistaan arviointijakson alkupuolella ja lähenevät toisiaan arviointijakson loppupuolelle tultaessa (Kuva 9). Ero ison puukoulun ja ison betonikoulun tuote- ja rakentamisvaiheen välillä on 39%. Ison puukoulun päästöistä n. 28 % muodostuu tuote- ja rakentamisvaiheista, n. 67 % käyttövaiheesta ja 5 % purkuvaiheesta. Ison betonikoulun hiilijalanjäljestä puolestaan 41 % muodostuu tuote- ja rakentamisvaiheista ja 55 % käytön aikana ja 4 % käytöstä poistettaessa. Ison puukoulun hiilikädenjälki on merkittävästi suurempi kuin ison betonikoulun. Hiilikädenjälki on esitetty tässä esitetty miinusmerkkisenä, Taulukossa 8 ja Kuvassa 10.

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta



Kuva 9. Hiilijalanjälki ajan funktiona: iso betonikoulu ja iso puukoulu



Kuva 10. Hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki, vertailupari 2.

3.4 Pohdinta ja tarkasteluja erilaisilla eristysratkaisuilla

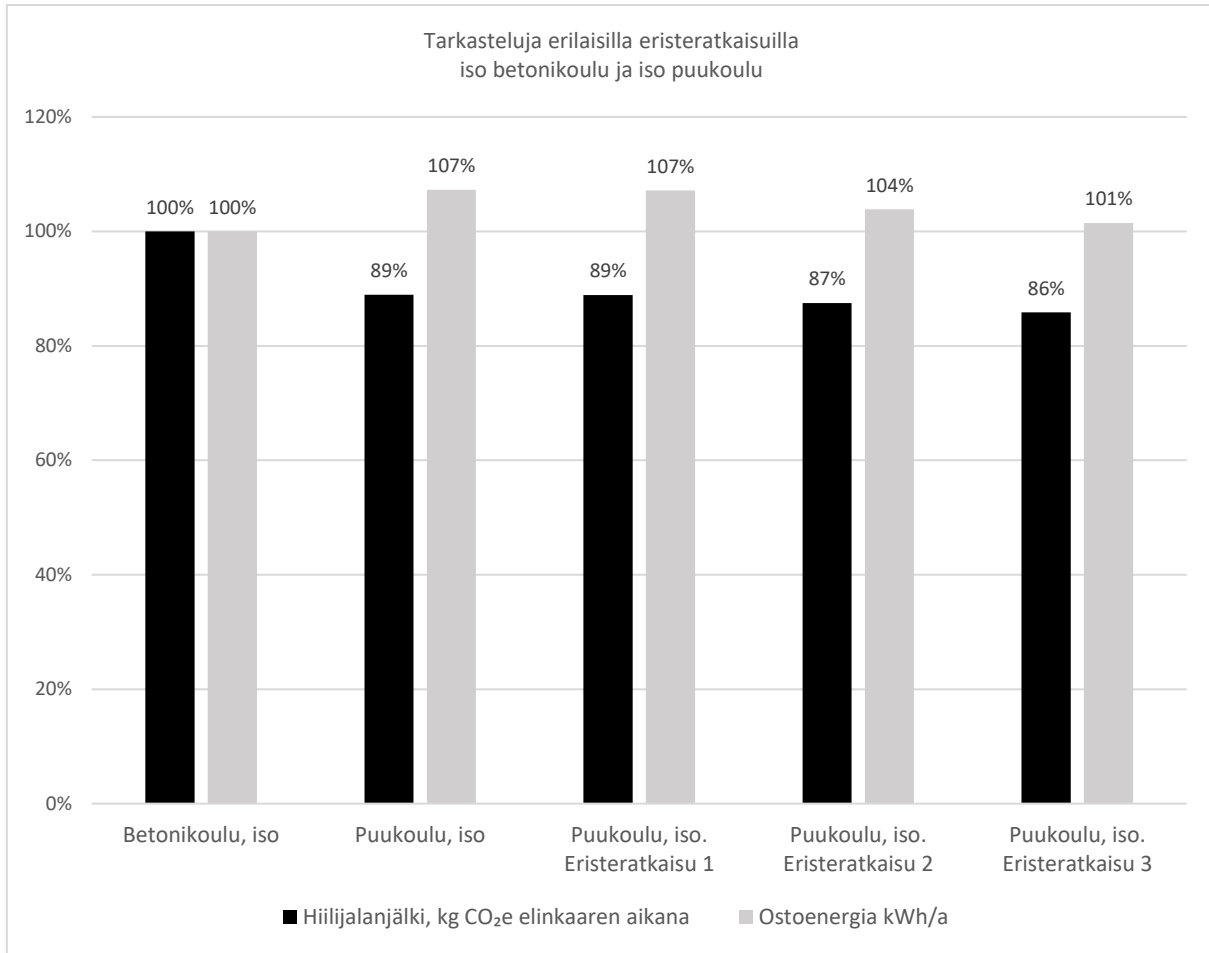
Energiatehokkuus on merkittävässä osassa hiilijalanjäljen muodostumisessa, siitäkin huolimatta, että sähkön ja kaukolämmön päästöjen oletetaan ympäristöministeriön laskentamenetelmässä vähenevän asteittain tarkastelujakson aikana. Tapauksille tehtiin kolme erilaista lisätarkastelua, joissa isoon puukouluun lisättiin lämmöneristettä yläpohjaan, ulkoseiniin ja sekä ulkoseiniin että yläpohjaan. Lisätarkastelun laskentatulokset on esitetty Kuvassa 11.

Puukoulussa ulkoseiniin valittiin massiivipuinen rakennetyyppi, jonka U-arvo on merkittävästi betonirakennuksen U-arvoa heikompi (0,39 W/m²K). Myös yläpohjan U-arvo on hieman heikompi (0,097 W/m²K) kuin betonirakenteisella koululla. Jotta puukoulun yläpohjan U-arvoksi saadaan sama kuin betonirakennuksessa (0,09 W/m²K), lisättiin lisätarkastelussa 1 yläpohjaan puukuitueristettä 20 mm. Tämä pienentäisi ostoenergiankulutusta vuositasona vain 0,1 %. Materiaalin lisääminen taas kasvattaisi hieman hiilijalanjälkeä tarkastelujakson aikana. Vaikka vuosittainen energiankulutuksen pieneneminen huomioidaan koko 50 vuoden tarkastelujakson ajan, ison puurakennuksen hiilijalanjälki pienenesi vain 0,1 %. Tämä ei muuttaisi ison puukoulun ja ison betonikoulun hiilijalanjäljen välistä eroa (11%).

Toinen lisätarkastelu tehtiin lisäämällä 50 mm tuulensuojamineraalivillaa puukoulun ulkoseiniin, jolloin rakenteen U-arvoksi saatiin 0,27 W/m²K. Tämä pienentäisi puukoulun laskennallista ostoenergiankulutusta hieman yli 3 % vuodessa. Materiaalin lisääminen taas kasvattaisi rakennuksen hiilijalanjälkeä 0,6 % tarkastelujakson aikana. Kun vuosittainen energiankulutuksen pieneneminen huomioidaan koko tarkastelujakson ajan, ison puurakennuksen hiilijalanjälki pienenesi n. 2 %. Tämä kasvattaisi ison puukoulun ja ison betonikoulun hiilijalanjäljen välistä eroa 13 prosenttiin.

Kolmas lisätarkastelu tehtiin lisäämällä yläpohjaan 20 mm puukuitueristettä kuten lisätarkastelussa 1 ja ulkoseiniin 25 mm:n tuulensuojalevy sekä 100 mm puukuitueristettä. Näillä rakenteilla saavutettiin suurin piirtein samat U-arvot kuin betonikoululla, ulkoseinillä 0,19 W/m²K ja yläpohjalla 0,09 W/m²K. Tämä pienentäisi puukoulun laskennallista ostoenergiankulutusta n. 8 % vuodessa. Kun materiaalin lisääminen sekä vuosittainen energiankulutus huomioidaan koko tarkastelujakson ajan, ison puukoulun hiilijalanjälki pienenesi 3,5 %. Tämä kasvattaisi ison puukoulun ja ison betonikoulun hiilijalanjäljen välistä eroa 14 prosenttiin (86 % betonikoulun hiilijalanjäljestä).

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

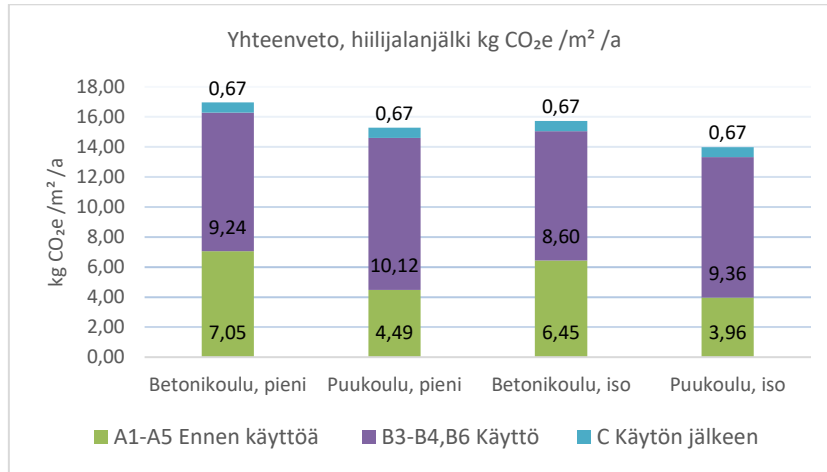


Kuva 11, Tarkasteluja erilaisilla eristeratkaisuilla 1-3, Iso betonikoulu ja iso puukoulu

Rakennuksen energiatehokkuuteen vaikuttavia, yksittäisiä tekijöitä on satoja ja kun huomioidaan rakennusmassan geometrian ja suuntauksen vaikutukset voidaan puhua loputtomasta määrästä muuttujia. Pienten yksityiskohtien, kuten rakennusosien välisten kylmäsiltojen tai käytetyn ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen merkitys kasvaa hiilijalanjälkitarkastelussa, kun vuosittainen energiankulutus vaikuttaa hiilijalanjälkeen 50 vuoden ajan. Myös materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa tuloksiin. Tässä vertailussa esimerkiksi betoniset ulkotasot ja teräsritilät olisi voitu tehdä puusta, jolloin puukoulun hiilijalanjälki olisi edelleen pienempi. Vastaavasti betonikoulussa voitaisiin käyttää vähäpäästöisempiä materiaaleja sekä energiatehokkuutta parantavia ratkaisuja.

4 Tulosten yhteenveto ja johtopäätökset

Betonikoulussa energiankulutus tarkastelujakson (50 vuotta) aikana muodostaa hiilijalanjäljestä hieman yli puolet, rakentaminen vajaan toisen puolen ja purkaminen loput. Puukoulussa energiankulutus tarkastelujakson aikana muodostaa hiilijalanjäljestä noin 2/3 (isossa koulussa käyttö 66 %), rakentaminen 1/3 (ennen käyttöä 29 %) ja purkaminen loput (käytön jälkeen 5 %).



Kuva 12. Hiilijalanjäljen jakautuminen eri elinkaaren vaiheisiin

Betonikoulussa rakennusmateriaaleista eniten hiilijalanjälkeen vaikuttaa betoni, jonka osuus on yli 60 % kokonaisuudesta. Seuraavaksi eniten hiilijalanjälkeen vaikuttaa kivivillaeriste (4 %). Muut materiaalit jäävät alle 3 % osuuteen. Puukoulussa rakennusmateriaaleista eniten hiilijalanjälkeen vaikuttaa myös betoni, jonka osuus on n. 30 % kokonaisuudesta, toiseksi eniten päästöjä aiheuttaa CLT (12 %) ja kolmanneksi kalkkihiekkatiilet (5 %). Tässä tutkimuksessa tarkastellun kahden vertailukelpoisen tapauksen perusteella voidaan todeta, että hiilijalanjäljen näkökulmasta puukoulu on betonikoulua parempi vaihtoehto. Puukoululla on n. 10 % betonikoulua pienempi hiilijalanjälki sekä lisäksi merkittävästi suurempi hiilikädenjälki. Puukoulu on vähähiilisempi neliötä kohden sekä pienessä että suuressa koulussa, vaikka betonikoulun energiatehokkuus on puukoulua parempi. Energiatehokkuudella on kuitenkin tuloksiin suuri merkitys. Kun tarkastellaan hiilijalanjälkeä neliötä kohden, on isompi rakennus pienempää parempi ratkaisu, kun vertailtavat rakennusmateriaalit ja muut muuttujat pidetään vakioina.

5 Lähteet

European Committee for Standardization. (2012). Sustainability of construction works. Assessment of buildings. Part 2: Framework for the assessment of environmental performance (EN 15643-2).

Huuhka, S., Vainio, T., Moisio, M., Lampinen, E., Knuutinen, M., Bashmakov, S., Köliö, A., Lahdensivu, J., Ala-Kotila, P. & Lahdenperä, P. (2021). Purkaa vai korjata? Hiilijalanjälkivaikutukset, elinkaarikustannukset ja ohjauskeinot (Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:9). Helsinki: Ympäristöministeriö.
<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-221-1>

Kuittinen, M. (Toim.). (2019). Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä (Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22). Helsinki: Ympäristöministeriö. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>

Rakennustieto. (2008). *Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot* (RT 18-10922). Helsinki: Rakennustietosäätiö RTS.

Ympäristöministeriön asetus 1010/2017 uuden rakennuksen energiatehokkuudesta.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

6 Liitteet

6.1 Liite 1. Rakennetyypit

Betonikoulu		Puukoulu	
US1	U-arvo 0,19 W/(m²K)	US1	U-arvo 0,39 W/(m²K)
35 mm	Tiililaatta	28 mm	Puuverhous
65 mm	Betoni	22 mm	Tuuletusrako
220 mm	Mineraalivilla	22 mm	Ristiin koolaus
180 mm	Kantava rakenne, Betoni	280 mm	Kantava rakenne, CLT
500 mm		352 mm	
		US1_eristeratkaisu 2	U-arvo 0,27 W/(m²K)
		28 mm	Puuverhous
		22 mm	Tuuletusrako
		22 mm	Ristiin koolaus
		50 mm	Tuulensuoja mineraalivilla
		280 mm	Kantava rakenne, CLT
		402 mm	
		US1_eristeratkaisu 3	U-arvo 0,19 W/(m²K)
		28 mm	Puuverhous
		22 mm	Tuuletusrako
		22 mm	Ristiin koolaus
		25 mm	Tuulensuojalevy
		100 mm	Puukuitueriste
		280 mm	Kantava rakenne, CLT
		477 mm	
US2 (lasiseinä)	U-arvo 0,17 W/(m²K)	US2 (lasiseinä)	U-arvo 0,17 W/(m²K)
20 mm	Alumiinikasetti	kuten betonirakennuksessa	
110 mm	Teräspilari, EPS eriste		
20 mm	Kuitusementtilevy		
150 mm			
US3	U-arvo 0,19 W/(m²K)	US3	U-arvo 0,39 W/(m²K)
	Maali	kuten puukoulun US1	
80 mm	Betoni		
220 mm	Mineraalivilla		
180 mm	Betoni		
480 mm			

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

Betonikoulu		Puukoulu	
US4 (sokkeli)	U-arvo 0,17 W/(m²K)	US4 (sokkeli)	U-arvo 0,17 W/(m²K)
	Bitumikermi		kuten betonirakennuksessa
80 mm	Betoni		
220 mm	EPS eriste		
220 mm	Betoni		
<hr/>			
521 mm			
US5 (VSS)		US5 (VSS)	
	Maali		kuten betonirakennuksessa
80 mm	Betoni		
220 mm	Mineraalivilla		
300 mm	Betoni		
<hr/>			
600 mm			
YP1	U-arvo 0,09 W/(m²K)	YP1	U-arvo 0,097 W/(m²K)
7 mm	Vedeneristys kumibitumikermi	7 mm	Vedeneristys kumibitumikermi
23 mm	Ponttilaudoitus 23mm	23 mm	Ponttilaudoitus 23mm
150 mm	Kattoristikot k900	50 mm	Ruoteet
200 mm	Tuulettuva ilmatila	110 mm	Tuulettuva ilmatila
450 mm	Mineraalivilla	40 mm	Tuulensuojamineraalivilla
0,5 mm	Höyrynsulku bitumikermi	480 mm	Liimapuupalkit k900 ja puukuitueriste
320 mm	Ontelolaatta	0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
<hr/>		44 mm	Ristiin koolaus
1155 mm		13 mm	Kipsilevy
		<hr/>	
		719 mm	
		YP1_ eristeratkaisu 1 ja 3	U-arvo 0,09 W/(m²K)
		7 mm	Vedeneristys kumibitumikermi
		23 mm	Ponttilaudoitus 23mm
		50 mm	Ruoteet
		110 mm	Tuulettuva ilmatila
		40 mm	Tuulensuojamineraalivilla
		500 mm	Liimapuupalkit k900 ja puukuitueriste
		0,2 mm	Höyrynsulkumuovi
		44 mm	Ristiin koolaus
		13 mm	Kipsilevy
		<hr/>	
		7399 mm	
AP1	U-arvo 0,16 W/(m²K)	AP1	U-arvo 0,16 W/(m²K)
15 mm	Tasoite		kuten betonirakennuksessa
80 mm	Betonilaatta		
150 mm	EPS eriste		
	Suodatinkangas		
300 mm	Hiekka		
300 mm	Sora		
<hr/>			
Betonikoulu		Puukoulu	

Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

AP2 (VSS)	
15 mm	Tasoite
70 mm	Betonilaatta
200 mm	Betonilaatta
150 mm	EPS eriste
	Suodatinkangas
300 mm	Hiekka
300 mm	Sora

AP2 (VSS)	
kuten betonirakennuksessa	

VP1	
5 mm	Muovimatto
15 mm	Tasoite
70 mm	Betonilaatta
370 mm	Ontelolaatta

VP1	
5 mm	Muovimatto
15 mm	Tasoite
260 mm	CLT välipohjalaatta

VP2, VSS	
5 mm	Muovimatto
15 mm	Tasoite
80 mm	Betoninen pintalaatta
50 mm	EPS eriste
1550 mm	Sepeli
400 mm	Betoni

VP2, VSS	
kuten betonirakennuksessa	

VP3, märkätilat	
	Laatoitus
	Vedeneristys
40 mm	Tasoite ja kallistusvalu
	Kuin VP1

VP3, märkätilat	
kuten betonirakennuksessa	

VS1	
13 mm	Kipsilevy
95 mm	Teräsrankarunko, mineraalivilla
13 mm	Kipsilevy
<hr/>	
121 mm	

VS1	
120 mm	CLT -väliseinä

VS2, Märkätilat	
	Tasoite
130 mm	Kahi -tiili
	Tasoite

VS2, Märkätilat	
kuten betonirakennuksessa	

VS3, kantava	
200 mm	Betoni

VS3, kantava	
kuten betonirakennuksessa	

VS4, VSS	
300 mm	Betoni

VS4, VSS	
kuten betonirakennuksessa	

Betonikoulu	Puukoulu
-------------	----------



Betonikoulun ja puukoulun vertailu – tarkasteluja hiilijalanjäljen näkökulmasta

24

Pilari 1	500x500 mm 380x380 mm	Betonipilarit Betonipilarit
Pilari 2 ja 3		Teräspilarit
Palkki 1	200x500 mm	Betonipalkki
Ikkuna 1		U-arvo 1,0 W/(m ² K) Kolmilasinen MSE ikkuna
Ikkuna 2		U-arvo 1,0 W/(m ² K) Kolmilasinen MEK lasiseinä
Sisäikkuna 1		Kaksilasinen sisäikkuna
Ulko-ovi 1		U-arvo 1,0 W/(m ² K) Lämpöeristetty puuovi
Väliovi 1		Puuovi
Parvekelaatat ja ulkotasot	15 mm 50 mm 6,9 mm 200 mm 20 mm	Tasoite Betonilaatta Bitumikermi Kantava betonilaatta Rappaus
Lämmitys		Lämmönjakoverkosto ja lämmönjakokeskus
Vesi- ja viemäri		Vesijohtojärjestelmä
Ilmanvaihto		Ilmanvaihtojärjestelmä
Sähkö		Sähköasennukset ja kaapeloinnit
Sprinklaus		Ei sprinklausta

Pilari 1	190x360 mm	Liimapuupilarit
Pilari 2 ja 3		kuten betonirakennuksessa
Palkki 1	190x495 mm	Liimapuupalkki
Ikkuna 1		kuten betonirakennuksessa
Ikkuna 2		kuten betonirakennuksessa
Sisäikkuna 1		kuten betonirakennuksessa
Ulko-ovi 1		kuten betonirakennuksessa
Väliovi 1		kuten betonirakennuksessa
Parvekelaatat ja ulkotasot		kuten betonirakennuksessa
Lämmitys		kuten betonirakennuksessa
Vesi- ja viemäri		kuten betonirakennuksessa
Ilmanvaihto		kuten betonirakennuksessa
Sähkö		kuten betonirakennuksessa
Sprinklaus		Puukoulussa sprinklaus