

Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledž  
Keskkonnakaitse õppetool

**ROHTSE BIOMASSI ENERGEETILISE KASUTAMISE  
VÕIMALUSED**

**Magistritöö tööstusökoloogia erialal**

**Karmen Kaldvee**

Juhendaja: Prof. Mari Ivask

Kaasjuhendaja: MSc. Jane Peda

Tartu 2014

## **Autorideklaratsioon**

Deklareerin, et käesolev magistritöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli magistrikraadi taotlemiseks ja selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

.

.....  
Kuupäev

.....  
Allkiri

# Sisukord

Sissejuhatus.....	8
1. Põhk.....	10
1.1 Põhu energeetiline aspekt.....	10
1.2 Põhu kasutamine ehituses.....	11
1.3 Näiteid põhu kasutusest.....	12
1.3.1 Maailmas.....	12
1.3.2 Eestis.....	14
2. Lahahein.....	15
2.1 Lahaheina energeetiline aspekt.....	15
2.2 Näiteid kasutusest.....	15
2.2.1 Eestis.....	15
3. Pilliroog.....	16
3.1 Pilliroo energeetiline aspekt.....	16
3.2 Pilliroo kasutamine ehituses.....	17
3.3 Näiteid pilliroo kasutusest.....	19
3.3.1 Maailmas.....	19
3.3.2 Eestis.....	20
4. Siidpööris.....	21
4.1 Siidpöörise energeetiline aspektidest.....	21
4.2 Näiteid Siidpöörise kasutamisest.....	22
5. Materjal ja meetodika.....	24
5.1 Katse materjal.....	24
5.2 Katse meetodika.....	24
6. Tulemused.....	26
6.1 Uuritava materjali omadused.....	26
6.1.1 Niiskusesisaldus.....	26
6.1.2 Tuhasisaldus.....	26
6.1.3 Kütteväärtus.....	27
6.1.4 Biomassi omaduste seos uuritava materjali päritoluga.....	28
6.2 Saagikus.....	31

6.2.1 Biomassi produktsioon.....	
6.2.2 Energeetiline produktsioon.....	
6.2.3 Põlemisprotsessi jääk -tuhk.....	
7. Arutelu.....	
7.1 Taimse biomassi omaduste ja energeetilise produktsiooni liikidevahelised erinevused.....	
7.2 Taimne biomass potentsiaalse energeetilise ressursina.....	
7.3 Perspektiivne energiataim - siidpööris.....	
7.4. Järeldused.....	
Kokkuvõte.....	
Summary.....	
Tänuõnad.....	
Kirjanduse nimestik.....	
Lisad.....	
Lisa 1.....	

## Sissejuhatus

Eesti kasutab energia tootmiseks peamiselt põlevkivi, mis on taastumatu ammenduv ressurss. Järjest enam räägitakse, et see maavara hakkab otsa saama ja tuleks leida võimalikke alternatiive. Põhilisteks taastuvateks energiaallikateks peetakse tuult, aga ka päikest, sest nende potentsiaalset räägitakse praegusel ajal kõige rohkem. Mere äärde on energia tootmiseks püstitatud mitmeid tuuleparke ning seda alternatiivi tahetakse veelgi laiendada. Praegu on küll tuuleenergia osakaal küllaltki väike, aga Eesti oludes peetakse seda olulisimaks variandiks energia tootmisel. Päikese kasutamist on hetkel rakendanud eratarbijad, kes kasutavad saadud energiat oma tarbeks. Viimasel ajal on näha juba küllaltki paljudel eramutel päikeseplatereisid katustel.

Eelpool nimetatud, hetkel peamistele lahendustele lisaks on olemas taimne biomass, millest oleks samuti võimalik toota energiat. Potentsiaalseteks alternatiivideks võiksid olla näiteks põhk (nisu, oder, rukis), luhahein ja pilliroog. Palju sellist materjali seisab kasutuseta ja lihtsalt kõduneb niisama, mis on ajal, kui otsitakse põlevkivile alternatiive, täiesti raiskamine. Luhaheinast ja pilliroost toodetakse energiat Lihula katlamajas, kuid enamus sellist materjali seisab ja sellele pole rakendust. Pilliroogu on varem laialdaselt kasutatud ehitusel, tänapäeval on selline tarbimisviis jäänud väheseks, kuigi on tehtud mitmesuguseid erinevaid katsetusi antud vallas.

Põhku kasutatakse vähesel määral põllumajanduses väetise – ja mulla struktuuri parandajana, kuid enamus sellest produktist on samuti ebavajalik.

Antud magistriöö eesmärgiks on uurida erinevate hetkel Eestis kasutuseta seisvate või mujal maailmas kõlapinda leidvate ning ökoehituseks sobivate taimsete materjalide energeetilisi omadusi.

Töö eesmärgi täitmiseks püstitati järgnevad uurimisülesanded:

- anda kirjanduse põhjal ülevaade põhu (nisu-, odra- ja rukkipõhk), luhahein, pilliroo, siidpöörise energeetilisest aspektist, kasutamisest ehituses ning tarbimisviisidest Eestis ja maailmas;
- leida põhu (nisu-, odra- ja rukkipõhk), luhaheina, pilliroo ja siidpöörise kütteväärtused ning nendes materjalides sisalduvad energiahulgad ühe hektari kohta, kolme erineva niiskusesisalduse ( kuivaine, alg- ja 20% niiskus ) juures;
- arutleda, kas põhku (nisu-, odra- ja rukki põhk), luhaheina ja pilliroogu oleks Eestis leiduvate koguste juures mõistlik kasutada energia tootmiseks ja ehituses või peaks otsima materjalile alternatiivset kasutusala;

- arutleda, kas Eestis oleks tasuv kasvatada siidpöörise bioenergia saamiseks.

# 1. Põhk

Põhk on kaun- ja teravilja ning seemneheina kasvatusel pärinev kõrvalsaadus, mis koosneb lehtedest, taimevartest, aganatest ja teradeta viljapeadest. Põhu kogus sõltub kasvatatava teravilja liigist, sordist ning ka ilmastikust. Suviviljadest saadav põhukogus on põudade tõttu tavaliselt väiksem, võrreldes talivilja omaga. Taliviljade puhul saadakse 100 kg teravilja kohta 35-53 kg põhku. 2011. aastal tekkis Eestis odrapõhku 197000 t, nisupõhku 237000 t (sellest 148000 t oli suvinisu ja 89000 t talinisu põhk) ning 24000 t rukkipõhku. Eesti Taimakasvatuse Instituudi andmetel on vaja 500 tonni põhu saamiseks teravilja kasvatada 125 ha (saagikus 4000kg/ha) või 275 ha (saagikus 1800kg/ha). Põhku saab koristada alates augusti keskpaigast, mil selle niiskusesisaldus jääb vahemikku 30-60%. 2011. aastal (novembris) oli ühe tonni põhu hind 43€ (ilma käibemaksuta) [1, 2, 3, 4].

## 1.1 Põhu energeetiline aspekt

Energeetilist aspektist vaadates on põhku võimalik kasutada tahke kütusena, kuid selle suur maht muudab transpordi ja ladustamine kalliks, mistõttu peaks tooraine pärinema võimalikult kasvatuskoha lähedalt, Kaljuste andmetel mitte kaugemalt kui 30 km. D. Kaljuste on oma töös küll vaadelnud lühaheina seost kaugusega, aga tema järeldused on kehtivad ka teist tüüpi biomassi puhul (ka põhud ja pilliroog.). Põhu kasutamise negatiivseks küljeks on asjaolu, et suitsugaasides sisalduvate kloori ja leelise tõttu võivad tekkida naatrium- ja kaaliumkloriid, mis on väga agressiivsed ja põhjustavad kateldes korrosiooni. Põhu kasutamise suurimaks plussiks on asjaolu, et see on CO<sub>2</sub> neutraalne kütus, mis ei põhjusta atmosfääris kasvuhoonegaaside sisalduse tõusu [3, 4, 5, 6].

Kütusena kasutatava põhu niiskusesisaldus ei tohi ületada 20%. Suure veesisalduse korral muutuvad põhupallid liiga raskeks, kütteväärtus on madalam, produkt säilib halvemini ning tõuseb korrosiooni moodustumise risk. Alla 15% niiskusesisaldusega (kuiva) põhu kütteväärtus on peaaegu võrdne puiduga. 2010. aasta andmete põhjal selgus, et 6 TJ põhu kütmisel saab toota umbes 4 TJ soojusenergiat [2, 3, 4].

Kuivatatud põhku saab kasutada biokütusena, kuid selleks on tarvis materjal enne eeltöödelda. Eeltöötlus hõlmab etappe, milleks võivad olla pallimine ning pressimine brikettideks või graanuliteks. Samuti on vaja teha lisainvesteeringuid, sest põhu põletamine nõuab spetsiaalseid kütteseadmeid. Põhk on peamiselt kasutusel kütusena üksikute farmide ja tootmishoonete kateldes, kaugkütte katlamajades ja suurtes elektrijaamades, aga tulevikus võib antud toorainet tõenäoliselt kasutada ka gaasi ja bioetanooli tootmisel. Põhk sobib hästi farmide soojaga varustamiseks, sest produkti saadakse kohalikult teraviljakasvatusest [2, 3, 4,

7].

Põhu põletamisel pallide kujul on kasutusel kolm tehnoloogiat [7, 8]:

- 1) tervete põhupallide põletamine, kui seade töötab tsükliliselt;
- 2) pallide purustamine enne koldesse minekut ja söötmine on automaatne (rakendatud näiteks Taanis, Leedus ja Lätis);
- 3) peenestamata põhupallide järjest koldesse liikumine – „sigari“- tüüpi.

Kõige enam on kasutust leidnud katlad, mille puhul põlemiskambrit täidetakse regulaarselt teatud perioodi järel põhupaki või – palliga.

Uued tehnoloogiad nagu pürolüüs ja teise generatsiooni biokütuste tootmine pakuvad uusi perspektiive andmaks põhule paindlikuma rolli tuleviku energiavarustuses, kombineerituna teiste taastuvate energiaallikatega, et rahuldada nõudlust kliimasõbralike kütuste järgi transpordisektoris [3].

## 1.2 Põhu kasutamine ehituses

Tänapäeval on põhk huvipakkuv ehitusmaterjal mitmel põhjusel. Esiteks, teraviljakasvatusega tegelevates piirkondades on põhk odav ja lihtsalt hangitav materjal, mida on võimalik ehitusotstarbel kasutada. Põhk on CO<sub>2</sub> - neutraalne ehitusmaterjal ja selle tootmine ja kasutamine ei põhjusta selliseid keskkonnamõjusid nagu puidu või muude materjalide tootmine ja kasutamine. Biomaterjalides sisalduv süsiniku kogus on suurem, kui CO<sub>2</sub> vabaneb toormaterjalide hankimisest, transpordist, töötlemisest ja jaotamisest. Kuigi süsinikdioksiidi vabaneb õhku taimede hävitamisest (lagunemine ja põletamine), siis nende kasutamisel ehituses lükatakse edasi CO<sub>2</sub> eraldumine, kogu konstruktsiooni elueaks. Samuti on teada, et tarbepuidu kvaliteet langeb, hinnad on prognoosimatud ning mõned tärned võivad tulevikus olla piiratud. Mainida tuleb ka seda, et paljudes piirkondades põletatakse põhku endiselt põldudel, tekitades seeläbi olulist õhusaastet [9, 10].

Põhu kõige otsesemaks kasutusviisiks ehituses on sellest valmistatud pallide rakendamine hoone konstruktsioonis. Põhupallidest ehitamisel on kaks peamist viisi: kasutamine kandva konstruktsioonina või täitematerjalina. Kandva konstruktsiooni korral laotakse põhupallidest seinad, mis peavad kandma ka katusekoormust. Sellisel viisil ehitatud hooned on tavaliselt limiteeritud ühe korrusega, suhteliselt vähese akende ja uste arvuga (need ei tohi moodustada üle 50% ühe seina pinnast), ruudu või ristküliku kujulised ning katusekoormus toetub kõigile seintele võimalikult võrdselt. Minimeeritud on puidu kasutus – puit on kasutusel vaid tugimaterjalina vaiade näol, mis pakkidest läbi rammitakse. Sellist konstrueerimisviisi tuntakse kui Nebraska stiili, sest see oli levinud antud piirkonna liivamägedes hilistel 1800-l ja varastel 1900-l, mil ehituseks vaja minevat puitu oli minimaalselt. Ka maailma vanim



kandvate seintega põhumaja on just Nebraskas – ehitatud aastal 1890. Põhku saab kasutada täitematerjalina, kui kandev konstruktsioon on toodetud puidust või metallist. Sellisel juhul ehitatakse valmis konstruktsioon ning põhk paigutatakse sinna vahele soojustus – ja täitematerjalina. Enamus Eestis olevatest põhumajadest on just nii ehitatud. Sellise konstruktsiooni eelisteks on väiksem põhupallide kindlustamise (tugevdamise) vajadus ja suurem disaini paindlikkus, näiteks saab ehitada keerukamate katustega kõrgemaid hooneid. Mõlema alternatiivi korral laotakse plokkidest/pallidest seinte sise- ja välisküljed, kaetakse krohvivõrgu või roomatiga ning krohvatakse savi või lubjapõhise kihiga [9].

Põhupallide teisteks konstruktsioonides kasutamiseviisideks on hübriidne lähenemine, mille puhul kasutatakse kahe eelneva elemente ning konstruktsioonimaterjalide sidumine savimördi abil nagu tehakse ka betoonplokkidega [9].

Kui jätta kõrvale pallid ja vaadata põhu kui biomaterjali muid ehituslikke rakendusi, siis näiteks Põhja-Ameerikas ja ka Saksamaal toodetakse kokkusurutud põhust ehituspaneele, mille rakendused ulatuvad siseseintest puitlaastplaatideni [9].

Põhupallide kasutamisel ehituses on mitmeid plusse: kuivamise ja kokkutõmbumisega seotud probleemide puudumine, väga hea isolatsiooni – ja tulekindlusomadused (tulekindlusklass R90) ning hoonete püstitamine on suhteliselt kiire, odav ja lihtne [11].

## **1.3 Näiteid põhu kasutusest**

### ***1.3.1 Maailmas***

Inglismaal kasutatakse odra ja (tali)nisu põhku loomade allapanuks ja söödaks. Osa talinisu põhku tükeldatakse ja küntakse tagasi mulda, et vähendada järgnevate põllukultuuride fosfaatide ja kaaliumi vajadust ning säilitada mulla niiskusesisaldust, struktuuri ja aidata õhutada pinnast. Liiga suure koguse põhu pinnasesse tagastamine vähendab mulla viljakust, sest see häirib mikroobikooslust [9, 12].

Saksamaal on levinud praktika, kus põhk pärast viljakoristust purustatakse ja laotatakse tagasi põllule. Samuti on üheks variandiks koristamine, misjärel põhk pallitakse ja kasutatakse loomakasvatuseks. Põllule jäetakse põhku nii palju, kui on vajalik mulla viljakuse tagamiseks. Põhu kasutamine sõltub ka sellest, millega antud piirkonnas tegeletakse, kas taimekasvatusega, loomakasvatusega või on regionis enamlevinud põllumajanduslik segatootmine. Kui loomakasvatusektoril on suurem osakaal, siis kulub palju põhku loomadele allapanuks. Loomakasvatusektori madala osakaalu korral aga sõltub huumuse taastootmine peamiselt taimejäänustes hulgast ja kvaliteedist. 1997 – 2007 aasta andmetel kulus Saksamaal loomakasvatuse tarbeks igal aastal umbes 15% põhku [13].

Ungaris korjatakse kokku alla 15% niiskusesisaldusega põhupallid, neilt eemaldatakse pealmine niiske kiht ning seejärel pressitakse materjal brikettideks, mille tihedus on 1,2 – 1,25 g/cm<sup>3</sup> ja kasutatakse energia tootmiseks [4].

Põhku kasutatakse ka šampinjonide kasvatamiseks vajaliku komposti valmistamisel või seenekasvatuse substraadina. Omaduste poolest kõige parem (sobivam) on nisupõhk, mis tagab kompostile piisavalt hea aeroobse struktuuri. Odrapõhk kipub kompostis tekitama anaeroobse keskkonna, sest vajub kokku. Rukkipõhu kompostimine võtab kõige kauem aega, sest see on vastupidavam lagundajate tegevusele. Põhust saavad seemed kasvamise jaoks põhilisi toitained ehk süsivesikuid. Põhku kasutatakse ka mõnede teiste seeneliikide kasvatamises, näiteks *Stropharia* ja austerservikud [14].

Taani on spetsialiseerinud põhu kasutamisele tsentraliseeritud soojuse ja elektrikoostootmisjaamadele. Alates 1980datest on rahastatud märkimisväärseid uuringuid, et arendada tehnoloogiat, mis muudab võimalikuks põhu kasutamise söekütteil töötavates tehastes ja seadmetes, ning luua ainult põhukütteil kombineeritud soojuse ja elektri koostootmisjaamasid. Taani kasutab igal aastal umbes 1,5 miljonit tonni põhku energia tootmiseks ja on antud valdkonnas seetõttu ka juhtivaks riigiks. Traditsiooniliselt kasutatakse väikesemahulisi põhukatlaid põllumajanduses ja keskmise suurusega katlaid kaugküttes. 2011. aastal oli Taanis käigus umbes 55 põhuküttega katlamaja, mille võimsused varieerusid 500 KW-st kuni 12 MW-ni. Üldiselt on väiksemamahuliste kütmete puhul põhk kõige kasutatavamaks rohtse biomassi liigiks Euroopas [3, 8, 15].

Taanis Køge pelletitehases toodetakse 60-730000 tonni põhupelletideid aastas. 2009. aasta novembris DONG Energy tütarfirma Inbicon avas tehase (ettevõtte) Taanis Kalundborgi lähedal, mis muudab igal aastal 30000 tonni põhku bioetanooliks, loomasöödaks ja kütusegraanuliteks. DONG Energy on Kalundborgis ehitanud suure gaasistamise tehase, kus põhk esiteks konverteeritakse gaasiks ning pärast seda põletatakse olemasolevas elektrijaamas [3].

Arengumaades ning odava tööjõu ja põhu kättesaadavusega riikides kasutatakse materjali laialdaselt ka katuste ehitamiseks [16].

### **1.3.2 Eestis**

2006. aastal pandi Tamsalu Kalor AS's tööle katel, millega hakati esimesena Eestis põhust tootma kaugküttesoojust. Ettevõtte klientideks on Tamsalu linnas ja Sääse alevikus elavad inimesed, keda varustatakse soojusega. Aastas kulub 300-400 tonni põhku, millest enamiku moodustab nisupõhk, toore saadakse lähedalasuvast farmist. Põhukatel on kasutusel lisa-, mitte põhikatlana ning see pannakse tööle suure koormusega talvisel kütteperioodil või vee

soojendamiseks suvisel ajal [2].

2010. aastast tegutseb Ida-Virumaal Iisakus OÜ Rivalette, mis tegeleb põhubriketi ja -pelletite tootmisega. Briketi saamiseks pressitakse purustatud põhk mehhaaniliselt kokku. Briketi kooshoidmiseks ei kasutata liimi ega muid kemikaale, vaid selle ülesande täidavad looduslikud vaigud, mida põhk sisaldab. Briketi kütteväärtus on 4,7MWh/t ja seda võib kasutada kütmiseks kõikides tahkekütuse põletamiseks mõeldud küttekolletes (sh. ahjud, pliivid, katlad jne). Nagu põhubriketi nii ka -pelleti tootmisel ei kasutata liime ja muid kemikaale. Põhupelletteid saab väga hästi kasutada loomadele allapanuks, sest nende imamis- ja paisumisvõime on väga hea ning nad suudavad niiskust imada 4-5 korda enam võrreldes kaaluga. Põhu ja puulaastudega võrreldes on tekkivate jäätmete hulk 60-70% väiksem ning biolagunevuse tõttu saab neid pärast kasutamist kompostida. Seeläbi saadakse 2-3 nädalaga väetis, mille kvaliteet on kõrge. Spetsiaalsetes kateldes (pellet- ja hakkpuidu katlad) saab põhupelletteid kasutada ka kütteks, sest produkti kütteväärtus 4,7 MWh/t on väga kõrge ja tonnist põhupelletitest saadav energiakogus on võrdväärne 3,5 m halupuudega. Antud ettevõtte toodetud põhubriketi ja -pelleti hinnaks on 140 €/t [17, 18].

## **2. Luhahein**

Luhahein kasvab lammidel ja jõeluhtadel, mis on regulaarset hooldust vajavad poollooduslikud kooslused. Looduskaitsealade kaitsekorralduskavad sätestavad poollooduslike koosluste iga-aastase niitmise või karjatamise. Niidetud hein viiakse luhalt ära ja ladestatakse. Luhahein sisaldab mitmesuguseid erinevaid taimeliike nagu näiteks tarn, päideroog, luhtkastevars, angervaks jne [2].

### **2.1 Luhaheina energeetiline aspekt**

Luhaheina aastane saagikus on lamminiitudel kuni 5,7t/ha (kuivaines). Liiga väikese toiteväärtuse tõttu ei oma luhahein nõudlust loomasöödana, mistõttu saaks seda kohalikul tasandil kasutada kütusena. See võimaldaks lahti saada ka keskkonnaprobleemist – kuhu panna luhtadelt hooldustööde käigus niidetud hein, mis praegu jäätmena ladustatakse [2].

2010. aastal kasutati Eestis kütteks 1100 tonni luhaheina ning see oli teine aasta, kui luhaheina kütteks tarbiti. See moodustab siiski niidetud luhaheinast väikese osa. 2010 aastal tarbiti Eestis soojusenergiaks 12,8 TJ luhaheina, millest soojusenergiat saadi 9,6 TJ. 2011. aasta novembrikuus oli ühe tonni luhaheina kokkuostuhind 41-42€/t (ilma käibemaksuta) [2].

### **2.2 Näiteid kasutusest**

#### ***2.2.1 Eestis***

Tänapäeval on luhtade niitmine ja heina ladustamine peamine luha hooldamise meetod. Luha hooldamiseks kasutatakse ka lihaveisetõuge, kes on vähenõudlikud ning elavad väljas aastaringselt (ka talvel) ja vajavad seejuures lisasööta minimaalsel hulgal. Niitude primaarne majandamise viis oli 2003. aasta paiku karjatamine ja heina tarbimisväärtus järjest vähenes [19].

2009. aastast on avatud Lihulas uuendatud katlamaja, mis võimaldab sooja tootmisel ära tarbida seni kasutamata luhaheina. Kütteks olev luhahein pärineb lähedal olevalt Matsalu rahvusparki territooriumilt, Kasari jõe luhast, mille niitmine on vajalik, et säilitada antud märgalalisi maastike. Heina kütteks kasutamise põhjuseks on Lihula valla arengukavas 2007-2017 punkt, mis ütleb, et kasutusele tuleb võtta kohalikku päritolu kütuseallikad ja eriti just rohtne biomass. Kuna luhahein on toitaineisisalduse poolest väheväärtuslik, siis loomasöödaks oli see sobimatu ja seisis kasutamatult ning oli pidev probleem, et mida sellega teha [2, 20, 21].

### 3. Pilliroog

Pilliroog on märgade elupaiga tüüpide tavaline heintaim, mis on levinud peaaegu üle kogu maailma. Pilliroog on väga pikk taim ja võib kasvada kuni nelja meetri kõrguseks. Pilliroo mõõduka kasutamisega hoitakse rooväljad korras ning tagatakse elupaigad erinevatele loomaliikidele ja pesitsustingimused lindudele. Suurimad roostikud Eestis asuvad Matsalus, Saaremaal Mullutu- ja Suurlahe roostikes (avamere ühendusega kunagised merelahed ehk nn. sisemeri) ning Võrtsjärves. 2007. aasta uurimuse andmetel on Eesti roostike kogupindala 27746 hektarit ning igal aastal oleks võimalik lõigata pilliroogu umbes 13000 hektarilt. Pilliroo biomassi saagikus on lehtede tõttu suvel suurem kui talvel. 2006-2011 aastate andmetel oli pilliroo keskmine kuivaine saagikus suvel 914 g/m<sup>2</sup> (9,14 t/ha) ja talvel 736 g/m<sup>2</sup> (7,36 t/ha) [16, 22, 23].

Pilliroo kogumisaeg sõltub kasutusviisist: kesksuvel loomasöödaks (toitainete sisaldus suurim), septembris õisikututid voodikatete tarbeks (pehmeimad), enne lund kariloomadele kuivaks toiduks ning talvel katuste ehitamiseks (sel ajal on varred kõvad, niiskusesisaldus madal, õietutid kergesti eemaldatavad, kerge koristada) [24].

Pilliroo eelisteks on hea saagikus, puuduvad sama kasvupinda asustavad teised taimed ja hoolduskuludest esinevad ainult koristamisega seotud väljaminekud. Pilliroo puudusteks on vajadus spetsiaalsete koristusmasinate järele, roostike asukoht tarbija suhtes (kasvavad piirkondades, kuhu on raske ligi pääseda), koristamisega seotud probleemid paksu lume või talvise jääkatte puudumise korral. Ühelt alalt kogu produktsiooni 10 aastase järjestikuse koristamise korral hakkab saagikus langema. Läänemere ääres oleks pilliroogu mõistlik kasutada mitmel erineval põhjusel: pikk kasutamise kogemus, rannikualad on kaetud roostikega, jää pealt saagi koristamise võimalus (tänu külmadele talvedele), poliitilised otsused asendamaks fossiilsed kütused taastuvatega, erinevad läbi viidud uurimused ning sobivate teadmistega töäjõud [22, 25].

#### 3.1 Pilliroo energeetiline aspekt

Energeetilisest aspektist lähtudes on olulisim pilliroo omadus tema varte kuivus, sest niiskus takistab põlemist, tõstab põlemisgaaside hulka ja alandab kütteväärtust. Pilliroo kuivus sõltub aastaajast, suvel on ta kõrgem ning tavaliselt alles märtsis-aprillis (mõnikord jaanuaris-veebruaris) saavutatakse põletusseadmetele looduslikult sobilik niiskusesisaldus (18-20%). Pilliroogu on kasulikum koguda talvel, sest siis on väiksemad nii tuhasuse kui niiskuse sisaldused. Samuti on väiksemad kütuse jaoks ebasobivate ainete nagu väävli, kloori ja lämmastiku kogused. Suvine pilliroog on madalama happesusega ja tuhas sisaldub küllalt

palju leelismetalle, mis mõjutavad küttepindade korrodeerumist ja ka tuha sulamist. Pilliroo kütteväärtuse määravad selles sisalduvate keemiliste ühendite kontsentratsioonid (fütomassi keemiline koostis) ja põlevaine kogus. 20%-se keskmise niiskusesisaldusega pilliroo kütteväärtus varakevadisel ajal on 3,9MWh/t [26].

Pilliroost saab energiat toota mitmel erineval moel, lisaks põletamisele kateldes valmistatakse ka vedelaid ja gaasilisi kütuseid. Suvel (juuli lõpus või augusti alguses) korjatud rohelisest ning kõrge saagikuse ja niiskusesisaldusega (56-69%) produktist saab toota biogaasi ja biokütust. Jätksuutlikkuse seisukohast ei ole suvine niitmine mõistlik, sest sellega kahjustatakse juurestikku, mille tõttu võib roostik kiiresti (isegi mõne aastaga) hävida. Talvisel ajal koristatud pilliroogu on võimalik põletada pallidena või toota pelletteid, brikette ja küttesegu ning lisaks veel ka gaasi (süntheetiline) ja vedelal kujul teise põlvkonna biokütuseid. Küttesegu jaoks võib pilliroogu pärast peeneks hakkimist segada hakkepuidu, väljajäätmete või turbaga. Pilliroo ja muu materjali vahetamine segus on kasutatavast katlatüübist ja põletusprotsessist [22, 27].

Pilliroo kasutusvõimalused kütusena on: tahkena otsepõletamine, brikettideks või pelletiteks väärastamine ja vedelaks (bioetanooliks) või gaasiliseks (biogaas, biometaan, sünteetiline gaas) kütuseks muundamine. Eeldatavalt on pilliroo põletamine energeetiliselt kõige sobivam tehnoloogia selle kasutamiseks. Kuluefektiivseimaks viisiks on pilliroog põletada pallina, sest see vajab kõige vähem bioloogilise materjali eelnevat töötlust. Roopallide põletamiseks on sobivad kaasaegsed põhupallikatlad. Pelletite eelisteks on transpordi lihtsus, nõudlus väiksema laopinna järele ja hea sobivus eluhoonete küttena. Pilliroost brikette saab kasutada sarnaselt puubrikettidega. Brikette on kergem toota, kui pelletteid, aga turg on väiksem ja müügihind madalam. Suvel korjatud rohelisest pilliroost saab toota biogaasi ning tootmisprotsessi kõrvalproduktis saadavat väetist saab kasutada põldudel. Biogaasi tootmiseks ehitavad rajatised peaksid asuma kas suurte roostikega alade läheduses või piirkonnas, kus nende taimede levikut tahetakse piirata. Pilliroo kasutamisel soojuse tootmiseks oleks mõistlik, et taimed pärineksid lähipiirkonnast, sest kaugemalt transport kulutab rohkem energiast, kui taime tootmisest tagasi saadakse [2, 5, 22, 27].

### **3.2 Pilliroo kasutamine ehituses**

Pilliroo kasutamine ehituses sobib väga hästi tänapäeva ühiskonda, kus hinnatakse ökoloogilist ehitust ja traditsioone. Pilliroo koristamisega kaasneb mitmeid positiivseid aspekte: väheneb veeteede eutrofeerumine, paadiga sõitjad saavad paremini liikuda, suvekodudes olijatel on võimalik paremat vaadet nautida ning taimset lõigatud materjali saab kasutada ehituses. Pilliroo peamiseks kasutusviisideks ehituses on katused, paneelid, plokid

ja matid [16, 22, 28].

Ehitamise jaoks kogutakse pilliroogu talvel ja varakevadel jää või teiste kõvade pindade pealt, kui taim kuivanud ja lehed langenud. Esimese aasta pilliroog ei ole kasutatav katusekattematerjalina, kuna tema omadused ei vasta nõutavale tasemele. Talvel on pilliroo niiskusesisaldus umbes 15%. Pilliroo kasutamise eelisteks on materjali hea püsivus ränidioksiidi sisalduse tõttu, taastuvus igal aastal ja materjali suur kasutamata kohalik reserv [16, 22].

Pilliroo peamine ja üks vanimaid kasutusvaldkondi on katused, nii elamutele kui ka kõrvalhoonetele, sest tugev ja vastupidav taim sobib selleks suurepäraselt. Pillirookatus talub hästi niiskust, temperatuuri muutuseid, UV kiirgust, lund, jääd ja torme ning regulaarse parandamise ja hoolduse korral kestab kaua. Pilliroogu on kasutatud katuste tegemiseks suvemajadele, autovarjualustele, õuehoonetele, restoranidele, kortermajadele, ühiskondlikele hoonetele ja ühepere elamutele. 2003 aastal oli Eestis pilliroo katuse maksumus 65€/m<sup>2</sup> kohta, hind sisaldab ka töötajate majutuse ja toitlustamise kulud. Pillirookatuse hind oli Soomes 2007. aasta andmetel umbes 70 €/m<sup>2</sup> väikeste hoonete korral ja ligikaudu 80€ / m<sup>2</sup> suuremate puhul (nt. majad, suvilad) ning hind sõltus ka ehituse keerukusest (nt. katuseakende arv, dekoratiivsed kaared, ärklid jne) [16, 22, 28].

Kuna pilliroog on hea isolatsioonimaterjal nii soojuse- kui ka heliisolatsiooni seisukohast, siis antud materjalist on mõistlik teha soojust isoleeriv osa nii põrandatele kui ka seintele. Pilliroo võib panna seinale lahtiselt ja selle ümber teha karkass - puidust raamide vahele pilliroost paneelsein (kihtide kaupa pressitakse pilliroog laudade vahele), pilliroopakkidest sein või puitkarkass, mis on täidetud hakkpillirooga. Pilliroost ehitatud seinad kaetakse lubi- või savikrohviga. Pilliroo jääkidest on võimalik toota savi-pilliroo kergplokkide. Pilliroogu kasutatakse seintes ka täiendava elemendina tugikonstruktsioonides või ühe koostisosana müüri-plokkides. Kõige tavalisemaks kasutusviisiks on kokkupandavad pilliroo paneelid ehk Berger-paneelid, mida tööstuslikult on valmistatud näiteks Eestis. Plaatide valmistamiseks pressitakse pilliroog kokku ja ühendatakse tihedalt roostevabast terasest traatide abil [16, 22, 28].

Pilliroost valmistatud graanuleid saab kasutada isolatsioonimaterjalina alusraamistikule, vahepõrandate või katuse vahel. Katuste jaoks mõeldud pilliroo koristamisel tekkivad jäätmed pakitakse ristkülikukujulistesse pallidesse, mida aina rohkem kasutatakse ehituses. Pilliroo pallidest tehtud sein krohvatakse savi- või lubjamördiga ning tulemuseks saadakse hingav ja hea soojusisolatsiooniga tõeliselt ökoloogiline maja. Pilliroo palle on kasutatud ka selleks, et soojustada ruumi, mis jääb katuse ja soklikorruse talade vahele [16].

Pilliroost tehakse laes ja seintes kasutatavaid matte, mis on dekoratiivsed ning annavad

helipidavuse ruumi piiretele. Pilliroost valmistatud mati ja plaadi plussiks on õhuniiskuse ja –temperatuuri muutustest sõltumatus mõõtude stabiilsuse osas. Aiataramaterjalidena hinnatakse hästi tihedaid matte, mis lisaks on sobilikud ka aknalaukideks ja rõdupiireteks. Pillirootarad on olnud kasutusel ka müratõkke seintena [22].

### **3.3 Näiteid pilliroo kasutusest**

#### **3.3.1 Maailmas**

Hariliku pilliroo tõenäoliselt kõige tuntumateks kasutusviisideks on paaniflöödi ja roosule valmistamine. Tänapäeval on vähe teadmisi taime traditsioonilistest kasutusvõimalustest ja tarvitamise viisidest. Lisaks pilliroo laiale kasutusele ehituses on seda taime tarvitatud ka loomasöödana ning selle varsi värtnatena, õisikuid madratsite täitena ning risoome raviks [24].

Pilliroogu kasutatakse ehitusmaterjalina väga mitmetes piirkondades: Läänemere riikides (Baltimaad, Saksamaa, Poola, Taani, Norra ja Rootsi), Inglismaal, Ungaris ja Hollandis, kus see on seotud pikkade traditsioonidega, ning veel ka Iirimaa, Prantsusmaal, Tšehhimaal, Belgias, Türgis, Austrias, Jaapanis, USA-s, Austraalias ja Kanadas [28].

Pilliroogu saab kasutada käsitöö-alastel eesmärkidel, sellest tehakse punutisi ja kaitsematte. Pilliroo käsitöös kasutamise näideteks on suured avalike ruumide installatsioonid (kroonid ja lillealused), roomatid (näiteks seinadele kaunistuseks, kardinad, laekate, turulettide kate), lambivarjud, sirmid, pilliroo kangad (kangastelgede abil), kohvikukardinad, kunstitööd (nt. pilliroost kasukas), paberi valmistamine, lauamatid ja klaasalused roopõhjaga, rooviled (rooflöödid) ning torupillid. Hiinas valmistavad käsitöömeistrid pilliroost pilte ja torukest lõhna levitamiseks (pilliroost valmistatud torude läbi tõuseb lõhn kõrgemale ning levikuulatus on laiem) [22, 24].

Energia tootmiseks on pilliroogu kasutatud mitmetes Euroopa piirkondades, näiteks Hollandis, Eestis, Soomes ja Rumeenias [27].

Soome jaoks on pilliroog traditsioonilises mõttes kõige sobivam kõrvalhoonete jaoks – kuurid, paadikuurid ja avatud katusealune (mida kasutatakse grillimiseks, söötmiseks, ladustamiseks, päikesevarjuks jne.). Uutes ehitistes võib pilliroog olla ka üheks alternatiivseks katusematerjaliks (katusekatte materjaliks) [16].

Ålandis on pilliroog suuresti olnud heina asendaja lehmade ja lammaste talvise toidus, sest saartel pole põllumajanduslikku maad piisavalt. Pilliroo õisikud lõigati taimede küljest ära ning kasutati patjade ja madratsite täidiseks [16].



### ***3.3.2 Eestis***

Eestis ehitati 2006. aasta andmetel rookatusaid 15000 - 20000 m<sup>2</sup>/aastas ning pilliroogu eksporditi mitmetesse riikidesse (Näiteks Hollandisse, Rootsi, USA-sse, Taani ja Saksamaale). Lääne-Eestis ja sealsetel saartel olid rookatused levinud 20. sajandi esimesel poolel [16, 28].

Hiiumaal tegutseb ettevõtte Rooekspert OÜ, mis tegeleb pilliroo sorteerimisega, katuste ehitamisega, rooplaatide tootmisega ja pilliroopakkide pressimisega ning jääkidest tehakse multši ja puistematerjali soojustamise tarbeks. Lisaks toodavad Eestis erinevad ettevõtted suures valikus pilliroost matte ja plaate ning müügil on ka Ungari päritolu pillirooplaate [22].

Pilliroost hakati Eestis energiat tootma 2010. aastal, Lihula vallas, kui vana katlamaja rekonstrueeriti. Varasem katel, mis töötas põlevkiviõlil, asendati biomassi põletamist võimaldava seadmega ning selle eesmärgiks oli kohapealsete ressursside (lamminiitude hein, põhk, pilliroog ja puidujäätmed) kasutamise soov. Katlamaja toodab aastas 4,2 GWh energiat ja kasutab heina või pilliroogu umbes 1000 tonni ning lisaks 200 tonni hakkpuitu. Uue tehnoloogiaga vähendati väga palju CO<sub>2</sub> ja SO<sub>2</sub> (98%) heitkoguseid ning väheke langes tarbija jaoks energia hind [22].

Pilliroogu saab kasutada ka loomade allapanuks, kui segada seda turbaga. Kõõgiviljaaias on pilliroog sobivaks katematerjaliks, kuna piirab umbrohu kasvu ja pH-väärtuse poolest on okaspuulaastudest sobivam [27].

## 4. Siidpööris

Siidpööris on pärit mõnedest Aafrika ja Aasia osadest, levinud peamiselt troopikas ja lähis-troopikas, kuigi mõnda liiki leidub ka parasvöötmes. Majanduslikus mõttes on taime eelisteks väike nõudlus väetiste järele (kasutab toitaineid efektiivselt ja vähesel hulgal) ja kõrge kuivaine sisaldus (ei vaja üldiselt kuivatamist) [29, 30, 31].

Siidpöörise esimese aasta saagikus on 1-2 t/ha kohta, mis on liiga väike ja pole seetõttu koristamist väärt. Teisel aastal on niitmisküpse taimestiku saagikus 4-10t/ha ning kolmandal aastal võib see olla 10-13t/ha. Soovitatava tasemeni jõuab lõikusvalmis siidpöörise saak alles pärast 3-4 aastat. Raieküpse siidpöörise saagikus (kuivaine) on hinnanguliselt vahemikus 2-44t/ha, Euroopas ja USA Midwesternis on raporteeritud saagikuseks 27-44 t/ha ja Kanadas Montrealis 10-11 t/ha. Lõuna-Euroopa niisutatud aladel on võimalik saavutada suurem saagikus kui Põhja-Euroopas, sest keskmine temperatuur on kõrgem ja päikesekiirgust on rikkalikult. Siidpöörist on sobiv koristada talvel, sest siis on taimel puhkeperiood [32, 33].

### 4.1 Siidpöörise energeetiline aspektidest

Siidpööris on igihaljaste või heitlehiste rohttaimede perekond, mis kuulub kõrreliste sugukonda ning mis koosneb umbes 17 - 20 liigist. Looduslikult on levinud need taimed levinud Aafrikast Ida-Aasiani, kus kasvavad niisketel niitudel. Siidpöörised eelistavad päikeselist kasvukohta, kus on hea drenaažiga niiske muld, kuid vähenõudlikkuse tõttu saab neid kasvatada rahuldavalt kõikjal. Arvatakse, et siidpöörised on Eesti kliima jaoks liiga külmakartlikud, kuid siiski on mitmeid sorte ka siin võimalik edukalt kasvatada. Eestimaa lühikese suve jooksul ei jõua paljud siidpöörised siiski õitsema minna, kuid levivad edukalt ka risoomi abil. Soojema kliimaga piirkondades (Inglismaa, Vahemeremaad) kasvatatakse siidpöörist põldudel energiakultuurina [34].

Siidpööris koristatakse põllult igal aastal kevade jooksul, sest talve jooksul on lehestik surnud ja varred kuivanud ning niiskusesisaldus jõudnud umbes 30%-ni. Kuivemat biomassi on kergem säilitada ning mida väiksem on niiskusesisaldus, seda suurem on kütteväärtus (kütteväärtus suureneb niiskusesisalduse vähenedes). Siidpöörise liiga varajase koristamisega (jaanuaris, veebruaris) saadakse produkt, mis kõrge niiskusesisalduse ja lehtede mahu tõttu on mitmeteks rakendusteks sobimatu. Hiljaks jäänud saagi koristamine (aprilli lõpus) võib aga kahjustada uue areneva saagi kasvu. Optimaalne saagikoristusaeg jääb nende kahe eelpool nimetatud ekstreemumi vahel ehk siis tavaliselt märtsi kuusse või aprilli algusesse [33].

Siidpööris on energiakultuuriks, millel on suhteliselt madalad hoolduskulud ja kõrge

saagikus/energiasisaldus ning mis omab olulist rolli taastuvate kütuste ja kemikaalide säästvas tootmises termo-keemilise muundamise teel. Siidpöörise kasutamisel on probleemiks asjaolu, et põlemise temperatuur on siidpöörisel madalam kui puiduhakk ja põlemisel tekkiv räbu võib kleepuda ahju seina külge. Kogunenud šlakk hakkab blokeerima kuumuse jõudmist katlasse ning protsess muutub ebaefektiivseks [32, 33].

Siidpöörise võib energia (elektri ja soojuse) saamiseks põletada avatud koldes, ahjudes ja kateldes või elektrijaamades mitmel erineval kujul [33]:

1. Pelletitena - Siidpöörisest saab teha aktsepteeritava kvaliteediga pelleteid. Miinuseks on asjaolu, et siidpöörise laastude muundamine pelletiteks on kallis (~60€/t).
2. Laastudena – Pärast niidukiga lõikamist tehakse lõigatud biomassist pallid, mis hiljem hakitakse. Probleemiks on materjali mahukus, mistõttu on hoiustamiseks vaja palju ruumi.
3. Brikettidena - Toodetavad briketid koosnevad 50% siidpöörisest ja 50% puidust ning need peaksid sobima enamikele ahjudele. Briketid sobivad väga hästi ka põletamiseks lahtisel tulel, aga turg on väga piiratud.
4. Tervete pallidena katlas.

Kui koristatud siidpöörise saagikus on 12t/ha kohta ja niiskusesisaldus 20%, siis saadakse energiat 13,7 GJ/t kohta. Sellise saagikuse taseme juures saaks ühest hektarist biomassist toota umbes 164 GJ energiat. 2011 aastal oli 20% niiskusesisaldusega siidpöörise hinnaks 60€/t Iirimaa turul [33].

## 4.2 Näiteid Siidpöörise kasutamisest

Esmane turg siidpöörise jaoks on energiaturg, kuigi seda saaks kasutada teistel eesmärkidel. Siidpöörisel on mitmeid potentsiaalseid kasutusvõimalusi [33]:

- energiakultuur – puiduhake ja pelletid – koospõletamine kivisöe või turbaga;
- loomade allapanu – hobuste allapanu tootmine;
- ehitus – keskmise tihedusega kiudplaatide tootmine;
- katuste tegemine – alternatiiv põhule katusekatte materjalina;
- paberi tootmine
- aiandus – lillepotide tootmise toormaterjal.

Enamus Iirimaa ja Inglismaal kasvavast siidpöörisest kasutatakse energia tootmiseks. Edenerry elektrijaamas on läbi viidud siidpöörise põletamise katseid ning suurimaks probleemiks oli saada sobiva suurusega laastud (<40mm), mis läbiksid elektrijaama sõelu. 2011. aastal ostsid elektrijaamad turvast väga madala hinnaga, 4,20€/GJ. Iirimaa tavapäraselt turvast kasutataval jaamadel oli 2011. aasta andmetel võimalik võtta siidpöörise 5-10% ehk

4000 ha/jaama kohta aastas. 20% niiskusesisaldusega ja tükeldatud siidpöörise hind oli 2011. aasta andmetel 88-90€/t [33].

## 5. Materjal ja metoodika

### 5.1 Katse materjal

Antud töös kasutatud pilliroog ja luhahein pärinesid Matsalu looduskaitsealalt Läänemaalt, rukkipõhk Peedult, nisu- ja odrapõhk Elva lähedalt ning Siidpööris (*Miscanthus*) Tartust, eraaiast. Andmed konkreetse materjali päritolu ja korjamisaja kohta on tabelis 1.

Teraviljapõhku on võimalik koristada pärast viljakoristust ehk umbes augusti keskpaigast alates. Põhku peab koristama kuiva ilmaga, sest vihmajärgsed tõstavad produkti niiskusesisaldust, mille tulemusena halveneb säilivus ja pikeneb kuivenemise periood [4].

Pilliroo koristamiseks parim aeg jääb talveperioodi, sest siis see sisaldab kõige vähem kütuse jaoks ebasobivaid aineid (väävel, kloor ja lämmastik) ning tuhasus on madalam, kui suvel kogutud materjalil. Antud töös kasutatud materjali koguti sügisel, mis jääb suvise ja talvise perioodi vahele [26].

Siidpöörise jaoks peetakse kirjanduse põhjal sobivaimaks koristusajaks perioodi märtsist aprilli alguseni, see kehtib soojema kliimaga alade kohta, kus antud taime kasvatatakse [33]. Töö jaoks kasutati Eestis kasvanud siidpöörist, mis toodi laborisse jaanuari alguses, kui taim oli kuivanud.

**Tabel 1.** Katse materjalid, nende päritolu ja korjamise aeg

Materjal	Päritolu	Korjamise aeg
Nisupõhk	Elva lähedalt	September 2013
Odrapõhk	Elva lähedalt	September 2013
Rukkipõhk	Peedu	September 2013
Siidpööris	Tartu	Jaanuar I pool 2014
Pilliroog	Läänemaa, Matsalu	Oktoober, 2013
Luhahein	Läänemaa, Matsalu	Oktoober, 2013

### 5.2 Katse metoodika

Käesoleva tööga seotud mõõtmised viidi läbi TTÜ Tartu Kolledži mullabioloogia laboris.

1. **Materjali ettevalmistus.** Pilliroog, luhahein, erinev põhk (nisu, odra ja rukki) ning siidpööris jahvatati veskis MF 10 basic IKA. Materjali ettevalmistuse käigus kuivatati see

70°C juures 24 tunni jooksul. Iga materjali omaduste kindlakstegemiseks määrati sellest kuivaine, tuhasus ja kalorsus.

**2. Kuivaine määramine.** Kuivaine määramiseks kaaluti (kaaluga KERN ABJ) igat materjali umbes 1,5 grammi, kahes korduses, ja asetati 24 tunniks 105°C juurde kuivatuskappi Memmert. Peale kuivatamist järele jäänud materjal kaaluti uuesti ning tulemustest arvutati kuivaine protsent valemiga (mass pärast kuivatamist / mass enne kuivatamist)\*100%).

**3. Tuhasisalduse määramine.** Tuhasuse kindlaks tegemiseks kaaluti iga materjali portselanist tiiglitesse umbes 1,5 grammi, kahes korduses, ning asetati neljaks tunniks muhvelahju Linn High Therm 525°C juurde. Pärast ahjust välja võtmist lasti tiiglitel jahtuda ja seejärel kaaluti järele jäänud tuhk. Tuha ja esialgse materjali koguste suhte põhjal saadi teada tuhasus ehk tuha protsent, milleks kasutati valemit: (tuha kaal / materjali kaal enne tuhastamist)\*100%

**4. Kütteväärtuse määramine.** Kütteväärtuse e. kalorsuse mõõtmiseks pressiti igast materjalist mehhaanilise pressi abil tabletid, mille kaal oli 0,4 – 0,6 grammi. Kalorsuse määramiseks kasutati kalorimeetrilist pommi e2k ja seda analüüsi tehti igast materjalist kolmes korduses ning tulemuseks saadi kalorsus MJ/kg kohta. Tulemused esitatakse pommkütteväärtusena (proov sisaldab nii niiskust kui tuhka), töökütteväärtusena (arvutatuna proovi algniiskusesisaldusele) ja kütteväärtusena materjali 20%-lise niiskusesisalduse juures).

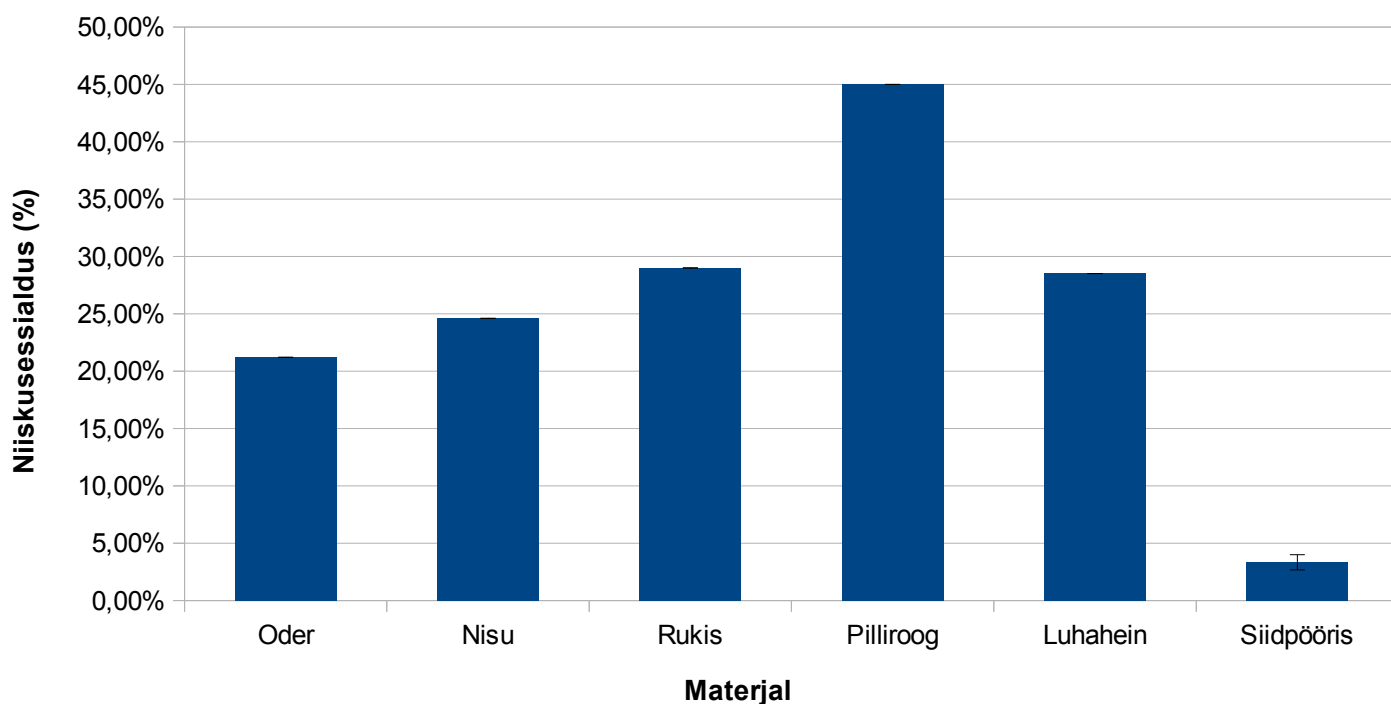
**5. Statistiline analüüs.** Katseandmete analüüsimisel kasutati programmi STATISTICA 11.0, SH Kruskal-Wallis'e dispersioonanalüüsi, jt. Tabelite koostamisel ja vormistamisel ning tekstilise osa kirjutamisel kasutas autor LibreOffice Writer tarkvara.

## 6. Tulemused

### 6.1 Uuritava materjali omadused

#### 6.1.1 Niiskusesisaldus

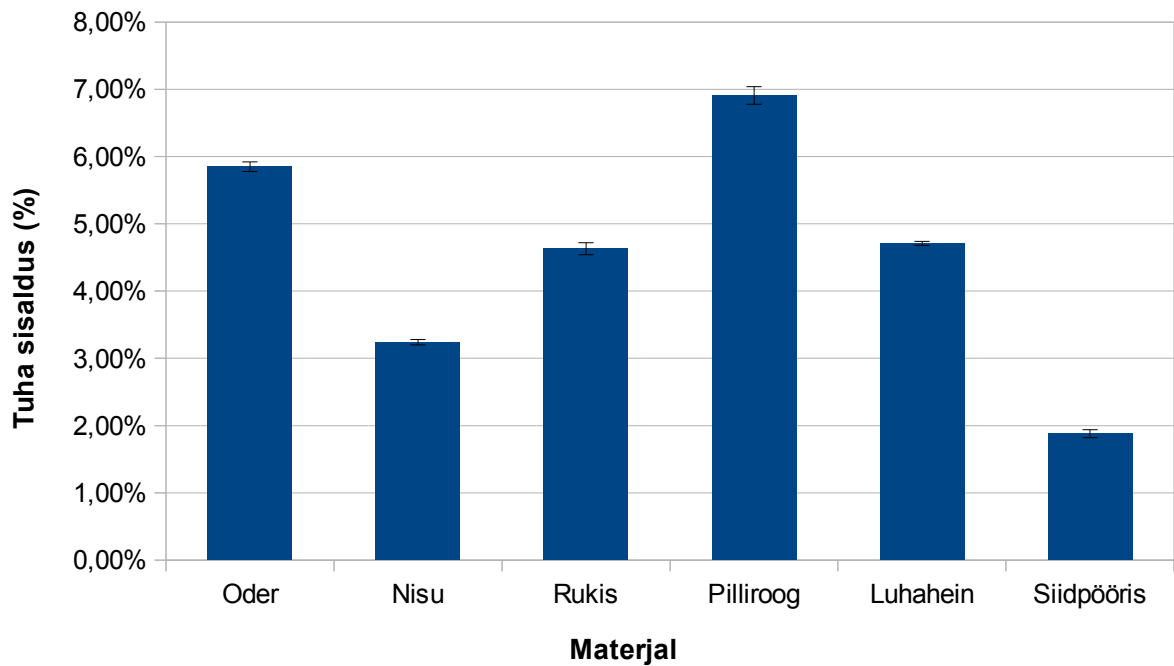
Keskmine uuritava materjali algne niiskusesisaldus oli kõrgeim pillirool 45,00% ja madalaim siidpöörisel  $3,35 \pm 0,65\%$ , ülejäänud materjalide niiskusesisaldus oli lähedaste väärtustega (odrapõhul 21,20%, nisupõhul 24,60%, rukkipõhul 29,00% ja luhahelinal 28,51% (Joonis 1.). (Andmed on esitatud lisa 1 tabelis 1).



**Joonis 1.** Algsed niiskusesisaldused (%) uuritavas materjalis.

#### 6.1.2 Tuhasisaldus

Keskmine tuhasisaldus oli suurim pillirool ( $6,91 \pm 0,13\%$ ) ja väikseim siidpöörisel ( $1,88 \pm 0,06\%$ ), teiste materjalide tuhasisaldus oli vahepealne (odrapõhul  $5,85 \pm 0,07\%$ , nisupõhul  $3,24 \pm 0,04\%$ , rukkipõhul  $4,63 \pm 0,09\%$  ja luhahelinal  $4,71 \pm 0,03\%$ ) (Joonis 2). Andmed on esitatud lisa 1 tabelis 1.



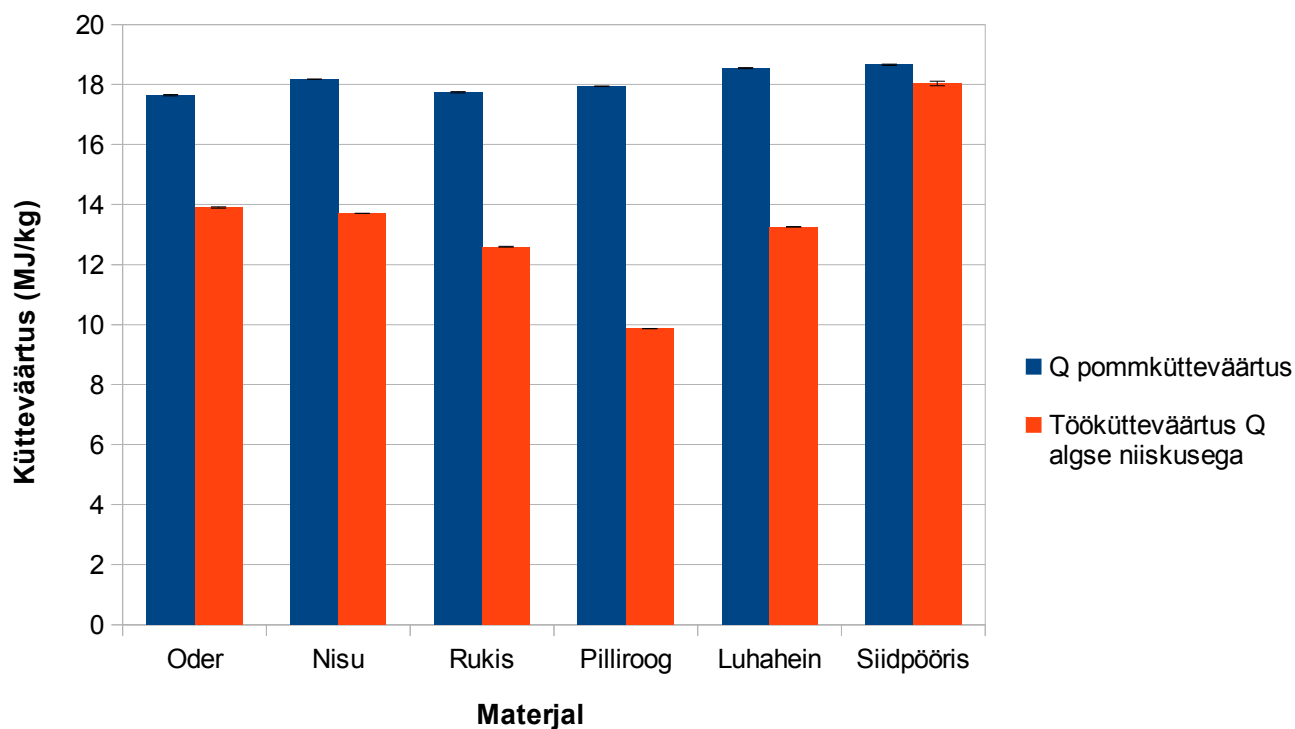
**Joonis 2.** Tuhasisaldus (%) uuritavas materjalis.

### **6.1.3 Kütteväärtus**

Kõrgeim keskmine pommkütteväärtus oli siidpöörisel ( $18,66 \pm 0,02$  MJ/kg) ja madalaim odrapõhul ( $17,65 \pm 0,03$  MJ/kg). Teiste taimsete biomasside kütteväärtused olid järgnevad: nisupõhul  $18,18 \pm 0,04$  MJ/kg, rukkipoõhul  $17,74 \pm 0,02$  MJ/kg, pillirool  $17,94 \pm 0,07$  MJ/kg ja lahaheinal  $18,55 \pm 0,01$  MJ/kg (Joonis 3) (Eelpool nimetatud arvud on kirjas lisas 1 tabelis 1). Kõigi teostatud määramiste hulgas oli kõrgeim pommkütteväärtus  $18,68$  MJ/kg siidpöörisel ja madalaim  $17,62$  MJ/kg odrapõhul.

Kõrgeim keskmine töökütteväärtus algse niiskusesisalduse juures oli siidpöörisel ( $18,04 \pm 0,07$  MJ/kg) ja madalaim pillirool ( $9,87 \pm 0,00$  MJ/kg). Teiste taimsete biomasside keskmised töökütteväärtused algniiskuse juures olid järgnevad: odrapõhul  $13,90 \pm 0,02$  MJ/kg, nisupõhul  $13,71 \pm 0,00$  MJ/kg, rukkipoõhul  $12,59 \pm 0,02$  MJ/kg ja lahaheinal  $13,26 \pm 0,01$  MJ/kg (Joonis 3) (Eelpool nimetatud arvud on kirjas lisas 1 tabelis 1). Algse niiskusesisalduse juures oli suurim määratud üksiku proovi töökütteväärtus  $18,18$  MJ/kg siidpöörisel ja madalaim  $9,86$  MJ/kg pillirool.

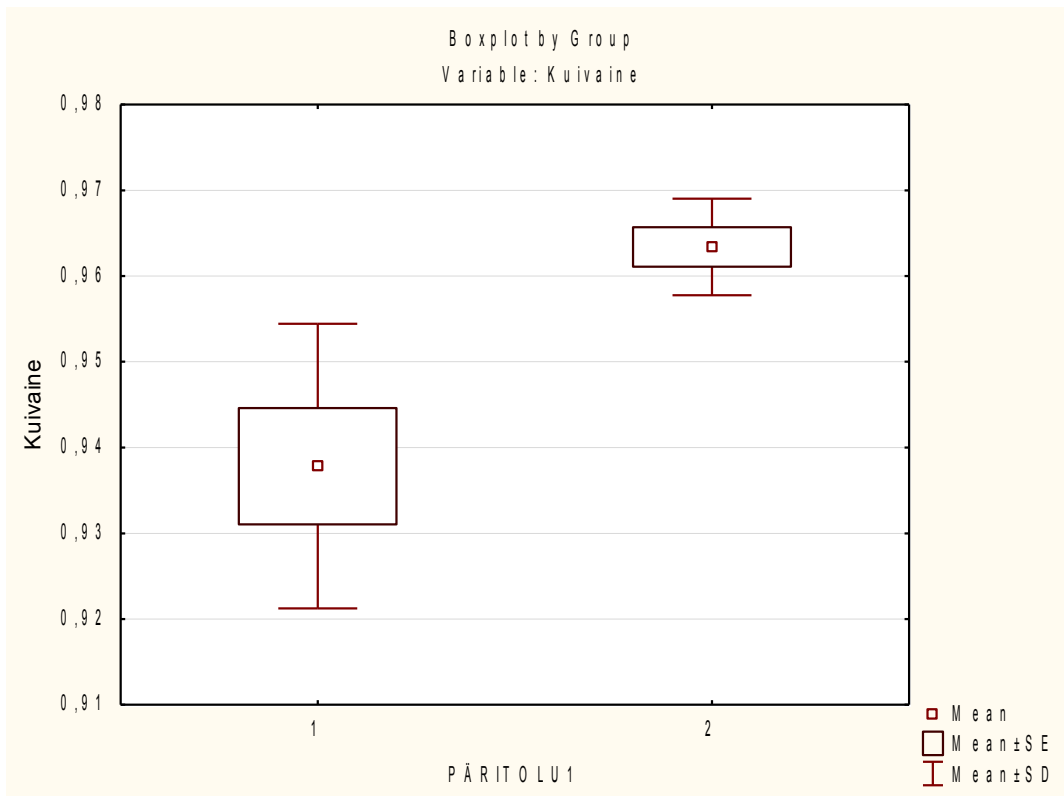




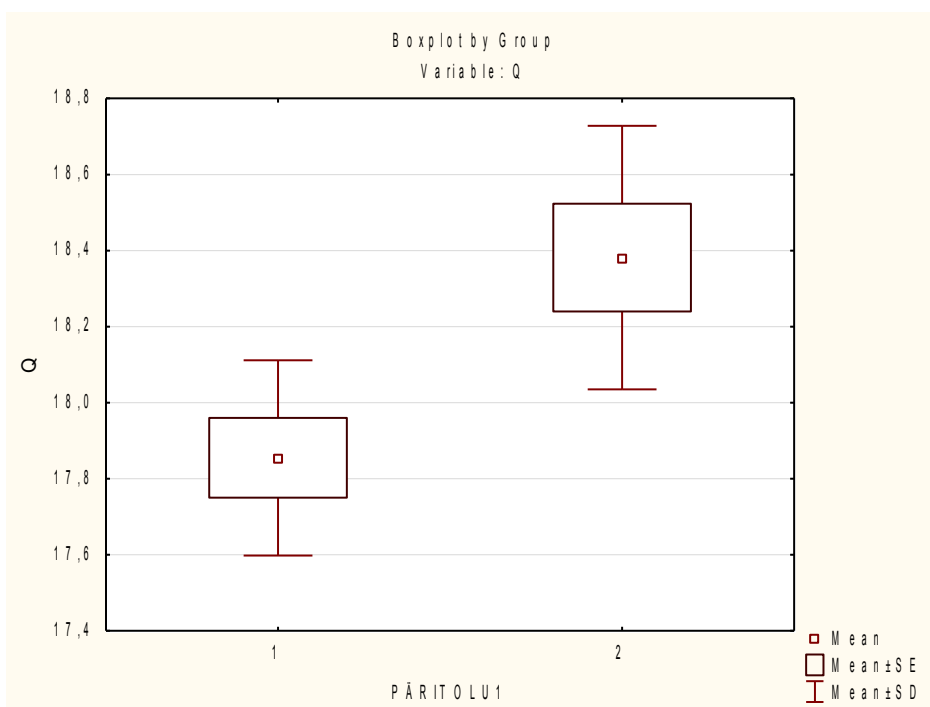
**Joonis 3.** Katsematerjalide kütteväärtused kahe erineva niiskusesisalduse juures.

#### **6.1.4 Biomassi omaduste seos uuritava materjali päritoluga**

Niiskusesisalduse ja kütteväärtuse keskmised väärtused on statistiliselt usaldusväärselt ( $p < 0,05$ ) erinevad teraviljapõhul ja looduslikul materjalil (va siidpööris, mida Eestis ei kasvatata). Teraviljapõhkude kuivaine keskmised väärtused olid madalamad ja varieeruvuse ulatus suurem, kui looduslikel materjalidel. Odra-, nisu- ja rukkipõhu kuivaine protsentuaalsed keskmised sisaldused proovides jäid vahemikku 92% - 95% ning lahaheinal ja pillirool 96% - 97,33% (Joonis 4.). Kütteväärtuste keskmised väärtused olid teraviljapõhkude puhul madalamad ning varieeruvused väiksemad võrreldes looduslike materjalidega. Odra-, nisu- ja rukkipõhu keskmised kütteväärtused olid vahemikus 17,65 MJ/kg – 18,18 MJ/kg ning pillirool ja lahaheinal 17,94 MJ/kg – 18,55 MJ/kg.. Siidpöörise keskmine kuivainesisaldus oli 96,67% ja kütteväärtus 18,66 MJ/kg (Joonis 5.) (Kütteväärtuse andmed on esitatud lisas 1 tabelis 1). Tuha keskmised väärtused kahes grupis oluliselt ei erine.



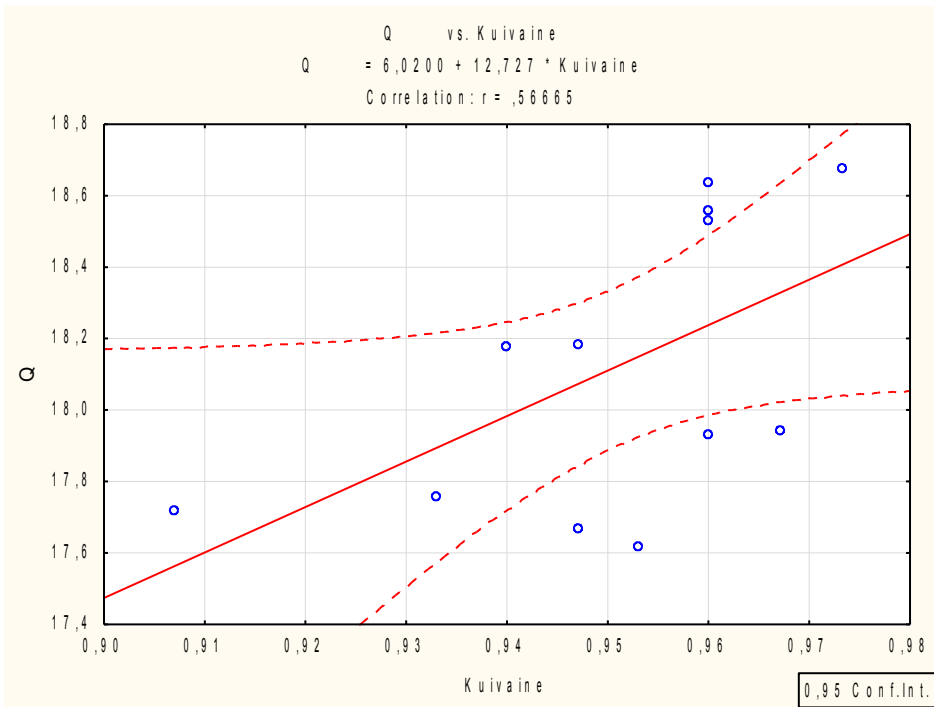
**Joonis 4.** Materjalide kuivainesisalduste seosed nende päritoluga (1 – teraviljapõhk, 2 – looduslik taim).



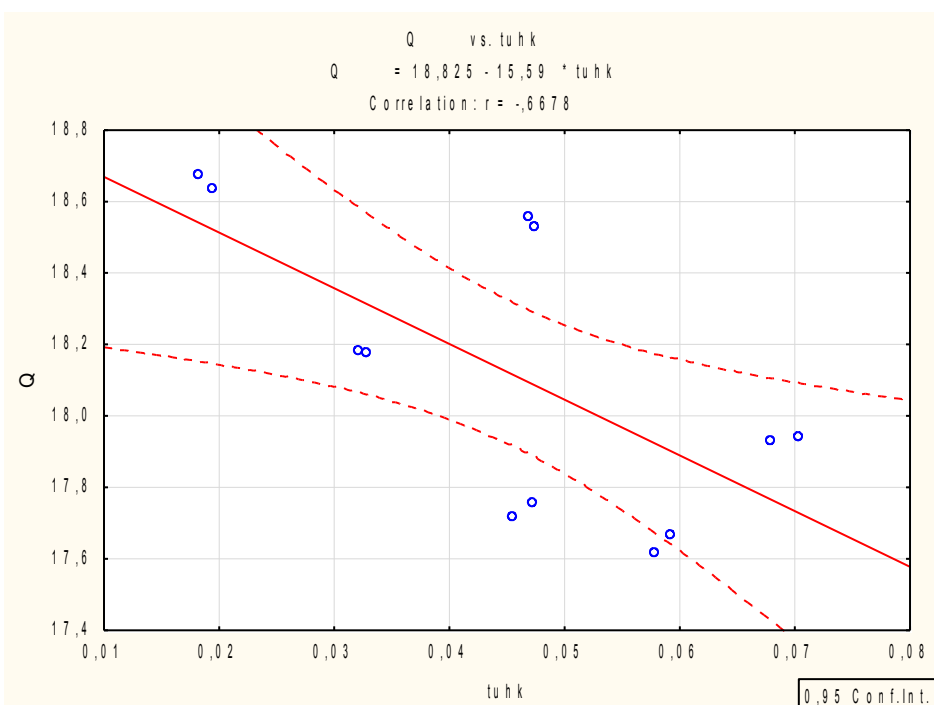
**Joonis 5.** Materjalide kütteväärtuste seosed nende päritoluga (1 – teraviljapõhk, 2 – looduslik taim).

Arvutati regressioonivõrrandid kalorsuse seoste kohta materjali kuivainesisaldusega (joonis 6.) ja tuhasisaldusega (joonis 7.). Materjali kuivainesisalduse suurenedes kasvab ka biomassi

kütteväärtus. Tuhasisaldus toimib vastupidiselt ehk mida suurem on antud selle osakaal, seda madalam on biomassi kütteväärtus (Joonised 6 ja 7).



**Joonis 6.** Materjalide kütteväärtuste seosed materjalide kuivainesisaldustega.

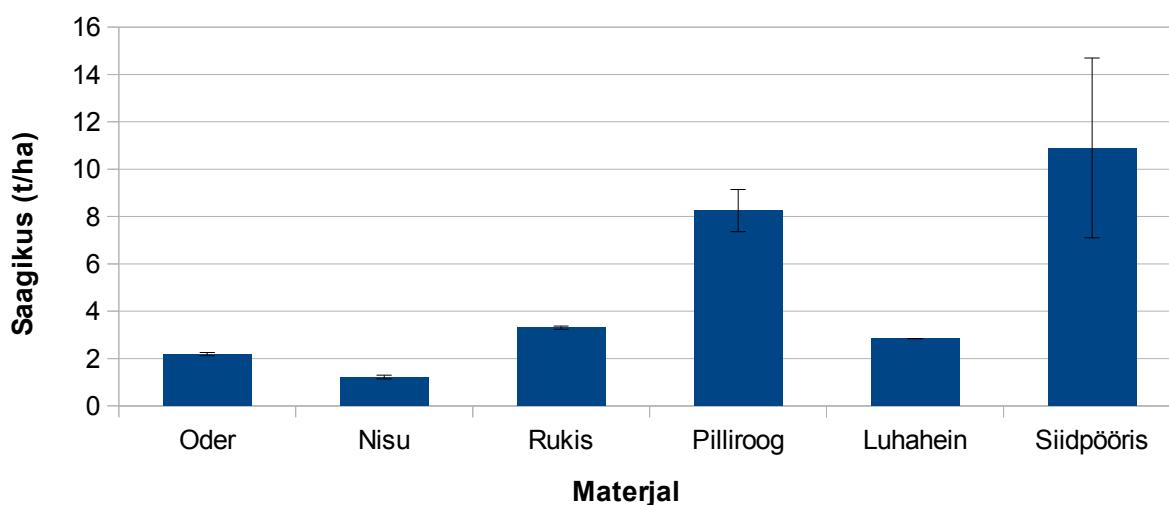


**Joonis 7.** Materjalide kütteväärtuste seosed materjalide tuhasisaldustega.

## 6.2 Saagikus

### 6.2.1 Biomassi produktsioon

Biomassi produktsiooni arvutamisel on kasutatud kirjanduses leiduvaid andmeid [22, 32, 35, 36]. Erinevate autorite andmetel on suurim saagikus siidpöörisel ja väikseim nisupõhul. Siidpöörise keskmine saagikus kuivainena oli  $10,900 \pm 3,800$  t/ha ja nisul  $1,221 \pm 0,072$  t/ha. Teiste katsematerjalide keskmised saagikused kuivaine kohta olid: odral  $2,191 \pm 0,071$  t/ha, rukkil  $3,306 \pm 0,067$  t/ha, pillirool  $8,250 \pm 0,890$  t/ha ning luhaheinal  $2,850 \pm 0,00$  (Joonis 8) (Saagikuse andmed on kirjas lisas 1 tabelis 1).



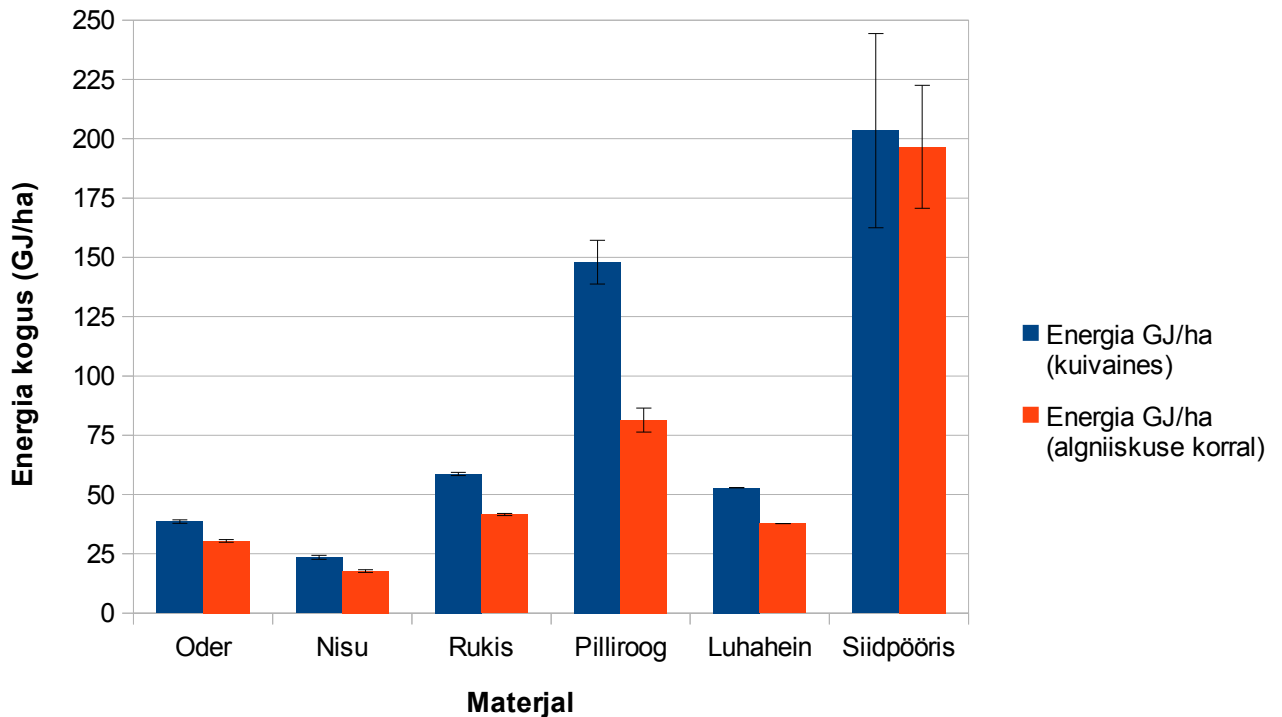
**Joonis 8.** Katsematerjalide keskmine saagikus kirjanduse andmete põhjal (t/ha) [22, 32, 35, 36].

### 6.2.2 Energeetiline produktsioon

Kuivaine keskmine energiakogus oli suurim siidpöörisel ( $203,38 \pm 40,94$  GJ/ha) ja madalaim nisupõhul ( $23,54 \pm 0,79$  GJ/ha). Teiste taimsete materjalide kuivaine põletamisel saadavad keskmised energiakogused olid järgnevad: odrapõhul  $38,64 \pm 0,71$  GJ/ha, rukkipõhul  $58,63 \pm 0,67$  GJ/ha, pillirool  $148,00 \pm 9,22$  GJ/ha ja luhaheinal  $52,86 \pm 0,04$  GJ/ha (Joonis 9). Kuivaine põletamisel eralduvate energiakoguste andmed on kirjas lisas 1 tabelis 1. Katse kõrgeim kuivaine põletamisel saadava võimalik energia väärtus oli  $274,58$  GJ/ha siidpöörisel ja madalaim  $22,18$  GJ/ha nisul.

Töökütteväärtuse põhjal arvutatud keskmine energiakogus oli suurim siidpöörisel ( $196,60 \pm 25,91$  GJ/ha) ja madalaim nisupõhul ( $17,75 \pm 0,59$  GJ/ha). Algniiskuse juures (töökütteväärtuse põhjal) olid teiste taimsete materjalide põletamisel saadavad keskmised energiakogused järgnevad: odrapõhul  $30,45 \pm 0,56$  GJ/ha, rukkipõhul  $41,62 \pm 0,47$  GJ/ha,

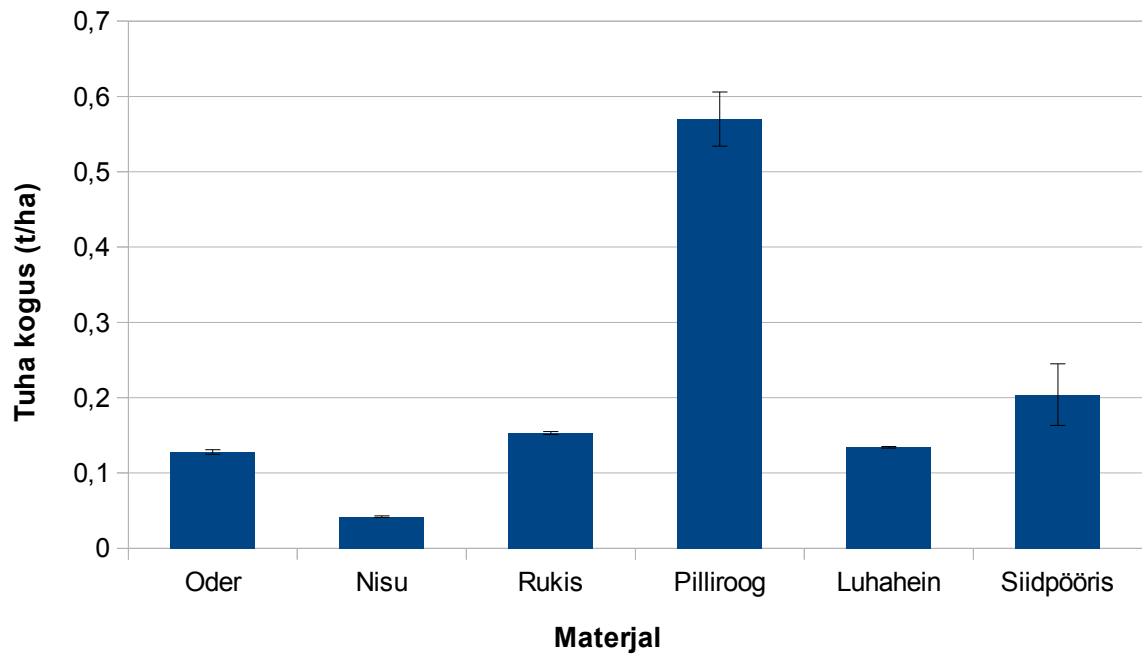
pillirool  $81,40 \pm 5,07$  GJ/ha ja luhahelal  $37,79 \pm 0,03$  GJ/ha (Joonis 9). Energiakoguste andmed on kirjas lisas 1 tabelis 1. Töökütteväärtuse põhjal arvatud kõrgeim võimalik saagikus energiaühikutes oli  $267,25$  GJ/ha siidpöörisel ja madalaim  $16,72$  GJ/ha nisupõhul.



**Joonis 9.** Kuivaine kütteväärtuse ja töökütteväärtuste alusel arvatud erinevate materjalide saagikus (GJ/ha).

### 6.2.3 Põlemisprotsessi jääk -tuhk.

Biomassi põletamisel suurim järelejääv keskmine tuhakogus on pillirool ( $0,570 \pm 0,036$  t/ha) ja väikseim nisupõhul ( $0,042 \pm 0,001$  t/ha). Teiste taimsete materjalide põletamisel tekkiva tuha kogus oli järgnev: odrapõhul  $0,128 \pm 0,003$  t/ha, rukkipõhul  $0,153 \pm 0,002$  t/ha, luhahelal  $0,134 \pm 0,001$  t/ha ja siidpöörisel  $0,204 \pm 0,041$  t/ha (Joonis 10) (Järelejääva tuha kogused on esitatud lisas 1 tabelis 1). Suurim võimalik biomassis sisalduv tuhakogus on  $0,643$  t/ha (pillirool) ja väikseim  $0,039$  t/ha (nisul).



**Joonis 10.** Materjalide põletamisel järele jääv tuha kogus (t/ha).

## 7. Arutelu

### 7.1 Taimse biomassi omaduste ja energeetilise produktsiooni

#### liikidevahelised erinevused

Kütteväärtus on füüsikaline suurus, mis näitab soojushulka, mis eraldub kindla koguse kütuse täielikul põlemisel. Kütuse põlemisel süsiniku oksüdatsiooniate muutub, seejuures mida madalam on süsiniku oksüdatsiooniate, seda kõrgem on kütteväärtus. Erinevatel kütustel on erinevad kütteväärtused, erinevuse põhjuseks on materjalide erinev keemiline koostis. Materjalide energeetiliseks iseloomustamiseks kasutatakse pommkütteväärtust ja töökütteväärtust. Pommkütteväärtus kirjeldab energiasisaldust analüütilises proovis laboritingimustes, töökütteväärtus kirjeldab energiasisaldust materjalis selle algse ehk väliniiskuse juures.

Antud töös uuritud materjalid kuuluvad kõik rohtse biomassi hulka, taimne päritolu tingib ka suhteliselt sarnase keemilise koostise. Põhud on küll erinevat liiki teraviljade tootmise kõrvalproduktiks, kuid keemilised ja energeetilised omadused on neil siiski üksteisega sarnased. Seetõttu jääb nende kütteväärtus üsna kitsasse vahemikku 17,6 – 18,2 kJ/g. Põhkude kui tööstuslikult kasvatatavate materjalide analüüsitulemused on sarnased ka niiskuse- ja tuhasisalduse osas. Pilliroog ja luhahain on mõlemad looduslikku päritolu, mis mõjutab samuti kütteväärtust. Lisaks avaldab mõju ka see, et luhahaina puhul analüüsiti kogu taime maapealset osa, pilliroo ja siidpöörise tulemused on saadud ainult varre kohta. Siidpöörise erineb teistest materjalidest eelkõige selletõttu, et taim on lõunamaist päritolu. Eestis leidub siidpöörise aedades, kuid tööstuslikult seda liiki veel ei kasvatata, eelkõige meie kliimatingimuste tõttu. Võrreldes kõigi teiste uuritud materjalidega on siidpöörise algne keskmine niiskusesisaldus ja tuha protsentuaalne kogus madalamad. Algse niiskusesisalduse erinevus teiste materjalidega on keskmiselt järgmine: odraga 6,37, nisuga 7,39, rukkiga 8,71, pillirooga 13,51 ja luhahainaga 8,56 korda. Tuha sisalduse keskmine erinevus siidpöörisel teiste materjalidega oli: odraga 3,11, nisuga 1,72, rukkiga 2,46, pillirooga 3,68 ja luhahainaga 2,51 korda.

Kirjanduses avaldatud andmete põhjal võib põhu saagikus odral ulatuda 2,500 t/ha kuni 3,060 t/ha, suvinisul 1,250 t/ha – 2,250 t/ha ja talirukkil 3,340 t/ha – 6,940 t/ha [35]. Eelpool nimetatud põhu saagikused olid märgaine kohta, mistõttu need arvutati ümber kuivainele. Erinevate teraviljapõhkude saagikus oli vastavalt odral 1,970 t/ha kuni 2,411 t/ha, suvinisul 0,943 t/ha – 1,697 t/ha ja talirukkil 2,371 t/ha – 4,927 t/ha.

Pilliroo saagikus on erinevate autorite tehtud uurimuste kohaselt suvel keskmiselt 9,14 t/ha ja

talvel 7,36 t/ha [22]. Kuna käesolevas töös kasutatud materjal oli korjatud sügisel, arvatati pilliroo saagikus suvise ja talvise keskmisena,

Luhaheina kohta leiti kirjandusest erinevaid andmeid – keskmine saagikus kuivaine kohta suvel 4,73 t/ha ja sügisel 2,85 t/ha [36] ning üleujutatavatel lamminiitudel võib antud väärtus ulatuda kuni 5.7 t/ha [2]. Käesoleva töö jaoks kasutati sügisese saagikuse andmed, sest katse jaoks korjati biomassi sellel aastaajal.

Siidpöörise saagikus on olenevalt genotüübist 7,1 t/ha kuni 14,7 t/ha kohta kolmeaastase taimestiku puhul [32]. Kuna siidpöörise Eestis tööstuslikult ei kasvatata, siis saagikuse andmed võeti võrdseks Rootsi omadega, sest see riik paikneb asukohalt küllaltki lähedal ja asub samal laiuskraadil.

Kütusena tarbitava biomassi kõrgeimaks lubatud veesisalduse määraks loetakse 18 – 20% [3, 26], sellest kõrgema niiskusesisalduse juures halvenevad kütuse omadused ja põlemisprotsess sedavõrd, et biomass vajab eelnevat kuivatamist, mis on aga väga kulumahukas. Keskmine kütteväärtus 20% niiskusesisalduse juures oli kõrgeim luhaheinal ( $14,84 \pm 0,01$  MJ/kg) ja madalaim odrapõhul  $14,12 \pm 0,02$  MJ/kg. Teiste taimsete biomasside keskmised töökütteväärtused 20%-se niiskusesisalduse juures olid järgnevad: nisupõhul  $14,54 \pm 0,00$  MJ/kg, rukkipõhul  $14,19 \pm 0,02$  MJ/kg ja pillirool  $14,35 \pm 0,01$  MJ/kg (Joonis 4). Seega, 20%-se niiskusesisalduse juures olid uuritud materjalide töökütteväärtused üsna sarnased, jäädes vahemikku 14 - 15 MJ/kg kohta. Siidpöörise jaoks ei arvatatud kütteväärtust 20% niiskuse juures, sest taime looduslik niiskusesisaldus jääb sellest allapoole. 20% niiskusesisalduse juures on keskmise suurima (luhahein) ja väiksema (odrapõhk) kütteväärtuste vahe  $0,72$  MJ/kg. Samas energiaproduksioon ühe hektari kohta, arvatatuna 20%-lise niiskusesisaldusele, on erinevatel biomassidel erinev erineva saagikuse tõttu. Kõige rohkem saab antud niiskusesisalduse juures energiat toota ühe hektari pilliroo biomassist ( $118,401 \pm 7,374$  GJ/ha) ja kõige vähem nisupõhust ( $18,836 \pm 0,630$  GJ/ha) ehk vahe on rohkem kui kuuekordne. Teiste teraviljade põhust saadava energia kogus 20% niiskusesisalduse juures ühe hektari kohta on tunduvalt kõrgem kui nisupõhul, olles odrapõhul keskmiselt  $30,914 \pm 0,571$  GJ/ha ja rukkipõhul  $46,901 \pm 0,534$  GJ/ha. Kütmiseks sobiva kõrgeima niiskusesisalduse väärtuse juures on hektari kohta saadava energiakoguse vahe nisupõhul odrapõhuga rohkem kui pooleteise kordne ja rukkipõhuga peaaegu kahe ja poole kordne. Ühel hektaril kasvavast pilliroost saadava energiasaagisega on nii odra- kui rukkipõhul üsnagi suur vahe, vastavalt siis peaaegu nelja kordne ning kahe ja poole kordne erinevus.



## 7.2 Taimne biomass potentsiaalse energeetilise ressursina

Käesolevas töös on uuritud rohtse biomassi sobivust energeetiliseks tooraineks ning selle kasutamise võimalusi. Üldiselt kuuluvad rohtse biomassi ressursid ühte kahest põhigrupist: need on kas põllumajanduslikud jäägid või energiakultuurid, kolmanda rühma moodustab looduslike rohumaade ja märgalade taimestik. Käesolevas töös on uuritud igasse rühma kuuluvat taimset materjali:

- Põllumajanduslikud jäägid on toidu, kiudainete või sööda kasvatamisel põllul tekkivad kõrvaltooted. Mõnda kogutakse mitmesugustel lõppkasutuse eesmärkidel, peamiselt loomasöödaks ja allapanuks, kuid mõned ei leia üldse mingit kasutust. Meie oleme uurinud teraviljatootmisest üle jäänud odra-, nisu- ja rukkipõhu omadusi ning kasutusvõimalusi energiatootmiseks.
- Energiakultuure kasvatatakse ettevõtetes ja taludes põhitootena. Tegemist on üsna uue tootmisharuga, Eestis enamkasvatatavad kultuurid on päideroog ja energiapaju. Käesolev magistritöö käsitleb siidpöörise potentsiaalse energeetilise ressursina ja analüüsib selle võimalikku kasutust Eesti tingimustes.
- Iga-aastaste hooldustööde käigus niidetakse hein ja viiakse luhalt ära. Matsalu märgalalt on saadud fütomassi suvise luhaniiitmise tulemusena 4,73 t/ha [36]. Niitmise eesmärk luhaaladel on enamasti keskkonnakaitseline, väljaveetud hein enamasti kasutust ei leia. Luhahein energiatoorainena on leidnud käsitlemist ka Eesti autorite poolt [25].

Teraviljapõhkude energeetilised omadused on sarnased materjalide ühesuguse päritolu tõttu, hoolimata liigilisest erinevusest. Odra põhu looduslik niiskusesisaldus (keskmiselt 21,2%) on üsna lähedal 20%. 20% niiskusesisalduse juures saab ühest hektarist põhust toota energiat keskmiselt 30,914 GJ ehk 8,59 MWh ning materjali mitte kuivatamiselt (loodusliku niiskuse korral) 30,450 GJ ehk 8,46 MWh. 2011. aasta andmetel tekkis Eestis odrapõhku 197000 tonni, ning kogu selle materjali kasutamisega saaks energiat toota keskmiselt umbes 608419,04 MWh (2190308,53 GJ), võttes arvesse materjali niiskusesisaldusena 20%, mis on suurim lubatud niiskusesisaldus, mille juures materjal sobib veel kütmiseks. Märjast põhust saaks energiat keskmiselt 599287,04 MWh (2157433,35 GJ) ehk arvestades kogu materjali hulka, siis kuivatamisega seoses suureneb kasu biomassist keskmiselt 9132 MWh võrra, kuid kuivatamiseks kulutatud energia on vähemalt sama suur. Probleemiks on kindlasti ka tekkiv tuhk, mille kogused on küllaltki suured. Tuhk on jääkaine, millega pole midagi peale hakata ning see ladustatakse prügilatesse. See omakorda suurendab survet prügimägedele ja keskkonnale ning tõuseb uute selliste asutuste rajamise vajadus. Odra põhu põletamisel jääb tuhka järgi keskmiselt 128 kg/ha, mis on töös käsitletud taimse materjali puhul siiski üks

väiksemaid tulemusi. 2011. aastal tekkis odrapõhku Eestis 197000t, millest pärast põletamist peaks jääma järgi keskmiselt umbes 9000 tonni (9081,3 t / 9069,01 t) tuhka.

2011. aasta andmetel tekkis Eestis suvinisu põhku 148000 tonni, millest 20% niiskusesisalduse korral saaks toota keskmiselt 1721496,25 GJ ehk umbes 478193,40 MWh energiat. Nisu põhust saadav energia kogus ühe hektari kohta oli kõigist töös käsitletud materjalidest madalaim. Seetõttu võib nisupõhu rakendamine energia tootmiseks väiksemate koguste korral osutada kõigi teiste materjalidega võrreldes kõige ebamõistlikumaks. Nisupõhust saab energiat keskmiselt 18,836 GJ/ha ehk 5,23 MWh/ha. Probleemse tuha kogus, mis põletamisel järgi jääb, on nisu põhu puhul töös käsitletud taimedest kõige madalam, keskmiselt 0,042 t/ha. 2011. aasta tekkis suvinisu põhku Eestis 148000 t, millest pärast põletamist peaks jääma järgi keskmiselt umbes 3600 tonni (3615,58 t / 3838,55 t) tuhka.

Teraviljadest kõige vähem põhku tekkis 2011. aastal rukkist, kõigest 24 000 t, millest 20% niiskusesisalduse juures saaks toota keskmiselt 241739,95 GJ ehk 67149,99 MWh energiat. Rukki põhust saab toota teiste teraviljadega võrreldes kõige rohkem energiat ühe hektari kohta, keskmiselt 46,901 GJ/ha ehk 13,03 MWh/ha. Saagikus on rukkipõhul küll kõige suurem, aga kasvatatav kogus on väike, mistõttu energiat saab sellest produktist toota vähe. Probleeme valmistavat tuhka jääb rukki põhu põletamisel järgi keskmiselt 0,153 t/ha. 2011. aasta tekkis rukki põhku Eestis 24000 t, millest pärast põletamist peaks jääma järgi umbes 780 tonni (788,95 t / 788,69 t) tuhka.

Teraviljapõhu kasutamisel tuleb arvestada keskkonnaalaste piirangutega, mis on peamiselt seotud mulla orgaanilise süsiniku säilitamisega ja erosiooni vältimisega, milleks küntakse koristusjäägid tagasi mulda.

Kirjanduses esinevate, teiste autorite poolt avaldatud andmete põhjal andmete põhjal saaks Eestis kasutada 13000 ha pilliroogu aastas [21]. Kogu selle produkti põletamisel oleks võimalik toota 1539213 GJ ehk 427559,17 MWh energiat. 20% niiskuse korral oli pilliroost saadav energia hulk hektari kohta kõige suurem, mis tuleneb kõrgeast saagikuse määrast. Ühest hektarist pilliroost saab sellise niiskusesisalduse korral keskmiselt 118,401 GJ ehk 32,89 MWh energiat. Antud taim kasvab veekogude ääres, mistõttu kõikjal seda kasutada võimalik pole. Pilliroo puhul on kindlasti suureks probleemiks suur algniiskus, mis on keskmiselt 45%, mis tähendab, et taime veesisaldust tuleb vähendada 25% võrra. See on väga energiamahukas tegevus ja väiksemate koguste puhul ei tasu ennast kindlasti ära. Pilliroo suureks miinuseks on ka küllaltki suur tekkiv tuha kogus, mis oli kõigi töös käsitletud taimede võrdluses kõrgeima väärtusega. Ühe hektari pilliroo põletamisel jääb järgi keskmiselt 0,570 tonni tuhka. Kogu Eestis kasutatava pilliroo (13000 ha) tekiks keskmiselt umbes 7400 t (7410 t) jääkprodukti.

2013. aasta andmetel on oli Eestis hoolduses 7040 hektarit lamminiite ehk luhtasid ning kaitstavatel aladel oli neid poollooduslikke kooslusi kokku 15600 ha [37]. Luhaheinast saadav energiakogus hektari kohta on 20% niiskusesisalduse korral keskmiselt 42,285 GJ ehk 11,75 MWh. Kui kasutada ainult hoolduses olevaid luhtasid (7040 ha), siis saaks toota keskmiselt 297686,40 GJ ehk umbes 82690.67 MWh energiat. Kasutades kõiki kaitstavatel aladel paiknevaid luhtasid (15600 ha), saaks toota keskmiselt 659646 GJ ehk 183235 MWh energiat. Hoolduses olevate lamminiitide heina põletamise jääks tuhka järgi keskmiselt 940 t (943,36) ning kõigi kaitstavate luhtade taimse materjali korral 2090 t (2090,4 t).

Odra-, suvinisu- ja rukki põhust ning pilliroost ja luhaheinast kokku saaks toota keskmiselt 6352403,73 GJ ehk 1764.56 GWh energiat aastas. See oleks juhul kui saaks kasutada kogu olemasolevat materjali, mis põhkude ja ilmselt ka pilliroo puhul poleks võimalik, sest neil on ka teisi kasutusviise. Neid taimseid ressursse võiks kasutada energia tootmiseks, siis kui see tasuks ennast ära ja ei tekitaks majanduslikus mõttes kahjumit. Põhku ja pilliroogu kasutatakse küll väiksemal määral ehituses, kuid tänapäeval on palju paremaid ja tõhusamaid materjale majade püstitamiseks. Samas peaks kindlasti arvestama seda, kas tasuvam oleks energia tootmine või majade ehitamine ning lõpliku otsuse kasutamiseks teha sellest lähtuvalt. Praegu toodetakse Eestis energiat peamiselt põlevkivist, mis on taastumatu ressurss, mille hankimine rikub loodust ja muundamise käigus tekib hulgaliselt kahjulikke heitgaase. Seetõttu peaks põlevkivile leidma alternatiivid ja miks mitte üheks selliseks võtta taimne biomass. Pealegi seisab suur eelpool nimetatud taimsest materjalist kasutuseta, mis on mõeldamatu ajal, kui räägitakse taastumatute ressursside ammendumisest ning otsitakse taastuvaid alternatiive energia tootmise jaoks. Samas on kindlasti kasutuse juures kõige olulisem asi tasuvus, et ei peaks energia tootmiseks peale makstama. Kuna need taimsed ressursid paiknevad väga hajutatult ülekoogu Eesti, siis ühte punkti kokku koondamine ei ole võimalik, ega ka tasuv ning ühes kohas leiduv kasutatav ressurss on liiga tühine. Seetõttu üsna suure tõenäosusega ei tasuks nende biomasside kasutama energia tootmiseks majanduslikus mõttes ära, sest muud kulutused on liiga suured (nt. transport, kuivatamine). 20% niiskusesisalduse juures saaks kõigist teraviljapõhkudest kokku toota keskmiselt 4153544,73 GJ ehk 1153762,43 MWh energiat. Samas kogu põhku põletada võimalik poleks, sest osaliselt kulub seda ka loomade allapanuks ja maasse kündmiseks, mullaviljakuse säilitamise eesmärgil. Põhku tasub kindlasti kasutada tekkekohale võimalikult lähedal, sest kaugemale transport pole otstarbekas. Põhku tekib üle kogu Eesti, kuid ühes kindlas piirkonnas on saadav biomassi kogus paraku väike. Ühte punkti kokku ei ole aga mõistlik transportida, kuna see on liiga kallis ja ei tasu majanduslikust aspektist ära. Probleeme valmistab kindlasti ka järgi jääv tuhk, mille kogused on küllaltki suured. Hektari kohta on suurim järelejääva tuha kogus on rukkil (0,153 t/ha), aga tegelikult tekiks antud teravilja põhu põletamisest jääkprodukti kõige

vähem, kuna seda kasvatatakse teistest vähem. Rukki suurim järelejääva tuha hulk hektari kohta tuleneb sellest, et võrreldes teiste teraviljadega on selle saagikuse määr kõrgeim. Kõige rohkem tekiks teraviljadest põhku odrast, sest selle kasvatamise kogus oli 2011. aastal suurim.

20%-se niiskusesisalduse juures oli suurim põletamise korral saadav keskmine energiakogus pillirool ( $118,401 \pm 7,374$  GJ/ha) ja madalaim nisul ( $18,836 \pm 0,630$  GJ/ha). Teiste 20%-se niiskusesisaldusega taimsete materjalide põletamisel saadavad keskmised energiakogused olid järgnevad: odral  $30,914 \pm 0,571$  GJ/ha, rukkil  $46,901 \pm 0,534$  GJ/ha ja luhaheinal  $42,285 \pm 0,032$  GJ/ha (Joonis 6).

Siidpöörise energiasisaldust 20% niiskusesisalduse juures ei arvatud, sest antud taime varres on looduslikult vett eelpool nimetatud protsendist vähem. 20%-se niiskusesisalduse juures oli kõrgeim võimalik biomassi põletamisel saadava energia väärtus 131,221 GJ/ha pillirool ja madalaim 17,741 GJ/ha nisul.

### **7.3 Perspektiivne energiataim - siidpööris**

Siidpöörise Eestis ei kasvatata, kuna meie kliimat ei peeta selle taime kasvatamiseks sobivaks. Tegemine soojalembese energiataimena, mille saagikus ja kütteväärtus on kõrge. Kuna taime niiskusesisaldus on koristamise hetkel madalam kui 20%, siis ei teki probleemi tema sobivuses energiatootmiseks. Võrreldes teiste käesolevas töös analüüsitud taimsete produktidega on siidpöörise saagikus ja kütteväärtus kõrgemad. Kui põhkude ja luhaheina saagikused jäävad 1-3,5 t/ha vahele ja pillirool 8,25 t/ha, siis siidpöörisel on antud väärtus 10,9 t/ha (Rootsi andmed). Kütteväärtus on siidpöörisel ilma kuivatamata pisut üle 18 MJ/kg, aga teistel materjalidel 14-15 MJ/kg vahel, kui niiskusesisaldus on arvutuslikult vähendatud 20%-ni. Järelejääva tuha hulk hektari kohta on küll töös käsitletud taimedest üks kõrgemaid (keskmiselt 0,204 t/ha), kuid see tuleneb suurest saagikusest ning siidpöörise tuha sisaldus massiühiku kohta kõige madalam. Energia kogus, mis saadakse ühe hektari taimse massi põletamisel oli siidpöörisel samuti teistest materjalidest tunduvalt kõrgem. Ühest hektarist antud taimest saab toota keskmiselt 196,600 GJ ehk 54,61 MWh energiat. Võrreldes teiste uuritud taimeliikidega olid vahed keskmiselt järgnevad: pillirooga 1,7, rukkiga 4,2, luhaheinaga 4,6, odraga 6,4 ja nisuga koguni 10,4 korda. Rootsi paikneb Eesti suhtes üsnagi lähedal, samas kliimavöendis, mistõttu oleks otstarbekas ka siin katsetada antud taime kasvatamist. Võib eeldada, et saagikuse määr on sarnane, mistõttu saaks antud taimest toota üsnagi korralikult energiat. See oleks üsnagi sobiv üheks alternatiiviks põlevkivile ja aitaks seetõttu vähendada taastumatute ressursside tarbimist. Kui vaadata Eestis ringi, siis seisab kasutuseta ja võssa kasvanuna päris palju põlde, mille võiks üles harida ja kus võiks kasvatada siidpöörise. Ka Eesti taastuvenergia tegevuskava aastani 2020 näeb ette uute

energiakultuuride, sh siidpöörise kasvatamise Eestis.

#### **7.4. Järeldused**

Töö tulemuste põhjal on võimalik järeldada:

- Töös käsitletud materjalid nisu-, odra- ja rukkipõhk, luhahain, pilliroog, siidpööris on kasutatavad ehituses, mitmetel muudel erinevatel tarbimisviisidel ning on väärtuslikuks energeetiliseks tooraineks.
- Analüüsitud materjalide pommkütteväärtused varieeruvad piirides 17,6 – 18,7 MJ/kg, töökütteväärtused sõltuvad materjali niiskuse- ja tuhasisaldusest ning on kõrgeim siidpöörisel ning madalaim pillirool.
- Töös käsitletud materjalid on Eestis kasutatavad kohalike kütustena ning ehituses ning alternatiivsetel kasutusaladel, kusjuures tuleb arvestada materjali eeltöötlemise (kuivatamine) ja transpordikuludega.
- Siidpöörise energeetiliste omaduste põhjal otsustades on selle energiakultuuri kasvatamine Eestis tasuv ja perspektiivikas.

## Kokkuvõte

Eestis põhineb energia tootmine endiselt põlevkivil, mis on taastumatu ja peagi ammenduv ressurss ning seetõttu peab sellele leidma alternatiive. Üheks võimalikuks variandiks võiks olla taimne biomass - põhud, luhahain ja pilliroog, mis seisab suures osas kasutuna. Lisaks on mujal maailmas hakatud kasvatama siidpööriseid, mis on kõrge saagikuse ja kütteväärtusega taim, mida kasutatakse energia tootmiseks ning seda võiks proovida viljeleda ka Eestis.

Antud töös antakse esmalt teiste autorite poolt avaldatud allikatele tuginedes ülevaade põhkude (nisu-, odra- ja rukki põhk), luhahaina, pilliroo ja siidpöörise energeetilisest aspektist, kasutamisest ehituses ning rakendamise viisidest Eestis ja mujal maailmas. Samuti antakse ülevaade võimalikest biokütuse tootmise viisidest erinevate materjalide puhul ning erinevatest võimalikest kasutusviisidest ehituses. Tuuakse näited, mil viisil ning kuidas erinevad riigid antud taimseid materjale kasutavad.

Kohaliku taimse biomassi omadusi (niiskuse- ja tuhasisaldus, kütteväärtus) uuriti TTÜ Tartu Kolledži mullabioloogia laboris. Tulemusena leiti, et materjalide põlemisomadusi ja kütteväärtust mõjutavad nii niiskuse- kui ka tuhasisaldus. Leiti seos, et kuivainesisalduse kasvades ning tuhasisalduse vähenedes materjali kütteväärtus suurenes. Võrreldes erinevaid materjale selgus, et suurimad keskmised algniiskuse- ja tuhasisaldused oli pillirool (vastavalt 45% ja  $6,91 \pm 0,13\%$ ) ja väikseimad siidpöörisel (vastavalt  $3,35 \pm 0,65\%$  ja  $1,88 \pm 0,06\%$ ). Saagikuse andmeid analüüsid selgus, et keskmine antud väärtus oli taaskord kõrgeim siidpöörisel ( $10,900 \pm 3,800$  t/ha), kuid madalaim nisupõhul ( $1,221 \pm 0,072$  t/ha).

Algse niiskusesisalduse korral oli keskmine töökütteväärtus kõige kõrgem siidpöörisel ( $18,04 \pm 0,07$  MJ/kg) ja madalaim pillirool (kõigest  $9,87 \pm 0,00$  MJ/kg), samas pommkütteväärtuse kõrgeim keskmine näitaja oli samuti siidpöörisel ( $18,66 \pm 0,02$  MJ/kg), kuid madalaim oli hoopis odral ( $17,65 \pm 0,03$  MJ/kg). Biomassist saadav energiakogus ühe hektari kohta oli algniiskuse korral suurim siidpöörisel ( $196,60 \pm 25,91$  GJ/ha) ning madalaim nisupõhul ( $17,75 \pm 0,59$  GJ/ha), sama tulemus saadi arvestades biomassi kuivaine kütteväärtust (vastavalt siidpöörisel  $203,38 \pm 40,94$  GJ/ha, nisupõhul  $23,54 \pm 0,79$  GJ/ha). Koguseliselt jääb pärast põletamist hektari kohta kõige rohkem tuhka järele pillirool ( $0,570 \pm 0,036$  t/ha) ning vähim nisul ( $0,042 \pm 0,001$  t/ha).

Taimsete materjalide algniiskused on kütusena kasutamise jaoks ebasobivad, sest suure veesisalduse korral on kütteväärtus madalam ning põlemisprotsess aeglasem. 18-20% niiskusesisaldust peetakse optimaalseimaks kütusena kasutatava biomassi puhul. 20% niiskusesisalduse korral on keskmine kütteväärtus kõrgeim luhahainal ( $14,84 \pm 0,01$  MJ/kg) ja

madalaim odral ( $14,12 \pm 0,02$  MJ/kg). Muude parameetrite osas oli kõrgeim keskmine näitaja siidpöörisel, kuid 20%-lise niiskusesisalduse juures selle materjali kütteväärtust ei arvatud, põhjuseks asjaolu, et siidpöörise looduslik niiskusesisaldus oli 20% madalam. Hektari kohta saadav keskmine suurim energiakogus 20% niiskuse korral oli pillirool ( $118,401 \pm 7,374$  GJ/ha) ja väiksem nisul ( $18,836 \pm 0,630$  GJ/ha).

2011.aasta andmete kohaselt tekkis Eestis 197000 t odra 148000 t suvi nisu ja 24000t rukkipõhku, millest saaks keskmiselt energiat toota vastavalt 599287,04 MWh, 478193,40 MWh ja 67149,99 MWh. Pilliroogu oleks Eestis võimalik kasutada 13000 ha/a, millest saaks kogu produkti kasutamisel toota keskmiselt 427559,17 MWh energiat. 2013. aasta andmetel hooldati Eestis 7040 ha luhtasid, kuid kaitstavatel aladel oli luhakooslusi kokku 15600 ha, mille heina kasutamisest saaks energiat keskmiselt 183235 MWh. Kokku saaks põhkude (nisu-, odra- ja rukkipõhk), pilliroo ja luhahaheina põletamisega toota keskmiselt 1764.56 GWh energiat aastas. Samas pole kogu kasvavat materjali põhjust põletada, sest põhkudel ja pillirool on ka teisi kasutusviise, milleks neid rakendatakse (nt. loomade allapanu, katused). Lisaks paikneb kogu biomass üle riigi hajutatul ning seda ühte kohta kokku vedada ei ole tasuv. Seetõttu pole ilmselt nende taimsete materjalide põletamine majanduslikus mõttes tasuv, sest muud kulutused on liiga kõrged (nt. transport, kuivatamine) ning ühe koha peal kasutatav ressurss on väga tühine. Majanduslikult tasuvam on nende materjalide kasutamine erineval eesmärgil – nii ehituslikuks kui energeetiliseks otstarbeks vastavalt vajadusele, nõudluselt ning tasuvusele.

Siidpöörist peetakse perspektiivseks energiataimeks, millel on kõrge saagikus ja kütteväärtus ning madal niiskusesisaldus ja väike tuha osakaal. Kui põhkude (nisu-, odra- ja rukkipõhk), luhahaheina ja pilliroo kütteväärtused jääksid ka pärast kuivatamist (niiskusesisalduseni 20%) 14-15 MJ/kg vahele, siis siidpöörisel on antud näitaja pisut üle 18 MJ/kg algse niiskusesisalduse juures. Võrreldes eri liiki biomassist saadavat energiakogust ühe hektari kohta, siis teistel töös käsitletud materjalide oli antud näitaja 1,7 – 10,4 korda väiksem kui siidpöörisel (energiaproduksioon hektari kohta on arvatud Rootsi saagikuse andmete korral, kuna Eestis taime veel ei kasvatata). Saadud tulemuse põhjal, eeldades, et siidpöörise saagikuse määr on sarnane Eestis ja Rootsis, võib soovitada siidpöörise kasvatamist ka meil.

## Summary

### **The utilization possibilities of the herbal biomass for energy production.**

The energy production in Estonia is still based on oil shale, which is non-renewable and soon depleted resource and therefore there is a need to find alternatives. One of the possible options can be the herbal biomass – straws, flooded meadow grass (floodplain grass) and reed, which is mainly useless. In addition, the miscanthus has been started to grow for energy production, which is the high yield and calorific value and may be cultivated in Estonia too.

In the first part of this paper based on the other authors' views the author provides an overview of energetic aspects, usage as building material and other methods of straws (straw of wheat, barley and rye), flooded meadow grass, reed and miscanthus in Estonia and elsewhere over the world. In addition, herbal material as an alternative resource for biofuel production and construction is being discussed based on experiences in different countries.

Local herbal biomass (content of moisture and ashes, calorific value) research was carried out in laboratory of soil biology in Tartu College of Tallinn University of Technology. As a result, the content of moisture and ashes in the material is affecting combustion characteristics and calorific value. Also, it was found that calorific value increased when proportion of dry matter increased and ashes decreased. In the materials matching process it was found that larger median of initial moisture and content of ashes was in reed (according to 45% and  $6,91 \pm 0,13\%$ ) and lower in miscanthus (according to  $3,35 \pm 0,65\%$  and  $1,88 \pm 0,06\%$ ). Yield data analysis revealed that mean value of miscanthus ( $10,900 \pm 3,800$  t/ha) was again highest, but the lowest value was on straw of wheat ( $1,221 \pm 0,072$  t/ha).

Mean effective caloric value of biomass by initial content of moisture was the highest for miscanthus ( $18,04 \pm 0,07$  MJ/kg) and the lowest for reed ( $9,87 \pm 0,00$  MJ/kg), while the mean bomb caloric value was the highest for miscanthus ( $18,66 \pm 0,02$  MJ/kg), but the lowest value was for barley straw ( $17,65 \pm 0,03$  MJ/kg). The energy from biomass per hectare by initial content of moisture was the biggest for miscanthus ( $196,60 \pm 25,91$  GJ/ha) and the lowest for wheat straw ( $17,75 \pm 0,59$  GJ/ha), the same result was obtained when consider the biomass calorific value of dry material (according to  $203,38 \pm 40,94$  GJ/ha for miscanthus and  $23,54 \pm 0,79$  GJ/ha for straw of wheat). After burning one hectare of biomass, the largest amount of ash obtained from reed ( $0,570 \pm 0,036$  t/ha) and the lowest in wheat ( $0,042 \pm 0,001$  t/ha).

An initial content of moisture in herbal biomass was unsuitable for biofuel production,



because larger content of water causes lower calorific value and therefore burning is slower. Moisture content between 18-20% is considered to be the maximal limit for biofuel production. The 20% of moisture content gave the highest calorific value for flooded meadow grass ( $14,84 \pm 0,01$  MJ/kg) and the lowest for barley ( $14,12 \pm 0,02$  MJ/kg). The miscanthus obtained the highest values in other parameters, but this material's calorific value for 20% moisture content was not calculated, because miscanthus natural moisture content is lower than 20%. The energy from biomass per hectare in 20% moisture content was the highest for reed ( $118,401 \pm 7,374$  GJ/ha) and the lowest for wheat ( $18,836 \pm 0,630$  GJ/ha).

According to the data of year 2011 in Estonia there were 197 000 tons of straw of barley, 148 000 tons of straw of summer wheat and 24 000 tons of straw of rye and average amount of producible energy could be accordingly 599 287,04 MWh, 478 193,40 MWh and 67 149,99 MWh. Maximum amount of reed that can be used for energy production is 13000 hectares per year and it can be produce 427 559,17 MWh energy in average. 7040 ha of meadows were maintained in 2013 year, but this number could easily be increased to 15600 ha by maintaining meadows in protected areas and therefore producible average amount of energy could be 183 235 MWh. Altogether the energy from burning straws (straw of wheat, barley and rye), reed and flooded meadow grass could be up to 1764.56 GWh/year in average. However, all the growing biomass cannot be used, because there are more other uses of straws and reed (for example bedding for animals, roofs). In addition, the herbal biomass is located scattered over the country and it is not profitable to transport all the biomass together in one place. To burn herbal material apparently is not profitable because expenses are too high (for example transport, drying) and the amount of material which located in one place is trivial. Therefore it is financially cost-effective to use those materials for different purposes – for building as well as for energetic purposes as needed, according to demand and profitability.

Miscanthus is considered to be perspective as the energy plant, which has high yield and calorific value, but the moisture content and proportion of ashes are low. If the calorific value of straws (straw of wheat, barley and rye), flooded meadow grass and reed after drying (20% of moisture content) is between 14-15 MJ/kg, then the same value of miscanthus is over 18 MJ/kg by initial content of moisture. Compared the amount of energy, which becomes from one hectare different type of biomasses, then this value was 1,7 – 10,4 times smaller for other herbal biomasses than miscanthus (the energy production for one hectar was calculated using yield data from Sweden, because this plant have not been cultivated in Estonia). Based on the results, the author assumes that yield of miscanthus is similar in Estonia and Sweden and it can be suggested to grow the miscathus in Estonian too.

## **Tänuõnad**

Autor tänab oma juhendajat, professor Mari Ivaski ja kaasjuhendajat MSc. Jane Peda. Autor on tänulik juhendajale ja kaasjuhendajale abi eest laboratoorse katse läbiviimise osas ja kõigile tööga seotud küsimustele vastamise eest.

Autor tänab ka oma perekonda ja sõpru, kes toetasid antud töö kirjutamise ajal.

## Kirjanduse nimestik

- [1] Eesti Entsüklopeedia. 2011. Põhk. <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/p%C3%B5hk1> (29.05.2014)
- [2] Eesti konjuktuuriinstituut. 2011. Ülevaade Eesti bioenergia turust 2010. aastal. [http://www.ki.ee/publikatsioonid/valmis/Ylevaade\\_Eesti\\_bioenergia\\_turust\\_2010.\\_aastal.pdf](http://www.ki.ee/publikatsioonid/valmis/Ylevaade_Eesti_bioenergia_turust_2010._aastal.pdf) (29.05.2014)
- [3] Skøtt, T. 2011. Straw to energy. Status, Technologies and Innovation in Denmark 2011. [http://www.inbiom.dk/download/viden\\_biomasse/halmpjeceuk\\_2011.pdf](http://www.inbiom.dk/download/viden_biomasse/halmpjeceuk_2011.pdf) (29.05.2014)
- [4] Hovi, M. 1995. Mitmeaastased rohhtaimed energeetilise toormena Eesti Vabariigis. Magistritöö. 67 lk.
- [5] Tartu Regiooni Energiaagentuur. 2013. Biomassi kasutamine energeetikas Lõuna-Eesti regioonis. <http://www.trea.ee/pagas/Biomassi%20kasutamine%20energeetikas%20L%C3%B5una-Eesti%20regioonis.pdf> (29.05.2014)
- [6] Kaljuste, D. 2011. Lahaheina kui biokütuse võimalike kasutamiskohtade kaardistamine Eestis. Bakalaureusetöö. Tartu. 41 lk
- [7] Vares, V. 2005. Biokütuse kasutaja käsiraamat. TTÜ Kirjastus. Tallinn. 172 lk.
- [8] Bioenarea. 2012. The Bioenergy System Planners Handbook – BISYPLAN. Omadused, mis mõjutavad taimse biomassi kasutamist energia tootmiseks. <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-es/04-02.html> (29.05.2014)
- [9] Wilson, A. 1995. Straw: The Next Great Building Material?. <http://www.buildinggreen.com/auth/article.cfm/1995/5/1/Straw-The-Next-Great-Building-Material/> (29.05.2014)
- [10] Wihan, J. 2007. Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw. <http://www.jakubwihan.com/pdf/thesis.pdf> (29.05.2014)
- [11] Hall, K. 2005. The Green building bible (2nd edition). Green Building Press. UK. 285 lk.
- [12] Biomass Energy Centre. 2011. Straw. [http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page\\_pageid=75,17972&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL](http://www.biomassenergycentre.org.uk/portal/page_pageid=75,17972&_dad=portal&_schema=PORTAL) (29.05.2014)
- [13] Weiser, C., Zeller, V., Reinicke, F., Wagner, B., Majer, S., Vetter, A. & Thraen, D. 2014. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based

energy applications in Germany. Applied Energy. Nr.114. Lk. 749-762.

[14] Kukk, I (Eesti Aiandusliit). 2005. Abiks seenekasvatajale (Eesti riiklik arengukava). [http://www.agri.ee/public/abiks\\_seenekasvatajale3.1.pdf](http://www.agri.ee/public/abiks_seenekasvatajale3.1.pdf) (29.05.2014)

[15] Straw for Energy Production (Danish Technological Institute is a competent partner!). Käsikiri.

[16] Stenman, H. 2008. Reed construction in the Baltic Sea region. <http://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522160379.pdf> (29.05.2014)

[17] Rivalette OÜ. 2014. Biobrikett ja biopellet – Tehniline info. <http://briketimeister.ee/biopelleti-muuk-tehniline-info/> (29.05.2014)

[18] Rivalette OÜ. 2014. Biobriketi ja biopelleti müük – Kõik tooted. <http://briketimeister.ee/shop/> (29.05.2014)

[19] Mägi, E. 2004. Kas kasutada luhta heina- või karjamaana? Linnustik Kasari luha Kloostrialuses osas 1986- 2003. Loodusvaatlusi 2003. 140 lk.

[20] Keskkonnaministeerium. 2009. Lihula sai Eesti esimese rohtsel biomassil töötava katlamaja. <http://www.envir.ee/1102372> (29.05.2014)

[21] Källe, M. 2008. Lihula katlamaja ehitamisest. <http://www.eby.ee/Margus%20Kalle.pdf> (29.05.2013)

[22] Miljan, J. & Kask, Ü. 2013. Pilliroog ja selle kasutamise võimalused. Salibar OÜ. Tartu. 102 lk.

[23] Kask, Ü., Kask, L. & Paist, A. 2007. Eesti pilliroo ressursid ja nende kasutamine energeetilise kütusena. [http://www.pilliroog.ee/raamat/Read\\_up\\_on\\_Reed\\_eesti-keeles.pdf](http://www.pilliroog.ee/raamat/Read_up_on_Reed_eesti-keeles.pdf) (29.05.2014).

[24] Häkkinen, J. 2007. Pilliroo traditsioonilised kasutusviisid. [http://www.pilliroog.ee/raamat/Read\\_up\\_on\\_Reed\\_eesti-keeles.pdf](http://www.pilliroog.ee/raamat/Read_up_on_Reed_eesti-keeles.pdf) (29.05.2014).

[25] Heinsoo, K., Jürgens, K., Kask, L., Kask, Ü., Koppel, A., Soosaar, S., Tilger, T., Värnik, R. 2005. Projekt:”Biokütuste tootmise ja kasutamise riikliku programmi ettevalmistamine”. [http://tek.emu.ee/userfiles/taastuenergia\\_keskus/Bioenergia+programmi+eeluuring+2005,09,16.pdf](http://tek.emu.ee/userfiles/taastuenergia_keskus/Bioenergia+programmi+eeluuring+2005,09,16.pdf) (29.05.2014).

[26] Kask, Ü., Paist, A., Nuutre, M., Kask, L. & Aavik, T. 2007. Pilliroo kui kütuse põlemistehnilistest näitajatest. [http://www.pilliroog.ee/EPLJ%20artikkel%202007\\_22\\_24.pdf](http://www.pilliroog.ee/EPLJ%20artikkel%202007_22_24.pdf) (29.05.2014)

- [27] Lautkankare, R. 2007. Pillirooehitus Läänemere regioonis. [http://www.pilliroog.ee/raamat/Read\\_up\\_on\\_Reed\\_eesti-keeles.pdf](http://www.pilliroog.ee/raamat/Read_up_on_Reed_eesti-keeles.pdf) (29.05.2014.)
- [28] Hagelberg, E. & Lyytinen, S. 2007. "Pikk ja käänuline tee rannast katlasse". Pilliroo muutmine bioenergiaks. [http://www.pilliroog.ee/raamat/Read\\_up\\_on\\_Reed\\_eesti-keeles.pdf](http://www.pilliroog.ee/raamat/Read_up_on_Reed_eesti-keeles.pdf) (29.05.2014).
- [29] I Rutherford and MC Healt ETSU (ADAS). 1992. The potential pf miscanthus as a fuel crop. 125 lk. (Käsikiri.)
- [30] Wilkins, C. 1992. Miscanthus – A new crop for newrequirements. 7 lk. (Käsikiri.)
- [31] Jones, M, B. & Walsh, M. 2001. Miscanthus for Energy and Fiber. The Cromwell Press. UK. 192 lk.
- [32] Brosse, N., Dufour, A., Meng, X., Sun, Q. & Ragauskas, A. 2012. Miscanthus: a fast-growing crop for biofuels and chemicals production. [http://bioenergycenter.org/besc/publications/brosse\\_miscanthus\\_yr5.pdf](http://bioenergycenter.org/besc/publications/brosse_miscanthus_yr5.pdf) (29.05.2014)
- [33] Caslin, B., Finnan, J. & Easson, L. 2010. Miscanthus best practice guidelines. <http://www.afbini.gov.uk/miscanthus-best-practice-guidelines.pdf> (29.05.2014)
- [34] Aiasöber. 2014. Siidpööris. <http://www.aiasober.ee/liigikirjeldused/216> (29.05.2014)
- [35] Jõgeva Sordiaretuse Instituut. 2007. Päideroo, teraviljade ja kanepi kasutusvõimalused energiakultuurina Eestis. Aruanne. [http://www.bioenergybaltic.ee/bw\\_client\\_files/bioenergybaltic/public/img/File/MES\\_bioenergia.pdf](http://www.bioenergybaltic.ee/bw_client_files/bioenergybaltic/public/img/File/MES_bioenergia.pdf) (29.05.2014)
- [36] Kask, Ü., Kask, L. 2010. Looduslike ja poollooduslike rohumaade energiapotentsiaal. Eesti Põlevloodusvarad ja -jätmed. 1-2/2010. lk 22 – 24.
- [37] Keskkonnaministeerium. 2013. Poollooduslike koosluste tegevuskava aastateks 2014-2020. [http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1201964/PLK\\_tegevuskava130913.pdf](http://www.envir.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=1201964/PLK_tegevuskava130913.pdf) (29.05.2014)

Tabel 1. Töös käsitletud materjalide omaduse koondtabel.

	Niiskus proovis %	Niiskus algne %	Tuhk %	Q pommkütteväärtus	Töökütteväärtus Q alge niiskusega (kJ/g=GJ/t)	Q niiskusel 20% (kJ/g=GJ/t)	kogused t/ha saagikus	Energia GJ/ha (kuivaines)	Energia GJ/ha (algniiskuse korral)	Energia GJ/ha (20% niiskuse korral)	Järelejääv tuhk, t/ha
Oder	5,00±0,33	21,20±0,00	5,85±0,07	17,645±0,026	13,904±0,021	14,116±0,021	2,191±0,071	38,64±0,71	30,45±0,56	30,91±0,57	0,128±0,003
Nisu	5,67±0,33	24,60±0,00	3,24±0,04	18,181±0,004	13,709±0,003	14,545±0,003	1,221±0,072	23,54±0,79	17,75±0,59	18,84±0,63	0,042±0,001
Rukis	8±1,33	29,00±0,00	4,63±0,09	17,739±0,022	12,594±0,015	14,191±0,017	3,306±0,067	58,63±0,67	41,62±0,47	46,90±0,53	0,153±0,002
Pilliroog	3,67±0,33	45,00±0,00	6,91±0,13	17,940±0,007	9,867±0,004	14,352±0,005	8,250±0,890	148,00±9,22	81,40±5,07	118,40±7,37	0,570±0,036
Luhahein	4,00±0,00	28,51±0,00	4,71±0,03	18,546±0,014	13,260±0,010	14,837±0,011	2,850±0,00	52,86±0,04	37,79±0,03	42,29±0,03	0,134±0,001
Siidpööris	3,33±0,67	3,33±0,67	1,88±0,06	18,659±0,020	18,037±0,073	x	10,900±3,800	203,38±40,94	196,60±25,91		0,204±0,041