



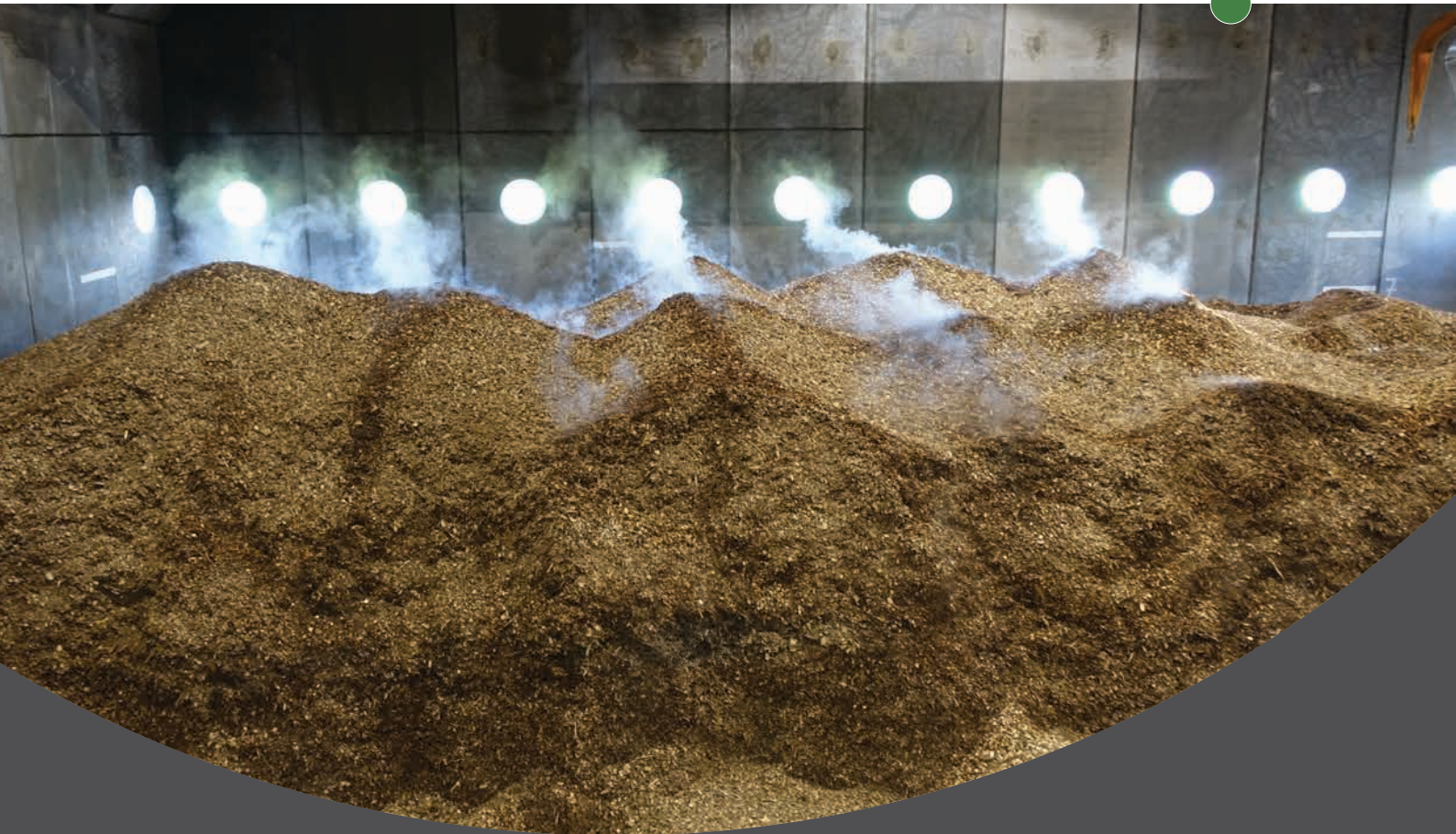
## Lagring af flis - Et litteraturstudie

Skov, Simon; Andersen, Katrine; Suadicani, Kjell

*Publication date:*  
2018

*Document version*  
Også kaldet Forlagets PDF

*Citation for published version (APA):*  
Skov, S., Andersen, K., & Suadicani, K. (2018). *Lagring af flis - Et litteraturstudie*. Frederiksberg: Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. IGN Rapport



# Lagring af flis

## – Et litteraturstudie

Simon Skov, Katrine Andersen og Kjell Suadicani

IGN Rapport  
December 2018

**Titel**

Lagring af flis – Et litteraturstudie

**Forfattere**

Simon Skov, Katrine Andersen og Kjell Suadicani

**Bedes citeret**

Simon Skov, Katrine Andersen og Kjell Suadicani (2018): Lagring af flis – Et litteraturstudie. IGN Rapport, december 2018, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Frederiksberg. 71 s. ill.

**Udgiver**

Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning  
Københavns Universitet  
Rolighedsvej 23  
1958 Frederiksberg C  
ign@ign.ku.dk  
www.ign.ku.dk

**Ansvarshavende redaktør**

Claus Beier

**ISBN**

978-87-7903-803-5 (web)

**Omslag**

Jette Alsing Larsen

**Forsidefoto**

Simon Skov

**Publicering**

Rapporten er publiceret på [www.ign.ku.dk](http://www.ign.ku.dk)

**Gengivelse er tilladt med tydelig kildeangivelse**

Skriftlig tilladelse kræves, hvis man vil bruge instituttets navn og/eller dele af denne rapport i sammenhæng med salg og reklame

## Forord

Dette litteraturstudium omhandler lagring af flis, og der er særlig fokus på spørgsmålet om tørstof-tab ved lagring. Studiet er foretaget efter en omfattende litteratursøgning, dels i Det Kongelige Biblioteks databaser, dels ud fra litteraturlisterne på kendt litteratur. Litteraturen omfatter både korte videnskabelige artikler og længere rapporter. Der er overvægt af ældre svenske værker. Der er udpræget mangel på nyere litteratur.

Alle temaer i forbindelse med lagring af flis er domineret af hypoteser, der i forskellig grad er afprøvet i praksis. Da stakstørrelsen er væsentlig for resultaterne, men også en belastning for forskningsprojekterne, så indgår der forholdsvis mange små og mellemstore stakke i undersøgelserne. Det er uvist om resultater fra små stakke kan skaleres op til store stakke. En vigtig faktor er, at vejret har stor indflydelse på resultaterne af udendørs forsøg. Vejret påvirker ikke store og små stakke ens.

Forskelle i biomassetype, skalering og vejr anses som vigtige kilder til variation i resultaterne fra forskellige undersøgelser.

De dynamikker, der foregår i store stakke og leder til tørstof-tab og i sjældne tilfælde til selvantændelse, er yderst vanskelige at måle. Det er også vanskeligt at adskille faktorer som brændværdi, tørstof-tab og tørring, som tilsammen bestemmer stakkenes energiudvikling. Litteraturen er præget af disse vanskeligheder.

Rapporten er bygget op med en række overordnede emner som overskrifter. Hvert emne indledes med en kort intro. Herefter belyses emnet med en række citeringer, der hver især er valgt for at belyse emnet bedst muligt. Det er tilstræbt, at der kun anvendes én kilde til hvert udsagn, og så vidt muligt at anvende originale forsøgsrapporter frem for sekundær litteratur. I de tilfælde, hvor flere kilder kommer til samme resultat, da er kilden med størst tyngde valgt. Efter hvert emne findes en konklusion, der i korte træk opsummerer de resultater, der er fremlagt som citater. Rapporten indeholder emnerne: Nedbrydningsprocesser, temperaturudvikling, selvantændelse, tørstof-tab, vand, brændværdi, askeindhold, lagring, og gasemission.

Som bilag findes en skematisk gennemgang af al litteratur med hovedvægt på at referere hvert praktisk forsøg. Det er intentionen at baggrunden for hvert udsagn i rapporten kan findes ved at finde beskrivelsen af referencens arbejde. Alle udsagn i rapporten er knyttet til kilden med referencenumre. Desuden findes en traditionel alfabetisk litteraturliste.

Som output af litteraturgennemgangen er der lavet en oversigt over forsøgsparametre og resultater. Det er gjort som et forsøg på at ekstrahere overordnede resultater på baggrund af forskelligartede forsøg. Selve

oversigtsskemaet ses som bilag. Mange rapporter leverer resultater f.eks. tørstofstab opgjort i tidsintervaller for lagring. Disse resultater er kategoriseret i tre-måneders grupper. Datasættet danner grundlag for flere figurer gennem rapporten. Fælles for dem er, at opgørelserne dækker over variationer i materialer og behandlinger.



En flisstak opbygges. (Foto: Simon Skov)

## Indhold

Forord .....	3
Indhold.....	5
Formål.....	7
Resumé .....	7
Baggrund .....	9
Nedbrydningsprocesser.....	12
Mekanismer.....	12
Svampe .....	13
Bakterier .....	15
Kemisk nedbrydning .....	15
Partikelstørrelse .....	15
Konklusion .....	15
Temperaturudvikling.....	17
Konklusion .....	19
Ventilation og partikelstørrelse.....	20
Konklusion .....	21
Selvantændelse .....	21
Konklusion .....	23
Tørstofstab.....	24
Konklusion .....	28
Vand.....	29
Konklusion .....	32
Brændværdi.....	33
Konklusion .....	36
Askeindhold .....	36
Konklusion .....	36
Lagring .....	37
Konklusion .....	39
Tørring .....	39
Konklusion .....	40
Lagring før hugning.....	40

Konklusion.....	41
Presenning og tag .....	41
Konklusion.....	42
Komprimering .....	43
Konklusion.....	44
Gasemission.....	44
Konklusion.....	45
Samlet konklusion.....	46
Nedbrydningsprocesser .....	46
Temperaturudvikling .....	46
Selvantændelse.....	47
Tørstoftab .....	47
Vand .....	47
Brændværdi .....	48
Askeindhold .....	48
Lagring.....	48
Tørring.....	49
Lagring før hugning .....	49
Tildækning.....	49
Komprimering .....	49
Gasemission.....	49
Bilag 1, Dataskema.....	50
Bilag 2, Referenceoversigt .....	52
Bilag 3, Litteraturliste.....	68
Artikler .....	68
Rapporter.....	70
Foredrag.....	71

## Formål

Det er formålet med denne litteraturgennemgang at samle den eksisterende viden om lagring af flis med særlig fokus på svind af tørstof.

## Resumé

På baggrund af en litteraturgennemlæsning med tilhørende dataopsamling og databehandling er flislagring behandlet under overskrifterne:

Nedbrydningsprocesser, temperaturudvikling, selvantændelse, tørstoftab, vand, brændværdi, askeindhold, lagring, gasemission.

Flis, der lagres i stak, nedbrydes ved biologiske processer, der medfører en opvarmning. Hvis flisen er lavet af levende træer, afgiver parenkymceller varme. I al flis sker der en kraftig vækst af svampe og bakterier, som frigiver varme, når de respirerer. Når stakke bliver over 60 °C, så dæmpes mikroorganismernes aktivitet, og kemiske processer opnår en stigende betydning. I de fleste tilfælde, så bliver flisstakke op til 60-80 °C som makstemperatur. Jo større andelen af nåle/blade, kviste og bark er i flisen, jo hurtigere bliver stakken varm, og jo længere tid er den varm. Flis med mange fine partikler og meget våd flis bliver ligeledes særlig varm.

Varmeudviklingen skyldes nedbrydningsprocesserne. Nedbrydningen fodres af organiske stoffer fra flisen. Uanset om nedbrydningen forårsages af svampe eller kemiske processer, så omdannes energirige forbindelser til varme, vand og mindre energirige molekyler. Der sker et tørstoftab, så der samlet set er mindre flis i stakken. Denne proces skal ikke forveksles med, at flisstakke sætter sig med tiden og derfor svinder i volumen. Tørstoftabet varierer med lagringstiden, fliskvaliteten og vandindholdet. Resultaterne fra publicerede undersøgelser er analyseret og viser et gennemsnitligt tørstoftab på 1,3 % om måneden i det første år. Dette tal dækker over en variation af fliskvaliteter og behandlinger. Litteraturen viser gennemsnitlige resultater fra 3 % svind til -0,1 % pr. måned, og betydeligt højere/lavere enkeltmålinger.

Varmen i flisstakke medfører, at der fordamper vand fra stakkens kerne. Den varme og fugtige luft stiger opad og forlader stakken via varme og fugtige kanaler, kaldet "skorstene". Samtidig sker der en kondensering af damp i stakkens kolde yderste lag. Efter et par måneders lagring dannes der en varm og tør kerne og en kold og våd skorpe yderst mod overfladen. De to zoner er typisk skarpt afgrænset mod hinanden. Hvis stakken ligger i det fri, så er tommelfingerreglen, at stakken har samme vandindhold i gennemsnit før og efter lagring. Den damp, der forlader stakken, bliver modsvaret af den nedbør, der rammer stakken. Hvis stakken ligger under tag, vil der ske en udtørring. Ligger stakken under en ikkeåndbar presenning reduceres ventilationen i stakken og udtørringen begrænses.

Selvantændelse i brændselsflis er meget sjælden. Risikoen øges, hvis flisen er meget våd og indeholder mange nåle/blade, kviste og bark. Risikoen øges også,



hvis der er fremmedlegemer af metal i flisstakken. De fleste selvantændelser i flis sker i knust haveparkaffald.

Flisens brændværdi (MJ/kg) opgøres som hhv. øvre og nedre brændværdi. Den øvre brændværdi er materialets samlede energiindhold indregnet kondenseringsvarmen for det vand, der dannes under forbrændingen. Den nedre brændværdi kaldes også den effektive brændværdi og er den energi, der er tilbage, når det fugtige brændsel er brændt og det indeholdte og det dannede vand er fordampet. Den nedre brændværdi udtrykker altså brændslets overskudsenergi ved en given vandprocent. Den øvre brændværdi ændres ikke væsentligt under lagring. Den nedre brændværdi afhænger af vandets omfordeling, og bliver typisk højere i kernen og lavere i skorpen.

Flisens askeprocent bliver som regel højere under lagring. Undersøgelser peger på, at askeprocenten teoretisk set vil stige i takt med, at en del af flisen nedbrydes under lagring. Nedbrydningen efterlader uorganiske forbindelser som får askeprocenten til at stige i det tilbageværende materiale. I praksis har det større betydning, at flisen forurenes fra omgivelserne f.eks. af grus fra underlaget eller flyvesand i kystnære områder.

For at reducere varmeudviklingen og tørstoftabet, er det en god ide at sikre sig, at den flis, der skal lagres, er grov og har et lavt indhold af nåle/blade, kviste og bark. Desuden skal den gerne være relativt tør med en vandprocent under 40 %. Der findes ikke entydige resultater angående overdækning og komprimering, men de fleste er enige om, at komprimering øger risikoen for selvantændelse. Det kan ikke betale sig at tørre flisen inden lagring. Det bliver derimod anbefalet, at vente med at hugge flisen og opbevare biomassen i sin oprindelige form, så længe som muligt.



Udendørs lagret flis af grov kvalitet med lille andel nåle, kviste og bark. (Foto: Simon Skov)

## Baggrund

Flis er et forholdsvist nyt brændsel og et nyt produkt i skovene. I Danmark blev de første flisfyrede varmeværker bygget i begyndelsen af 1980'erne. Forbruget af flis er steget kraftigt fra omkring år 2000 og til i dag, hvor der er et estimeret forbrug på 2 mio. ton flis (frisk vægt).

På baggrund af den hastige udvikling i brugen af flis er der stadig potentiale i optimering af dyrkning, produktion, lagring og udnyttelse. Der er udbredt mangel på videnskabelige resultater, og praksis bygger derfor i høj grad på udokumenterede forventninger.

Meget flis lagres, inden det bruges. Der er tre hovedårsager til den praksis. 1) Det er optimalt at hugge flis i skovene om sommeren, hvor jorden kan bære de tunge maskiner og biomassen er relativt tør. 2) Forbruget af flis er knyttet til vintermånederne, hvor behovet for fjernvarme er størst. 3) Der er et stort behov for forsyningsikkerhed, så energiværkerne uanset vejret har adgang til brændsel. Disse tre hensyn leder til, at en stor del af brændselsflisen lagres mellem produktion og afbrænding. Lagringen kan enten ske i skovene, ved værkerne eller på en terminal mellem skov og værk.

Arbejds miljøet ved håndtering af flis er ikke i fokus ved denne litteraturgennemgang. Men man kan ikke beskæftige sig med væksten af svampe i flisstakke uden at nævne, at skimmelsvampene udgør en helbredsrisiko. Ganske hurtigt efter flisen er hugget, er der massiv vækst af skimmelsvampe. Disse svampe er kendetegnet ved at danne enorme antal af sporer. Når flis håndteres, bliver disse sporer frigivet og svæver i luften omkring arbejdsstedet. Indåndes store koncentrationer af sporer risikerer man at få akut ODS. Symptomerne ligner influenza, og går over på et døgn eller to. Man bør kende reaktionen, hvis man arbejder med flis. Langvarig eksponering for skimmelsvampesporer medfører risiko for alveolitis, som kan føre til en permanent nedsættelse af lungefunktionen. Man bør benytte passende værnemidler ved omgang med flis.

### Usikkerhed på beregninger af tørstof tab

Mange undersøgelser har konkluderet, at det er forbundet med stor usikkerhed at estimere tørstoffabet ved lagring. Det skyldes, at der er en række usikkerheder i beregningen, som samlet medfører en meget betydelig usikkerhed på slutresultatet.

Ofte gennemføres estimeringen af tørstoffabet ved at trække tørstoffet efter lagring fra tørstoffet før lagring. Der er betydelig usikkerhed på estimeringen af tørstoffet før og efter lagring, men den mest betydende usikkerhed knytter sig til selve substraktionen.

Det er således, at usikkerhed akkumuleres ved substraktion, og det betyder, at små fejl på minuenden og subtrahenden kan medføre meget betydelig fejl på differencen, hvis minuenden og subtrahenden ligger tæt på hinanden.

Usikkerheden på tørstofbestemmelsen før og efter lagring knytter sig til usikkerheden på brovægten og usikkerheden på bestemmelsen af vandindholdet. Da disse to tal multipliceres, vil den samlede relative usikkerhed fremkomme som summen af faktorerens to relative usikkerheder. Usikkerheden på brovægten skønnes at være 20 kg på hver måling, altså 40 kg på nettovægten, hvilket er ca. 0,25 %. Usikkerheden på tørstofprocenten udgøres dels af måleusikkerheden, dels af repræsentationsfejlen. Måleusikkerheden er formentlig omkring 2 procentpoint, hvilket svarede til ca. 4 %, mens det er vanskeligere at skønne over repræsentationsfejlen, men den skønnes at være større end måleusikkerheden, fx omkring 3 %.

Samlet er usikkerheden på tørstofbestemmelsen før og efter formentlig mindst 5 %. Da vi ofte har at gøre med differencer i tørstofmængden før og efter lagring på 0-1 %, er det sådan, at en usikkerhed på 5 % på minuenden og subtrahenden vil medføre en usikkerhed på mere end 1000 % på differencen. Med andre ord er det vanskeligt at producere gode og sikre resultater om svind i fuld skala.

### Komplekst samspil

Der er ingen tvivl om, at hver enkelt faktor for lagring spiller ind og spiller sammen med andre faktorer, som tilsammen bestemmer udviklingen i en flisstak. Når hele emnet er præget af varierende og i nogen grad modstridende resultater, så skyldes det bl.a. dette netværk af faktorer og konsekvenser.

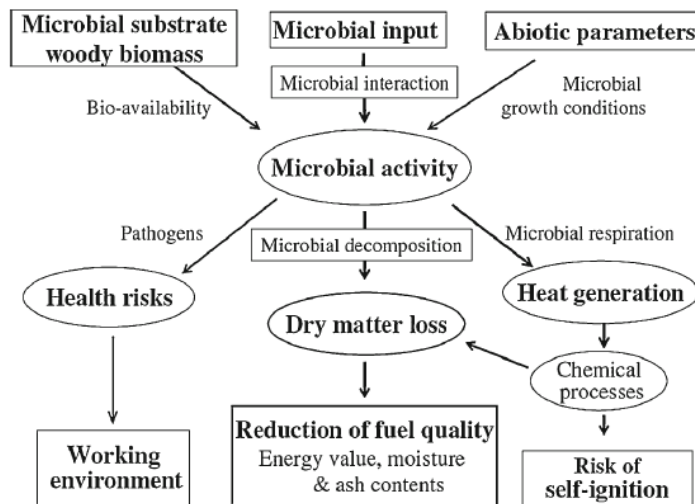
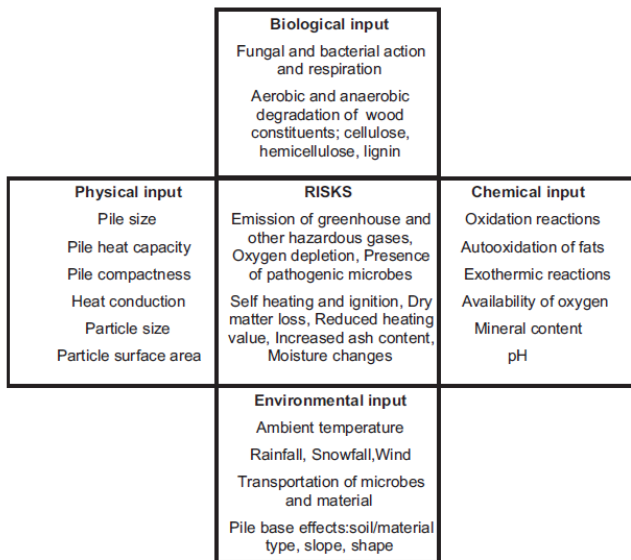


Fig. 1 A scheme showing key parameters for microbial activity, problems caused by this activity, its consequences on fuel quality and potential risks associated with storage of wood chips in large piles

Figur 1. Figur fra ref. 7. Opstillingen viser, hvordan typer af faktorer påvirker en flisstak og medfører forskellige udfald af lagringen.



**Fig. 1.** A scheme summarizing the key inputs and factors leading to risks on human health, the environment and property during long-term, large scale storage of wood chips.

**Figur 2.** Figur fra ref. 13. Illustrerer det komplekse samspil med ord. Bemærk, at stikordene i figuren kan genfindes som emner i denne.

## Nedbrydningsprocesser

*De processer, der indledes, når flis hugges og lagres, er led i den naturlige nedbrydningsproces, og har det til fælles, at energirige kemiske forbindelser nedbrydes til mindre energirige forbindelser, hvorved der frigives energi, som enten optages af nedbryderorganismen eller afledes som varme. Nedbrydningen er årsagen til selvopvarmning, ændring af flisens sammensætning og tørstoftab.*

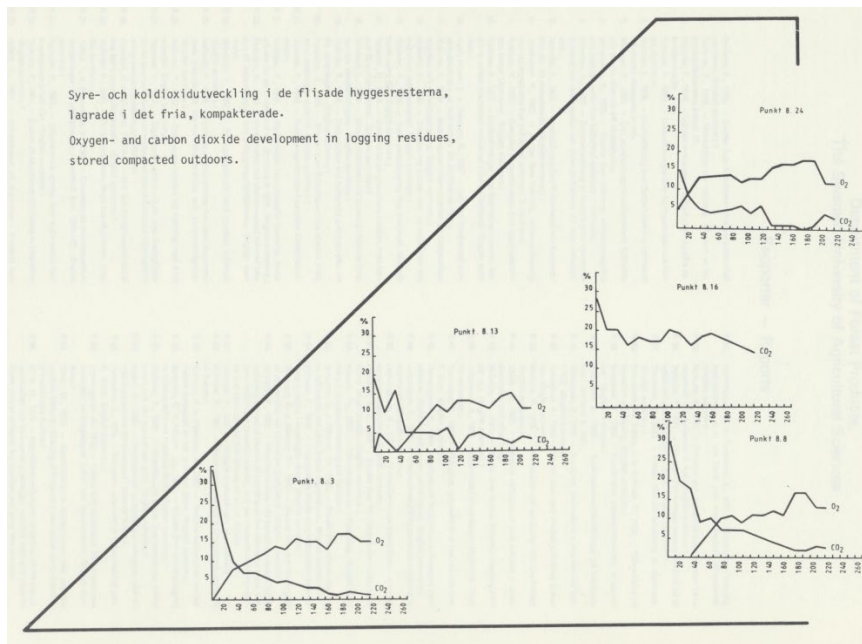
## Mekanismer

Nøglemekanismerne (ref. 17, 13, 30 mfl.), som er årsagen til de væsentligste ændringer i lagret biomasse, er:

- 1) Levende cellers respiration. Parenkymceller. Når levende træ høstes og findeles kommer der ilt til parenkymcellerne, hvilket øger respirationen i stadigt levende celler. Dette giver temperaturstigning og et mindre massetab. Cellerne findes i splintved, cambium, inderbark og løv/nåle. Cellerne dør ved temperaturer under 0 og over 60 °C.
- 2) Biologisk aktivitet. Bakterier og svampes respiration. Bakterier og svampe fungerer bedst under bestemte fugt-, temperatur- og oxygenforhold. Vandindhold over fibermætningspunktet er favorabelt for svampe. Vandindhold på 30-50 % er ideel for svampevækst.
- 3) Eotermiske reaktioner er kemiske reaktioner, som frigør energi. Oxidation og hydrolyse er exotermiske reaktioner (ref. 30). Disse reaktioner kræver ofte en vis temperatur, og det betyder, at yderligere temperaturstigning og tørstoftab finder sted, når temperaturen først er steget. De kemiske processer sker kun i ringe grad under 40 °C, men bliver dominerende over 50 °C (ref. 8).

Ref. 35: Finder, at der er samme temperaturudvikling i flisstakke uanset om flisen er hugget af friskfældede træer eller træerne er for-tørret i to år. Dette tyder på, at temperaturstigningen i flisstakke ikke initieres af varme fra levende parenkymcellers respiration, som andre kilder angiver.

Ref. 26: Ændringen i mængden af CO<sub>2</sub> og oxygen afspejler den biologiske og kemiske aktivitet i flisstakken. I løbet af de første 24 timer stiger CO<sub>2</sub> indholdet til 25-30 % i stort set hele stakken og oxygenindholdet falder generelt til 0 %. I forsøget faldt CO<sub>2</sub> indholdet inde i stakken til omkring 8-10 % efter en uge og faldt til 1-4 % efter 5 uger. Indholdet af CO<sub>2</sub> forblev på dette niveau under resten af lagringen. Dette indikerer, at der fortsat er biologisk og kemisk aktivitet i stakken, men at aktiviteten er aftagende.



Figur 3. Figur fra ref. 33. Ilt og CO<sub>2</sub> i en stak af grot, lagret i det fri og komprimeret. Hver af de 5 grafer er placeret på den position i stakken, hvor målepunktet var. I den første del af lagringsperioden ses en lav iltkoncentration og en høj CO<sub>2</sub>-koncentration, hvilket indikerer en høj biologisk aktivitet. Senere i lagringsperioden falder CO<sub>2</sub>-koncentrationen og iltkoncentrationen stiger, hvilket viser, at den biologiske aktivitet aftager og stakken ventilerer. Der findes lignende figurer for ikke-komprimeret flis, hvor gaskurverne viser mindre udsving på grund af øget ventilering.

## Svampe

Ref. 18: Skimmelsvampe er meget tolerante i forhold til fugtighed (20-150 %) og temperatur (-3-55 °C). Skimmelsvampe nedbryder let-omsættelige forbindelser, og de opformerer sig hurtigt. Vednedbrydende svampe er en anden gruppe i svamperiget modsat skimmelsvampene kan de vednedbrydende svampe i forskellig grad nedbryde cellulose, hemicellulose og lignin. De vednedbrydende svampe er mindre tolerante mht. fugtighed (30-120 %) og temperatur (0-40 °C) end skimmelsvampene. Skimmelsvampe har stor betydning for nedbrydning af løv, nåle og andre fraktioner med let-nedbrydelige forbindelser, mens vednedbryderne har stor betydning for nedbrydning af vedmasse.

Ref. 30: Svampe spredes enten vha. sporer eller hyfevækst. Svampekategorien vednedbrydere står for den væsentligste del af tørstof-tab. Langt de fleste termofile svampe dør ved temperaturer over 60 °C. De optimale fugtighedsforhold for svampe er 30-60 %. Over 70-80 °C ophører svampenes virksomhed og yderligere temperaturstigning stammer fra energi frigjort ved kemiske processer.

Ref. 14: Nedbrydningen af flis i stak er selvforstærkende til en vis grad. I flisstakken omsættes flis til CO<sub>2</sub>, vand og varme, hvilket medfører et tørstof-tab, men også ekstra vand og ekstra varme. Nedbrydningen skaber dermed bedre betingelser for sig selv, indtil organismernes øvre tolerancer nås. Generelt øges den biologiske omsætning op til omkring 60 °C. Nedbrydningshastigheden afhænger desuden af vand- og næringstofindhold. Derfor sker nedbrydningen

hurtigere i grøn flis med nåle, hvorimod den sker langsommere i sommertørret skovflis.

Ref. 7: Ved nedbrydende svampe opdeles i hhv. hvidmulds- og brunmuldssvampe. Hvidmuldssvampe nedbryder både lignin, hemicellulose og cellulose, mens brunmuldssvampe nedbryder cellulose og efterlader lignin.

Ref. 6: Nedbrydning af træ medfører ændringer i det indbyrdes forhold mellem cellulose/hemicellulose- og lignin. Hvis ligninindholdet i det lagrede materiale stiger, ofte pga. brunmuldssvampe, sker der også i en stigning i den kalorimetriske brændværdi pr. kg tørstof. Nedbrydning af organisk materiale betyder samtidig, at procentdelen af uorganisk materiale (aske) stiger.

Ref. 7: Det er rapporteret af mange forfattere, at lignin har højere øvre brændværdi (25,54 MJ/kg) end hemicellulose og cellulose (17,4-18,2 MJ/kg for cellulose). Den øvre brændværdi er relateret direkte til materialets elementære komposition. Der er fundet en lineær sammenhæng mellem højere brændværdi og karbonindhold. Derfor kan selektiv mikrobiel nedbrydning af disse komponenter ud over tørstofftab, ændre energiindholdet i lagret biomasse.

Ref. 29: Nedbrydeligheden varierer mellem forskellige fraktioner af flis. Løv/nål, kviste og bark er lettest at nedbryde, mens ved er tungest nedbrydeligt. Flisens indhold af de forskellige fraktioner bestemmer en nedbrydningskarakteristik. Generelt vil yngre træer give en flis, som nemmere nedbrydes, end flis fra ældre træer.



Synlig svampemycelium over flis efter transport i lukket lastrum. (Foto: Simon Skov)

## Bakterier

Ref. 7: Bakterier kan modsat svampene opretholde aktiviteten under iltfrie forhold. Bakterier kan nedbryde letnedbrydelige stoffer f.eks. fra celler, der brydes under flisningen. Bakterier kan i nogen grad nedbryde cellulose/hemicellulose. Bakterier får først en betydende rolle som vednedbryder, når flisen enten er så våd eller så iltfattig, at svampenes aktivitet forhindres.

Ref. 21: Bakterietypen actinomyceter har særligt termofile arter, der kan opretholde nedbrydningen af cellulose/hemicellulose ved højere temperaturer end svampene.

## Kemisk nedbrydning

Ref. 21: Oxidation af indholdsstoffer i ved sker kun i ringe grad ved temperaturer under ca. 80 °C. Fra 80- 90 °C sker der en exoterm oxidation, som forstærkes med stigende temperatur.

Over ca. 100 °C begynder pyrolyseprocesser hvor træ fordamper og gradvist omdannes til trækul.

Ref. 8: Kemisk nedbrydning begynder at have indflydelse ved 40 °C og bliver dominerende ved temperaturer over 50 °C.

## Partikelstørrelse

Ref. 7 viser, at partikelstørrelsen spiller en væsentlig rolle for mikrobiel etablering og vækst. Jo mindre partikler jo større mikrobiel aktivitet. Ved flisning af hugstaffald brydes cellevæggene, hvorved der frigives opløseligt indhold, som derefter er til rådighed for mikroorganismer. Derudover øger findelingen overfladearealet, hvilket faciliterer omfattende kolonisering af mikroorganismer.

Ref. 8: Nedbrydningen fremmes ved mindre partikelstørrelse i brændslet. Træflis fra løvtræ har en højere tendens til at blive angrebet af svampe sammenlignet med nåletræ, hvilket formentlig kan forklares ved et mindre indhold af lignin, som er tungt nedbrydeligt.

## Konklusion

Nedbrydningen i flisstakke skyldes 1)respiration i levende celler, 2)mikrobiel aktivitet, 3)exoterme kemiske processer. Førstnævnte aftager i takt med, at cellerne dør. Sidstnævnte øges, når temperaturen overstiger 40-50 °C og er helt dominerende over ca. 80-90 °C.

Den væsentligste årsag til tørstof-tab er vednedbrydende svampes aktivitet.

Der er svampevækst i stakke med fugtigheder fra ca. 20 % til ca. 150 %, og temperaturer fra ca. 0 °C til ca. 60 °C, hvilket betyder, at der i praksis altid er svampeaktivitet i skovflis.

Bakterier har generelt en ringe evne til at nedbryde ved, men kan opretholde aktiviteten under iltfrie og mere våde og varme forhold, end svampe kan.



Over ca. 100 °C begynder pyrolysen at fordampe træ, hvorved afgasset trækul efterlades.

Jo større andel af små partikler, der er i en stak, jo større er den mikrobielle aktivitet, idet koloniseringen af en partikel sker fra overfladen.

Jo større andel nåle/løv, kviste og bark, jo hurtigere nedbrydning, idet ved nedbrydes langsommere end de "bløde" fraktioner.

Nedbrydningen medfører tørstof-tab og varmeudvikling.



Lille stak af bark med meget høj biologisk aktivitet. (Foto: Simon Skov)

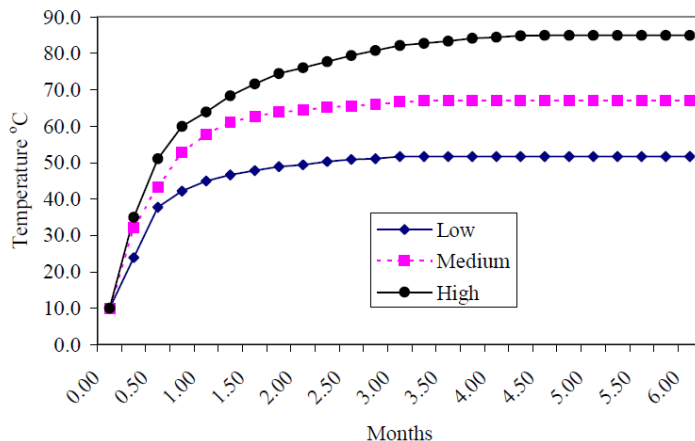
## Temperaturudvikling

Temperaturstigningen i flisstakke hænger sammen med de nedbrydningsprocesser, der bl.a. omdanner flisens energi til varme.

Ud over de tre mekanismer (respiration i træceller, mikrobiel nedbrydning og kemisk oxidation og hydrolyse – se "Nedbrydning"), som alle genererer varme ved nedbrydning, så er de fysiske mekanismer fordampning/kondensation vigtige faktorer i fordelingen af varme i en flisstak. Fordampning er en endoterm proces, mens kondensation er en exoterm proces. Det betyder, at der skal tilføres energi for at fordampe vand, og modsat, at der tilføres varme, når vand kondenserer. Omfanget af disse processer er vigtige for vandindholdet i forskellige dele af stakken, idet fordampning ofte sker i det indre af stakken, mens vandet ofte kondenserer i de yderste lag af stakken, hvis ikke dampen forsvinder ud i luften. Varme fra nedbrydningsprocesserne anvendes til fordampning i det indre af stakken. Isoleret set betyder opvarmning i det indre af en stak, at fordampningen øges, og at temperaturstigningen herved holdes nede.

En vigtig faktor for temperaturudviklingen er flisstakkens isoleringsforhold, som er afgørende for om den producerede varme akkumuleres eller ledes ud af stakken.

Varmeproduktionen og efterfølgende stakkens isoleringsevne er tilsammen mekanismerne bag temperaturudviklingen over tid i flisstakke.



**Figure 1. The effect of stack height on temperature**

Figur 4. Figur fra ref. 29. Figuren er teoretisk illustration af temperaturudviklingen ved tre stakhøjder. Mange empiriske data viser en hurtig opvarmning til den maksimale temperatur og derefter en faldende temperaturudvikling.

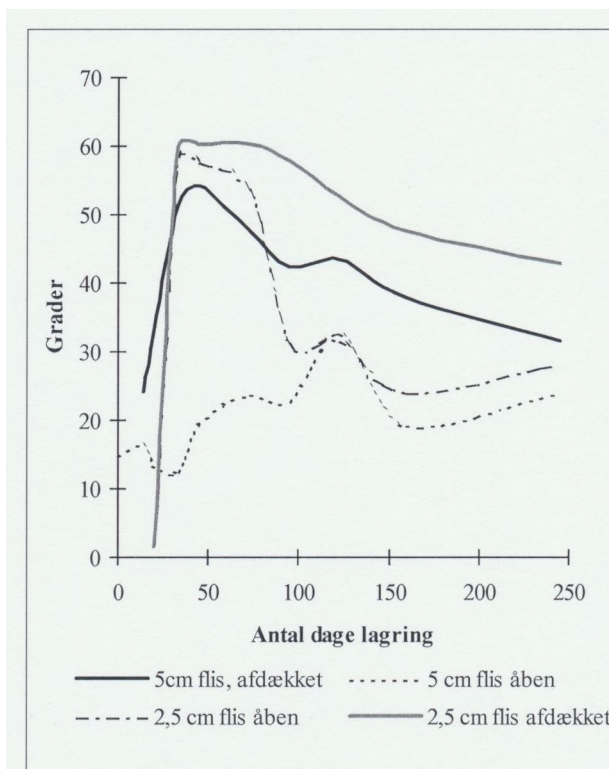


Fig. 1: Temperaturforløb i stakke med frisk pileflis.

Figur 5. Figur fra ref. 4. Typisk temperaturforløb med hurtig temperaturstigning i de første uger og derefter en langsom afkøling.

Ref. 8: De vigtigste faktorer, der influerer på temperaturen i stakke af træbiomasse er vandindhold, stakkens størrelse og densitet.

Ref. 4: Karakteristisk temperaturkurve: Hurtig stigning til et maksimum på 60 °C efter 10-30 (50) dage. Niveaue bestemmes af stakvolumen, overflade areal, omgivende temperatur og især partikelstørrelsen af flisen.

Ref. 24: Artiklen refererer til en række artikler af Thönqvist og Jirjis. Der vises en betydelig forskel i temperaturens forløb afhængt af vandindhold:

Hvis startvandindholdet er under 40 %, stiger temperaturen hurtigt, men falder igen efter 1-2 måneder. Ved et startvandindhold på 50-55 % vil kernetemperaturen normalt forblive høj gennem hele lagringsperioden.

Ref. 17: Empiriske observationer, der beskriver hurtig temperaturstigning fra respiration fra levende celler i nyhuggede flisstakke. Der måles temperaturer på 49-82 °C efter en 7-dages periode.

Ref. 6: Temperaturen i stakke af neddelte hugstaffald (til flisagtige fraktioner) varierer væsentligt, afhængig af stakkens størrelse, partikelstørrelse, materialets vandindhold, da stakken blev bygget og det indbyrdes mængdeforhold imellem træ, bark og nåle. Generelt giver en stigning i andelen af bark og nåle en stigning i temperatur. Materiale med højere vandindhold holder en høj temperatur i længere tid end tørrere materiale. Hvis materiale tørres til en vandprocent under

20 %, kan der ikke måles nogen temperaturstigning.

Temperaturen i en 55 m<sup>3</sup> stak frisk hugstaffald kan stige til over 60 °C på 14 dage og holde temperaturniveauet i 6-7 måneder. Gøres stakken større til 400 m<sup>3</sup> kan temperaturen stige til over 85 °C i korte perioder.

Der blev observeret varmeudvikling på op til 90 °C, ved 6-9 måneders lagringsperiode.

Ref. 26: I de ydre dele af stakken steg temperaturen til 50-75 °C i løbet af få dage. I centrale dele, især nær jorden, var temperaturen langsommere om at stige. I de fleste tilfælde nåede disse områder en temperatur på 50 °C i løbet af 2-4 uger. For nærmest alle målepunkter indtrådte en pulserende fase, efter den maksimale temperatur var nået. Hurtige skrift med en amplitude på 10-20 °C i 2-3 uger. Herefter stabiliserede temperaturen sig omkring 70-75 °C de fleste steder og forblev sådan i omkring 4 måneder. Nogle steder især nær overfladen begyndte temperaturen at falde efter det pulserende stadie.

Ref. 26: I en 7 meter høj stak lå temperaturen på 60-80 °C, hvilket er for højt til optimal aktivitet for vednedbrydende svampe, og for lavt til høj aktivitet af kemisk nedbrydning. Dette leder til forholdsvis lave tørstof-tab sammenlignet med stakke på 3-5 m, hvor der sædvanligvis er tørstof-tab på 20 % efter 7-9 måneder (Thörnqvist 1982b og 1983a).

Ref. 30: Temperaturen i ikke-overdækkede flisstakke (ukendt træart) var mellem 50 og 60 °C i 16-18 måneder. Også i flis, der blev hugget af to år gammelt materiale, steg temperaturer til over 60 °C i løbet af 2 uger, og holdt denne temperatur i dele af lageret i over seks måneder.

Ref. 39: I lagringsforsøg med neddelt affaldstræ steg temperaturen i flisstakken ikke over 30 °C i de seks ugers lagring.

Ref. 21: Tilstedeværelsen af metal i den lagrede biomasse kan øge varmeudviklingen. Effekten registreres fra ca. 50 °C.

## Konklusion

Varmeudvikling og isoleringsevne er afgørende for temperaturudviklingen i en stak.

Generelt opnås en temperatur på mellem 60 og 80 °C i løbet af de første to ugers lagring af flis. Der bevares en høj, men typisk faldende, temperatur i adskillige måneder (6-18 mdr.).

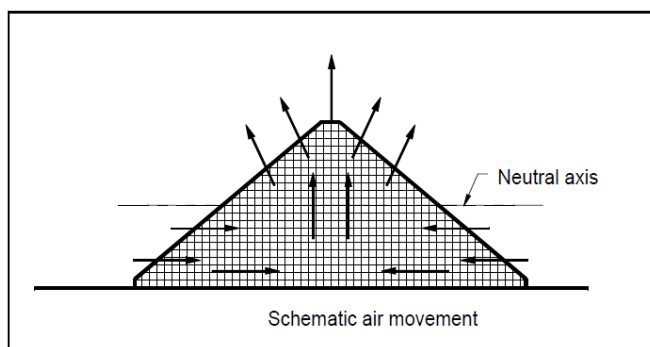
Jo vådere flisen er, jo højere bliver temperaturen i stakken.

Stakke med 15-20 % vandindhold vil følge den omgivende temperatur.

Tilstedeværelsen af metal i stakken kan øge varmeudviklingen

## Ventilation og partikelstørrelse

Ventilation og partikelstørrelse er en sammenhæng, idet størrelsen af partiklerne i stakken er afgørende for, hvordan luften bevæger sig.



Figur 6. Figur fra ref. 29. Viser luftstrømningerne i en opvarmet stak. Der suges kold luft ind nederst. Det opvarmes midt i stakken og løftes op. Den varme fugtige luft forlader toppen af stakken.

Ref. 14: Varmen i flisstakken afhænger af nedbrydningshastigheden og af, hvor grov flisen er. Jo grovere flis, jo bedre ventilation -> bedre afledning af varme + bedre tørring.

Ref. 3: Temperaturen i stakke af chunk var lavere end i flisstakke, og afhang mere af de omgivende betingelser.

Ref. 16: Temperaturen steg mest i stakke med fine partikler. Større overflade pr. volumen -> større mikrobiel aktivitet -> højere temperatur. I flis og fin chunk stiger temperaturen. I grov chunk og brændestykker er der ingen betydelig temperaturændring.

Ref. 24: Flisens partikelstørrelse er en vigtig faktor for temperaturudviklingen. En stak med en gennemsnitlig partikelstørrelse på 8mm, gav en hurtig temperaturstigning på over 60 °C. En anden stak med partikelstørrelse på 30 mm gav en temperaturstigning på 40-50 °C. Store partikler på 70 mm medførte ikke temperaturer over 30 °C. Stakkenes størrelse er ukendt.

Forklaringen er, at den biologiske aktivitet finder sted på flisens overflade. Fin flis har større overfladeareal pr. volumenendhed end grofthakket flis. Det medfører større mikrobiel aktivitet og derved højere temperatur. Samtidig falder den naturlige ventilation i stakken, med faldende partikelstørrelse.

Ref. 32: Sammenligning af flis og chunk under lagring i stak, i netkasser og i silo. Hovedsageligt birkeflis med 40 % vand fra start. Størst temperaturstigning i første del af lagringen. Under lagring i stak og netkasser steg temperaturen til maks. 65 °C. I den aktivt ventilerede silo steg temperaturen mindre. I både siloer og stakke blev der registreret en lavere temperaturstigning for chunk end for flis. Temperaturen svingede mere med den omgivende temperatur i lagre af chunk end i lagre af flis.

- Stak: Efter lagring var vandindholdet for flis og chunk i stak hhv. 24,2 % og 26,9 %. Flisen tørrede uens pga. central varmeudvikling og ydre kondensering. Chunk tørrede ensartet pga. bedre ventilation.
- Netkasser: Gav lidt bedre ventilation end stakkene. Chunk tørrede omkring 10 procentpoint bedre end flis. I sammenligning med andre studier, viser resultaterne også, at det har stor betydning at lagring sker under tag, hvis god tørring af brændslet skal finde sted.
- Silo: Den bedste tørring skete i siloerne med aktiv ventilation. Flis og chunk tørrede til hhv. 12 % og 13,6 %.

Ref. 37: Rapport med resultater fra 10 lagringstudier viser, at temperaturudviklingen afhænger mest af vandindholdet, men også af materialets findeling, stakstørrelsen og den relative andel af ved, bark og nåle. For findelt hugstaffald (flis) i en 3 m stak, ved omgivende temperatur over frysepunktet, stiger temperaturen til 60-70 °C i løbet af to uger. I centrale områder forbliver temperaturen på dette niveau i 6-7 måneder. Hvis stakken etableres hvor den omgivende temperaturer er under frysepunktet, skal der lægges adskillige uger til, før stakken når temperaturer på 60-70 °C. Den efterfølgende temperaturudvikling er uafhængig af, om omgivelserne er over eller under frysepunktet. Hvis flis tørres til et vandindhold på 15-20 %, vil temperaturen i stakken følge den omgivende temperatur.

## Konklusion

Jo grovere flisen er, jo mindre er varmeudviklingen pga. mindsket mikrobiel aktivitet.

Jo grovere flisen er, jo større er ventilationen i stakken. Ventilationen fører til en hurtigere afkøling og en øget tørring.

Jo grovere flisen er, jo bedre ledes den opvarmede og fugtige luft ud af stakken. Bedre ventilation fører til øget tørring under lagringen.

## Selvantændelse

*Selvantændelse er en proces, hvor materialet ulmer eller brænder uden udefrakommende antændelse, som fx flamme eller gnist.*

*Selvantændelse sker meget sjældent i skovflis, men oftere i flis lavet af have/parkaffald.*

*De biologiske processer kan varme flisstakke op til 60-80 °C og der er findes exoterme kemiske processer, der får betydning, ved højere temperaturer. Der kendes dog ikke en veldokumenteret forklaring på, at enkelte stakke bliver så varme, at de selvantænder.*

*Stakkens størrelse, materialets sammensætning, fugtighed og lagringstid er vigtige faktorer.*

Ref. 13: Varmeakkumulation i flisstakke er proportional med stakkens varmekapacitet, som igen er proportional med stakkens radius i tredje potens (=stakkens volumen). På den anden side er varmetabet til omgivelserne proportional med radius i anden potens (overflade areal). Dette betyder at, hvis radius fordobles fra fx to til seks meter, stiger varmetabet trefoldigt imens varmeakkumulationen stiger nifoldigt.

Ref. 20: Selvantændelse i biomasse skyldes, at den mængde varme, som genereres i materialet, er større end den mængde varme, der afgives til omgivelserne. Derved opstår en varmeophobning, som kan føre til selvantænding.

Bark indeholder 3-8 gange mere kvælstof og mange flere andre næringstoffer end vedmasse. Det medfører, at den mikrobielle aktivitet øges og accelereres, hvis biomasse indeholder bark. Selvantændelsesbrande er derfor mere hyppige i flis med bark sammenlignet med rent ved.

En spørgeskemaundersøgelse viser, at 26 % af brandene i lagret biomasse indeholdt materialet bark.

Træ har en antændelsestemperatur på 260-290 °C, men når træ i længere tid er opvarmet, kan det antænde ved temperaturer omkring 80 °C (pyrofort træ).

I beredskabsstyrelsens statistik udgør "Flisoplæg mv." (kompost, spagnum, flis og haveaffald) 15 % af alle selvantændte brande. De foregår hovedsageligt udendørs, er mere langvarige og slukningen koster mere end en gennemsnitsbrand.

Der findes ingen sammenhæng mellem selvantændelse og nedbør eller omgivende temperatur.

Ref. 19: Biologisk aktivitet varmer stakken op til 50-60 °C. Derefter sker der under visse omstændigheder en kemisk opvarmning, som kan lede til selvantændelse.

Ref. 10: En reduktion af partikelstørrelse øger risikoen for selvantændelse. Dette er vist ved "Hot storage tests" på savsmuld (gns. 0,25 mmØ) og flis (gns. 10 mmØ)

Ref. 45: Det bør undgås at mikse brændsel med forskelligartet vandindhold, da fugtighedsgradienten kan lede til forøget risiko for selvantændelse. Spontan antændelse starter som pyrolyse i de indre dele af stakken, og kun i de tilfælde hvor varmeproduktionen overstiger varmespredningen i materialet.

Ref. 19: Finder exoterm biologisk nedbrydning op til ca. 70°C og exoterm kemiske processer over 90°C. Fra 70 til 90 °C findes ingen forklaring varmeudviklingen.

Ref. 20: Der er tanker om, at der kan afgives brændbare gasser, der antændes ved lavere temperaturer end selve vedmassen. En opkoncentreringen af letantændelige gasser kan udløse en selvantændelse.

Ref. 30: Henviser til finske anvisninger for, hvordan flis bør lagres for at undgå selvantænding. Fire grupper med stigende risiko for selvantænding fra 1 til 4:

1. Sildet, næsten barkfri flis (råvare til celluloseindustrien)
2. Sildet flis af ikke afbarket træ. (En råvare til spånplade- og fiberpladeindustrien)

3. Usoldet flis af ikke-afbarket træ. evt. indeholdende savsmuld (flis, der anvendes til brændsel. Herunder al flis med grønne dele)
4. Ren bark og/eller savsmuld.

Den maksimalt tilrådelige højde i Finland er 30 m for gruppe 1 og 10 m for gruppe 3 (andre kategorier nævnes ikke)

Ref. 20: Myndigheders og "industriens aktører" opstiller en række anbefalinger for at undgå selvantændelse. Rådene er ikke kun rettet mod flis, men omfatter alle typer biomasse.

Rådene er:

- Oplagshøjden må maksimalt være 7-8 meter.
- Materialer af uens partikelstørrelse, fugtindhold og kvalitet må ikke lagres i samme stak.
- Komprimering bør undgås.
- Fugtindhold på mere end 15-20 % bør undgås.

Ref. 21: Ved tilstedeværelse af metal i oplagret biomasse vil varmeudviklingen stige og risikoen for selvantændelse øges.

Ref. 30: Efter langvarig lagring af flis kan temperaturen stige til over 100 °C og der er risiko for forkulning eller selvantændelse.

Ref. 41: Det så ikke ud til at påvirke temperaturen, om flisen var overdækket med et luftigt tag af presenning eller ej.

Ref. 47: De første 7-14 dage er raten for temperaturstigningen influeret af hvor friskt træet er og temperaturen kan typisk nå over 50 °C. En kemisk reaktion starter, når temperaturen bliver 60-70 °C. Her spaltes acetyl-gruppen, der er bundet til hvert cellulosemolekyle fra, og danner eddikesyre. En reaktion, der producerer varme og får pH til at falde. Mekanismerne, der leder til temperaturer over 82-93 °C, er formodet at være exotermiske oxidationsreaktioner af cellulose ved lave pH-værdier. I tillæg er der indikationer på, at træ der eksponeres for temperaturer mellem 93-149 °C gennemgår en langsom pyrolyse. Efter et stykke tid kan varmen fra pyrolysen ikke spredes til omgivelserne og temperaturen vil stige til punktet for selvantændelse.

Ref. 45: Det er blevet vist, at oxidative processer er hurtigere i træ med højere mængder ligning, og at tilstedeværelsen af metaller øger oxidationsraten.

Ref. 26: Jo større partikelstørrelse i stakken, jo bedre ventileres den, og jo bedre ledes den dannede varme væk. Det vil sige, at man ved en større partikelstørrelse kan lagre i højere stakke uden at øge risikoen for brand.

## Konklusion

Skovflis af grov kvalitet med vandindhold under ca. 40 % selvantænder ikke (egen erfaring).



Jo større indholdet af nåle/blade, kviste og bark er, jo større er risikoen for selvantændelse.

Jo større oplaget er, og jo længere lagringstiden er, jo større er risikoen for selvantændelse.

Hvert materiale/fraktion har sine egne egenskaber mht. selvantændelse, hvilket fører til anbefalinger om maksimal stakhøjde.

Der findes ikke en veldokumenteret forklaring på hele opvarmningsforløbet fra den biologisk aktivitet aftager på grund af varme til selvantændelse.

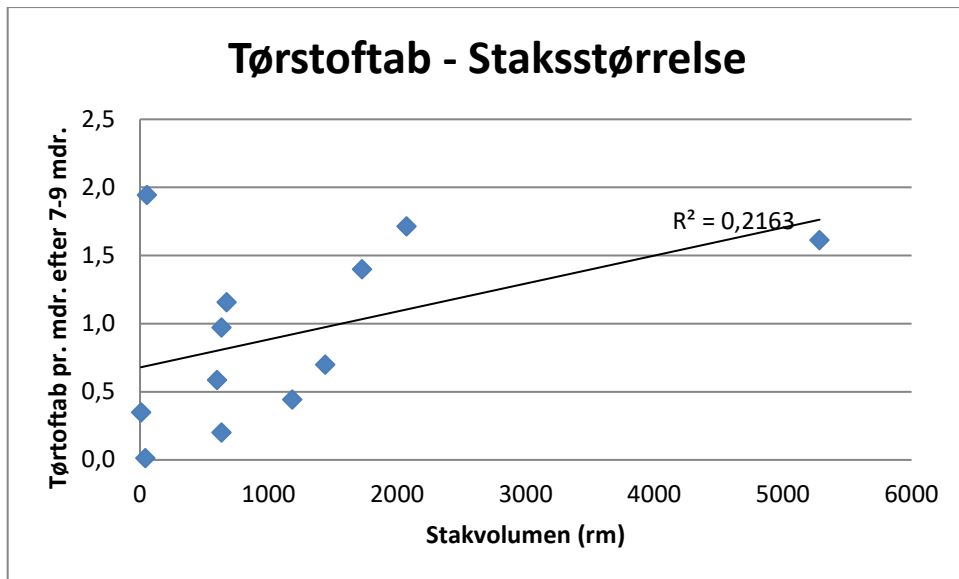


Håndtering af flis med gummiged kan medføre gnister, som evt. kan udgøre en brandrisiko. (Foto: Simon Skov)

## **Tørstoftab**

*Vær opmærksom på forskellen mellem stoftab og tørstoftab. Stofftab er summen af tørstoftab og vandtab, imens tørstoftab ikke medregner vand. Flere kilder præciserer ikke hvilket tab, der er målt. Meget ofte er der ikke målt et samlet tørstoftab, men kun en udvikling af brændværdi pr kg.*

*Litteraturen bærer tydelig præg af, at det er vanskeligt at arbejde med høj præcision i meget store stakke. Det er ligeledes svært at eliminere påvirkningen af vejret i forsøgsperioden, ligesom der er en naturlig variation i flisens kvalitet. Alle dele er kilder til fejl og usikkerhed på resultaterne.*



Figur 7. På baggrund af data ekstraheret fra litteraturen viser figuren sammenhængen mellem tørstoftab og størrelsen af forsøgsstakke. Der ses en stigende men usikker tendenslinje ( $R^2=0,278$ ).

Måneder	1-3	4-6	7-9	9-12
Tørstoftab pr mdr.	1,35	1,11	1,14	1,51
Total tørstoftab	2,28	5,56	8,25	17,38
Antal undersøgelser	10	26	22	6

Figur 8. På baggrund af data ekstraheret fra litteraturen vises, hvordan lagringstiden hænger sammen med hhv. tørstoftabet pr. måned og det totale tørstoftab. Antallet af undersøgelser bag hvert gennemsnit er vist. Der indgår en variation af fliskvalitet og behandlinger bag datasættet.

Ref. 11: Efter 6-12 måneders lagring af træbiomasse med 40-55 % vandindhold ses et tørstoftab på 0,7-1,5 % pr måned. Svindet varierer afhængigt af biomassen, vejret, vandindholdet og lagringstypen.

Ref. 4: Svampenes aktivitet i poppeflisstakke medfører et tørstoftab på 10-40 % pr år. Der findes dog ikke statistisk sammenhæng mellem biologisk aktivitet og tørstoftab. Det bemærkes, at tørstoftab er mindre vigtigt end tørring ift. Stakkens nedre energiindhold.

Ref. 24: Tørstoftab kan være signifikante og påvirke stakkens energiindhold. Et lavere vandindhold kan i nogle tilfælde kompensere for tørstoftabet, idet nedre brændværdi stiger, når vandindholdet falder.

Ref. 30: Tørt træ har i sig selv en øvre brændværdi på 18-19,5 MJ/kg. Målt gennemsnit på 18,8 MJ/kg. Regner man med et gennemsnitligt tørstoftab på 1 % pr. måned, hvilket er lavt sat, så skal vandindholdet falde med 7,8 % pr måned, for at opretholde en uændret samlet energimængde (nedre brændværdi.)

Ref. 3: Partikelstørrelsen af det neddelte træ har indflydelse på resultatet af lagringen. Sammenligninger af chunk og flis viser, at lagring af førstnævnte materiale resulterer i lavere tørstofstab og et lavere vandindhold.

Ref. 40: Produktionen af flis i skoven er i de fleste tilfælde billigere end produktion af ikke-sønderdelt træ. Rundtræ har dog nogle lagringsfordele i forhold til flis. Det udvikler ikke varme og der sker ikke tørstofstab. Desuden tørrer rundtræ naturligt i stak fra april til november.

Ref. 8: Månedlige svind af tørstof: Flis med 55 % vand under tag: 2,5 %, uden tag: 2,6-2,9 %. Flis med 35 % vand uden tag: 1,9 %. Dvs. flis med 55 % vand svinder 0,7-1 procentpoint mere end flis med 35 % vand.

Ref. 36: Flere lagringsundersøgelser udført igennem projekt "Skogsenergi" viser, at tørstofstab varierer mellem 15-18 % efter seks måneders lagring. Stofstab påvirker ikke lagerets volumen, kun massen.

Ref. 30: Tørstoftabet medfører en formindskelse af flisens rumvægt. Størst tørstofstab i vådere dele af flisstakkene.

Ref. 11: Tidligere studier viser tørstofstab ved udendørs lagring i 6-12 måneder af forskellige typer af træbiomasse bl.a. træflis, bundtet hugstaffald og løst hugstaffald. I disse studier er det gennemsnitlige tørstofstab fra 0,7 % til 1,5 % pr måned for biomasse med et initialt vandindhold på 40-55 %.

Lagring af biomasse med højt vandindhold (over 40 %) giver gasemission og tørstofstab som følge af nedbrydning, både kemisk og biologisk. Forsøget viste at variationen af CO<sub>2</sub>-emission ved forskellige temperaturer var forskellig for de to typer materiale: ren flis og en blanding af flis og nåle.

Ref. 30: Det samlede tørstofstab ved længere tids lagring er i størrelsesordenen 0,5-1,0 % pr. måned for vedflis (Nylinder og Thörnqvist 1980). For grønflis er tabet 4-6 % pr måned (Bergman og Nilsson 1979). Sammensætningen af let-nedbrydelige stoffer varierer i de forskellige dele af træet. Derfor nedbrydes bark og nåle for eksempel hurtigere end ved.

Ref. 31: Tørstofstab og stigning i mængden af svampesporer i lagringsperioden var begrænset. Generet var tørstoftabet betydeligt mindre end 1 % pr. måned. I ét delforsøg var stoftabet dog 2,8 % pr. måned. Her var vandindholdet højest, nemlig 40 %.

Det kritiske niveau for vandindhold er mellem 30 og 40 %. Over dette niveau ses større tørstofstab og under dette niveau ses et mindre tørstofstab. Træarten spiller formodentlig også ind.

Der blev ikke fundet nogen entydig sammenhæng imellem tørstofstab og lagringstidens længde. Der var dog en vis indikation af, at den største nedbrydning sker i de første lagringsmåneder. Der blev ikke fundet nogen korrelation fundet tørstofstab og flislagerets størrelse, ventilation og fraktionstørrelse.

Ref. 28: Tørstoftab var meget større for flis end for chunk, hhv. 2,9 % pr måned og 0,7 % pr måned efter 11 mdr. Tørstoftabet i chunk var på samme niveau uanset håndteringen: dækkede/udækkede, forskellige størrelser og lagringstid.

Ref. 32: Flis og chunk af 90 % birk. Tørstoftab afhænger blandt andet af lagringsperioden, typen af brændsel og vandindhold. Mikroorganismer, som nedbryder træmateriale, trives hvis materialets vandindhold er over 25 %. Undersøgelsen giver følgende konklusioner:

- Tørstoftabet ved lagring i de ventilerede siloer var minimalt, da begge materiale typer hurtigt tørrede til under 20 % vand.
- Det største tørstoftab (ca. 5 %) blev fundet i stakken med flis. Gennemsnitligt var tørstoftabet 2 procentpoint lavere for chunk end for flis i stakke og netkasser.
- Der blev observeret en sammenhæng mellem tørstoftab og vandindhold i netkasserne, da de største tørstoftab fandt sted i de vådeste lag for både flis og chunk.

Ref. 36: Forsøg viser, at der sker tørstoftab på 2,5-3 % pr måned ved lagring af grot i 3-6 m høje stakke i 6-9 måneder (uspecificeret træart). Nedbrydningen er betydeligt større pr måned i de første 3-4 måneder.

Ved at lave et luftigt tag over en stak kan gennemsnitsvandindholdet sænkes til ca. 20 % efter 7 måneders lagring. Stoftabet var her 2,6 % pr. måned, imod 2,9 % pr. måned for en ikke-overdækket referencestak.

Ved aktiv gennemblæsning af mindre stakke flis med ikke-opvarmet luft i sommerperioden, kan vandindholdet sænkes til under 20 %. Ved lagring i 9 måneder var der kun marginale stoftab. Ventilatorernes energiforbrug balancerer mod stoftab og tørring, og energibalancen på nedre brændværdi går i nul.

Ref. 36: De fleste undersøgelser af lagring af sønderdelt skovbrændsel indtil 1985 er udført på mindre stakke (omkring 55 m<sup>3</sup>, 3 m høje), og kan ikke ukritisk overføres til store lagre.

Ref. 37: Ti lagringstudier viste bl.a. at friskfældet findelt hugstaffald lagret 6-7 måneder i stak resulterer i 2,5-3 % tørstoftab pr. måned. Hvis hugstaffaldet tørres til et vandindhold på 25 % før findeling, falder stoftabet til 0,8 % pr. måned. Tørres det til et vandindhold på 15-20 % nedsættes tørstoftabet til 0,25 % pr. måned.

Ref. 38: Sektionernes gennemsnitlige stoftab pr. måned var højest efter fire måneders lagring (5,5 %). Studiet viste, at stoftab er afhængig af materialets vandindhold ved oplægning af stakken.

Ref. 33: Det højeste gennemsnitlige tørstoftab blev fundet i komprimeret flis af hugstaffald lagret udendørs. Det største tørstoftab for et enkelt målepunkt var i det område, som havde haft de højeste temperaturer i lagringsperioden. Den højeste måling af tørstoftab var på 30 % for komprimeret flis af hugstaffald lagret

indendørs i 7 måneder. Der blev observeret større tab i forsøgsled med komprimeret flis end i ikke-komprimeret flis.

Ref. 24: Det initiale vandindhold i flis har stor betydning for tørstoftabet. Svensk forsøg: Start vandindholdet var proportionalt med tørstoftabet. Start vandindhold på 42 %, 51 % og 58 % gav månedlige tørstoftab på 1,1; 2,2 og 2,6 %, og de totale tab over 6 måneders lagring var 6,6; 13,2 og 15,6 %.

Lagring i 9 måneder. Start vandindhold på hhv. 32 % og under 20 %. Månedlige tørstoftab på hhv. 1,03 og 0,23-0,35 %.

Tørstoftab er størst i begyndelsen af lagringsperioden, kort efter den hurtige temperaturstigning. Tab er blevet estimeret til 3,6 % pr. uge efter anden uge og derefter 0,4-0,7 % pr. uge.

Ref. 26: Den gennemsnitlige værdi for tørstoftab ved hver måleanledning viser, at tabet er størst i den allerførste del af lagringen.

Allerede efter en uge var tørstoftabet 3,6 %. Efterfølgende var der et kontinuerligt faldt i tørstoftab, som gav et gennemsnit på 0,4 % per uge efter 12 uger. Efter 16 uger var tabet steget til 0,7 % per uge. Stigningen fortsatte indtil et nyt fald tog over, og efter uge 28 var tabet igen 0,4 % per uge. Skiftene kan muligvis skyldes skiftende vandindhold i stakkens sektioner.

Ref. 41: For at få en forståelse af, hvilke komponenter i flisen, der forårsager de højeste tørstoftab, blev stikprøver sønderdelt i komponenterne ved, nåle, bark, kviste under 3 mm samt finfraktion. Dette blev udført på friskt og lagret flis. Den største nedbrydning fandt sted i nåle. Både i våde og tørre områder af flisstakkene. Nedbrydningen af små grene så ud til at være større i våde dele af stakken end i tørre dele.

Ref. 41: Tørstoftab afhænger af lagringstid, stakstørrelse, materialekomposition, temperatur og materialets vandindhold. De største materielle tab sker i de ydre, våde lag. Her blev registreret tab på op til 24 % i lagringsperioden på 7 mdr. I de centrale, tørrere og varmere dele af stakken var tørstoftabet mindre. Der blev målt et gennemsnitligt svind på 19 % efter 7 måneder.

## Konklusion

Der er sammenhæng mellem tørstoftab, varmeudvikling, flisens vandindhold og fordelingen af hhv. ved, nåle, kviste og bark i flisen.

Et vandindhold under 20 % hæmmer omsætningen meget. Et vandindhold under 35-40 % giver begrænset tab, mens vandindhold over 40 % medfører væsentligt større tab og vandindhold over 50 % endnu større tab.

Tørstoftabet er størst i de første uger af lagringen.

Indeholder flisen nåle, kviste og bark, så øges tørstoftabet.

Mange finder et tørstof-tab på 1-3 % pr måned for skovflis med vandindhold omkring 40 %. Tørstof-tabet er langt størst i begyndelsen af lagringsperioden.

Der findes ikke sammenhæng mellem tørstof-tabet og flisens volumen, men på grund af tørstof-tab falder flispartiklernes rumvægt under lagring. Flisstakkens volumen falder også under lagring, men det skyldes øget pakning/komprimering.

De fleste undersøgelser finder, at grovere flis svinder mindre end finere flis, men der er også resultater, der viser det modsatte.

Det kræver en meget kraftig tørring at kompensere for tørstof-tabet. Tørringen har kun kompenserende effekt ved udnyttelse af den nedre brændværdi.

Flis i stak svinder mere end det ikke-huggede træ-biomasse.



Knuste rødder i meget grov kvalitet. Af hensyn til lagerstabiliteten knuses rødderne først til en meget grov partikelstørrelse og først lige inden brug fin-knuses de. (Foto: Simon Skov)

## Vand

*Vandindholdet i flis er et vigtigt emne, især hvis flisen skal anvendes på et anlæg uden røggaskondensering. Hvis flisen brændes på anlæg med røggaskondensering, så er energiproduktionen stort set uafhængig af flisens vandindhold, når bare der kan opretholdes en tilstrækkelig varm forbrænding. Det vil sige, at på nogle værker er vandindholdet meget vigtigt, mens det er underordnet på andre værker.*

*Vand i flis kommer dels fra vandindholdet i den oprindelige biomasse, dels af vand, der tilføres fra nedbør og fra nedbrydning, hvor vand er et af slutprodukterne.*

Vandindholdet i flisen kan mindskes enten ved for-tørring af biomassen inden flisning, eller ved fordampning ud af stakken.

Det er naturligvis vanskeligt at lave forsøg med flisens vandindhold på grund af den varierende nedbør. Emnet er derfor præget af modstridende resultater fra feltforsøg, der varierer i materiale, stakhøjde, lagringstid, nedbør osv.

Måneder	1-3	4-6	7-9	9-12	Over 12
Start vandindhold (%)	33,99	45,11	44,88	48,26	57,27
Slut vandindhold (%)	29,22	41,42	32,14	47,68	53,73
Difference	-4,77	-3,69	-12,75	-0,57	-3,53

Figur 9. På baggrund af data ekstraheret fra litteraturen vises, hvordan lagringstiden hænger sammen med tørringen. Der ses tendens til, at stakke tørrer ved lagring op til 9 måneder, og derefter genopfugtes. I datasættet er der variation i fliskvalitet og behandling

Ref. 7: Vandindhold er typisk den vigtigste faktor for flisens kvalitet som brændsel.

Ref. 40: Flis fra frisk træ har vandindhold 55-60 % for nåltræ og 45-50 % for løvtræ. Skovbruget nedbringer vandindholdet ved naturlig tørring af træ i skoven. Herved nedbringes vandindholdet med omkring 10 procentpoint.

Fordele:

- De umiddelbare fordele ved tørring i skoven er, at der transporteres mindre vand, hvilket mindsker transportudgiften, og at omkostningerne er små i forhold til gevinsten.
- Vandindhold over 55 % er kritisk for forbrændingen i mange kedler (1995).
- Flis fra friske træer er mindre lagerstabil end flis fra for-tørrede træer.
- Ved for-tørring af gran løsner nålene sig og falder af under flishugningen. Dette er godt for opretholdelse af skovens frugtbarhed.

Ulemper:

- Skadelige insekter kan angribe træet.
- Udgifter til fældning og indtægter fra flissalg falder ikke samtidigt.
- Der er maskinkørsel i skoven både ved fældning og ved flisning.

Ref. 3: 7 Forsøg med flisstak med 45 % vand. Efter nogle måneder dannes en tør midte og en våd kappe. Efter 6 måneder måles 65-70 % i kappen og 20-25 % i kernen. Stakkens gennemsnit er som oprindeligt. Lagres flisstakken længe, stiger den samlede vandprocent blandt andet pga. nedbør og nedbrydning, som frigiver vand.

Ref. 38: Stakkens overflade bliver overmættet med vand og stakkens indre tørrer. I dette forsøg er det gennemsnitlige vandindhold for de fugtige områder 65 % og for de tørre 25 %. Nedbør gør overfladen vådere og koldere, og er med til at opretholde en fugtig skorpe.

Ref. 16: Vandindholdet faldt betydeligt mere i stakke af grov flis, end i stakke med fin flis på grund af bedre ventilation i stakken.

Ref. 1: Vandindhold falder over tid i ikke-fliset hugstaffald, men stiger typisk i flis.

Ref. 4: Tørringen afhænger ikke kun af stakkens temperatur, men også af vandindholdet ved begyndelsen og partikelstørrelsen. Tørringen er som regel færdig efter 100-150 dage.

Det gennemsnitlige vandindhold efter et års lagring er mellem 20 % (grov flis) og 50 % (fin flis). Målt på totalvægtsbasis.

Ref. 30: Friskhugget grønflis indeholder 45-60 % vand. Derfor er tørring sædvanligvis gavnlige. Hvis man ser på stakken som helhed, er der dog ingen sikkerhed for, at der finder en betydelig tørring sted ved simpel udendørs lagring uden overdækning eller luftig bund. Der sker nærmere en omfordeling af vand i stakken grundet temperaturstigningen.

Mekanismen: Opvarmning -> vand fordamper fra stakkens indre -> vanddampen kondenserer i de ydre koldere lag. Derved opstår et meget fugtigt lag, som i toppen kan være flere meter tyk i et stort flislager, og let kan overstige et vandindhold på 60 %. Tykkelsen aftager ned langs siderne.

Vand er et væsentligt nedbrydningsprodukt. Cirka halvdelen af vægten af nedbrudt træ-tørstof er stadig til stede i stakken i form af vand.

Desuden kommer en betydelig mængde vand fra nedbør. Dette vands betydning er omvendt proportional med stakkens tværsnitsareal. Dette er alvorligt ved lave flisstakke.

Ref. 2: Forsøg med 4 meter høje stakke. Analyserede prøver taget mellem 1,0 m og 2,0 m viste et fald i vandindhold efter 15 måneders lagring. Det største fald i vandindhold efter de 15 måneder skete i stakkens nederste del (1,0 m: 13,9 % fald, 2,0 m: 5,5 % fald, 3,0 m: 8,8 % stigning i vandindhold). Faldet i vandindhold blev mindre set over hele lagringsperioden, ved at gøre stakken højere og smallere. På det højeste prøvetagningssted blev der målt en stigning i vandindhold. I de øverste dele af stakken kondenseres dampen fra de nedre dele og det kolde/våde flis optager nedbør.

Typisk for træflis af nåletræ: jo højere oppe i stakken, jo mindre fald i vandindhold over lagringsperioden. Fald i vandindhold er mere signifikante for store flisstakke af nåletræ, sammenlignet med flis af birk i stakke på 3 m lagret i et år (ref. 1).

Ref. 26: Flisens vandindhold har betydning for temperaturudviklingen i stakken. Temperaturen påvirker direkte den mikrobielle aktivitet, og derfor beror svampeaktiviteten og stoftabet direkte på brændslets vandindhold på det tidspunkt, hvor stakken etableres.

Forsøget finder mindre tørringseffekt ved lavere vandindhold ved lagringsstart og bedre tørringseffekt ved højt vandindhold ved lagringsstart. Desuden ses bedre tørring ved længere lagringsperiode.

Der ses en marginal tørring efter en uge, men en gennemsnitlig tørring på 7-8 %



efter 3-5 uger, ved et initialt vandindhold på omkring 40 %. Der findes tendenser til, at 3-5 måneder er den optimale tørringsperiode.

Ref. 35: Under lagring faldt vandindholdet med 7 procentpoint for stakken med friskt, groft sønderdelt materiale. I stakken med materiale, der havde ligget to vegetationsperioder faldt det gennemsnitlige vandindhold med ca. 5 procentpoint. I de resterende fire stakke (1,2,4,5) skete der ingen betydelige ændringer i vandindhold.

Ref. 38: Forsøg med et initialt vandindhold på 32-39 %. Det gennemsnitlige vandindhold steg gennem lagringen og varierede på kontroltidspunkterne mellem 36 og 50 %. Udført med stakhøjde på 2,2-3 m. Det konkluderes, at flisstakkens gennemsnitlige vandindhold stiger med stigende lagringstid.

Ref. 31: Forsøg med små stakke lagret fra 1 til 6 mdr. Forsøget finder ikke nogen entydig sammenhæng mellem placering i flislageret og vandindhold. Omfordeling af vand kan kun påvises i enkeltstående punkter. Der kunne heller ikke påvises noget kondensationslag.

Ref. 15: Forsøg med lufttæt lagring af flis viser, at denne form for lagring mindsker omfordelingen af vand i flisstakken. Der dannes ikke tør kerne/ våd overflade. Varierende vandindhold kan være generende for energiværker, da det kan medføre behov for løbende justering af forbrændingen. Referencestakken uden presenning viste tydelig omfordeling. En lufttæt stak med flis fra sommertørret heltræ viste en let omfordeling. De to lufttætte stakke med grøn heltræsflis og frisk stammefflis viste slet ingen omfordeling.

## Konklusion

I langt de fleste stakke, men ikke alle, dannes der en markant tør midte/kerne og en meget våd side/skorpe og top. Typisk er det gennemsnitlige vandindhold ikke markant anderledes end udgangspunktet, men vandet er omfordelt.

Hvis materialet er tilpas vådt til at den biologiske aktivitet varmer stakken op, så er der mulighed for at fordampe en del vand ud af stakken. Hvis stakken samtidig holdes fri for nedbør, typisk ved at ligge under tag, så vil det samlede vandindhold falde over en 3-5 måneders lagringsperiode.

Små, lave stakke vil være mere påvirket af nedbøren end store, høje stakke.

Der er tendenser til, at stakke, der overdækkes med presenning ikke tørrer og ikke omfordeler vandet i samme grad som utildækkede stakke.

Der sker i højere grad tørring fra stakke med grov flis end fin flis.



Der ses en våd, mørk skorpe og en tør, lysere kerne i denne stak af skovflis. (Foto: Simon Skov)

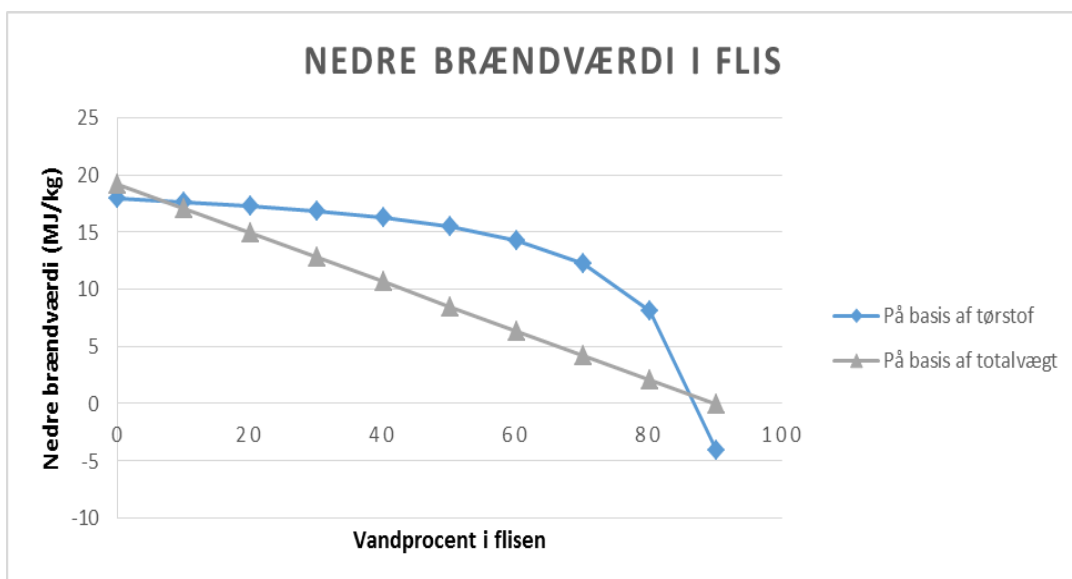
## Brændværdi

*Energiindholdet pr. kg beskrives med to tal. Den øvre brændværdi, som er materialets totale kemiske energi indregnet kondenseringen af dannet damp under forbrændingen. Den nedre brændværdi er en værdi, som beskriver brændslets energi med et aktuelt vandindhold. Det vil sige brændslets energi fratrukket fordampningsvarmen for det vand, som brændslet indeholder og danner ved forbrænding. Nedre brændværdi kaldes også effektiv brændværdi, hvilket er et retvisende ord ved forbrænding på anlæg uden røggaskondensering, men misvisende, hvis fordampningsvarmen indvindes ved kondensering.*

*Der er forskellige traditioner mht. beregningen af nedre brændværdi. Nogle beregner på basis af totalvægten, mens andre beregner på tørstofbasis. Typisk er beregningsgrundlaget ikke nævnt i afrapporteringerne.*

*Mange forsøg behandler energiindhold og -tab ved at se på flisens vandindhold og nedre brændværdi i højere grad end tørstof-tabet. Det er vigtigt at være opmærksom på forskellen mellem ændringer i nedre brændværdi og tørstof-tab. Mange kilder gør det ikke tydeligt, hvilken form for energitab, der er tale om. Et tørstof-tab påvirker ikke nødvendigvis hverken øvre eller nedre brændværdi.*

*Her bruges ordene: energiindhold, som stakkens samlede energiindhold (øvre eller nedre), og brændværdi (øvre eller nedre), når det drejer sig om energi pr. vægtenhed.*



Figur 10. Kurver over nedre brændværdi beregnet hhv. på basis af totalvægten og tørstofvægten. Begge formler anvendes i litteratur.

Formlen for nedre brændværdi på basis af totalvægten:

$$H_{nv} = H_n(100 - F)/100 - (2,442 \times F)/100 \text{ (MJ/kg)} \text{ (ref. 55)}$$

Formlen for nedre brændværdi på tørstofbasis:

$$H_{nv} = H_{\emptyset} - (2,441 \times 8,94/100 \times 6) - (2,441 \times (F/100 - F)) \text{ (MJ/kg TS)} \text{ (ref. 32)}$$

$H_{nv}$  = nedre brændværdi af vådt brændsel

$H_n$  = nedre brændværdi af tørt brændsel

$H_{\emptyset}$  = øvre brændværdi

$F$  = vandprocent i brændslet

Vands fordampningsvarme ved 25 °C = 2,441 GJ/t

Vand dannet ved afbrænding af hydrogenholdig biomasse = 8,94%

Typisk andel af hydrogen i skovflis = 6%

	Måneder	1-3	4-6	7-9	9-12
Øvre brændværdi	Før	19,27	20,40	20,46	19,60
	Efter	19,32	20,50	20,38	19,43
Nedre brændværdi	Før	16,78	17,66	17,42	
	Efter	16,90	17,64	18,00	

Figur 11. På baggrund af data ekstraheret fra litteraturen vises, hvordan lagringstiden hænger sammen med ændringer i hhv. øvre og nedre brændværdi. Enheden er MJ/kg TS. Uanset lagringstiden ses en meget lille ændring af brændværdierne.

Ref. 18: Hver fraktion af et træ har sin egen øvre brændværdi. Den specifikke værdi afhænger af træarten og voksestedet. Faldende øvre brændværdi: nåle>grene>bark>ved

Ref. 17: Den øvre brændværdi afhænger af indholdsstoffernes kemiske energiindhold. Lignin har et højere energiindhold end cellulose og hemicellulose. Da lignin er mere modstandsdygtig overfor biologisk nedbrydning, så er det sandsynligt, at materialets ligninprocent stiger under nedbrydning. Den øvre brændværdi kunne af den grund godt stige som følge af nedbrydningen af mere energi-lette stoffer.

Ref. 1: Ændringen i flisens øvre brændværdi er minimal uanset lagringstype. Øvre brændværdi før lagring 19,60 MJ/kg. Øvre brændværdi efter lagring utildækket i over et år: 19,28 MJ/kg.

Ref. 33: Den øvre brændværdi i flis af hugstaffald var før lagring 20,8 MJ/kg tørstof. Efter lagring var den steget for alle forsøgsled/sektioner. Mest i de komprimerede sektioner, hvor værdier på 21,2-21,3 MJ/kg tørstof blev målt.

Ref. 26: Alle tolv lagringsforsøg med fliset hugstaffald af ca. 70 % gran gav samme resultat mht. øvre brændværdi. Startværdien var 20,7 MJ/kg og slutværdien efter op til 12 ugers lagring var også 20,7 MJ/kg.

Ref. 46: Forskellige positioner i flisstakken (bund, midte og top) havde ikke indflydelse på biomassens øvre brændværdi.

Ref. 17: Under lagring af biobrændsler sker der et stoftab. Stofftab kan komme fra 1) tab af vand, 2) tab af flygtige kemikalier (volatile chemicals) og 3) tab af tørstof. Alle tre dele påvirker nedre brændværdi.

Ref. 35: Alle stakke viste et tab i energiindhold (nedre) under lagring. Tabet var mindst for det ikke flis-huggede materiale i stak (2,7 %) og størst for grov flis under presenning (21,4 %).

Ref. 37: Hugstaffald, som bliver lagret i stakke på hugststedet i 6 måneder før findeling og afbrænding, stiger omkring 2 % i nedre brændværdi pga. tørring. Nedre brændværdi falder med 18 %, hvis hugstaffaldet først flises og derefter lagres i 6 måneder, før det brændes.

Ref. 2: Lagringsforsøg med nåletræsflis i 4 meter høj stak. Start nedre brændværdi på 6,6 MJ/kg. Efter 15 måneder var nedre brændværdi i 1 meters højde 9,4 MJ/kg, 2 meters højde 7,9 MJ/kg og 3 meters højde 4,9 MJ/kg. Der er altså sket en forøgelse af nedre brændværdi nederst og midt i stakken, mens den reduceres øverst i stakken.

Ref. 26: Tabet af energiindhold (nedre) var høj i den initiale fase af lagringen. Tørstoffabet i den første uge var relativt stort og udtørringen var samtidig moderat. Fra næsten 3 % energitab i første uge af lagringen faldt tabet kontinuert

til uge 10, hvor det ugentlige tab var under 0,5 %. Energitalbet forblev på dette niveau til eksperimentet sluttede efter 28 uger. Energitalb på 12 % pr. måned i den første uge, og 1,0-1,3 % pr. måned efter tre måneder.

### Konklusion

Biomassens øvre brændværdi ændres kun ubetydeligt, og teoretisk set kan der forventes en svag stigning i øvre brændværdi efter lagring, idet ligninandelen typisk stiger.

På grund af omfordeling af vand under lagring, så stiger nedre brændværdi nederst og midt i stakke, mens den falder øverst og yderst i stakke.

### Askeindhold

*Flisens samlede askeindhold bestemmes bl.a. af fordelingen mellem ved, bark, kviste og nåle. Hvert element har sin egen askeprocent.*

*Askeprocenten påvirkes også af, om brændslet er høstet i kystnære områder, hvor påvirkningen af sand og salt er større.*

*Når der findes ændringer i askeindholdet, så skyldes det dels ændringer i flisens komposition, dels at flisen ofte forurenes med sand, grus og sten under håndtering og lagring.*

Ref. 18: Opdeler askeindholdet i to komponenter: Naturligt askeindhold og forurenings askeindhold.

Ref. 18: Askeprocent beregnet på tørstof. Gran. Ved: 0,6 %, grene: 1,9 %, bark: 3,2 %, nåle: 5,1 %. Heltræsflis af gran: med nåle: 1,6 %, heltræsflis af gran uden nåle: 1,3 %.

Ref. 6: Når flisens organiske forbindelser nedbrydes, så vil koncentrationen af de uorganiske indholdsstoffer øges.

Ref. 35: Hugstaffaldets øvre brændværdi beregnes ofte på "askefri" basis, dvs. askevægten fratrækkes biomassen. Ændringer i askeindhold kan derfor påvirke energiberegningerne. I undersøgelsen findes et askeindhold før forsøget på 1,0-3,0 % og efter forsøgsperioden på 3,8-7,6 %. Stigningen skyldes primært forurening ved oplægning af stakken.

Ref. 26: Forsøget viste en gennemsnitlig stigning i askeindhold på 8 % over hele lagringsperioden. Størrelsesordenen svarer til tørstoftabet. For alle sektioner var det gennemsnitlige askeindhold 2,6 % efter lagring.

### Konklusion

Nedbrydningen af flisen under lagring vil medføre, at den resterende flis har et højere askeindhold, idet asken fra den nedbrudte flis indeholdes i det tilbageværende.

Da askeprocenten i flis er forholdsvis lav, så er effekten af nedbrydningen på askeprocenten minimal.

I praksis vil hver håndtering/omladning/opstakning medføre, at der tilføres fremmede elementer fra omgivelserne til flisen. Det er hovedsageligt materiale fra underlaget fx grus. Også luftbærent materiale som sand kan øge askeindholdet.

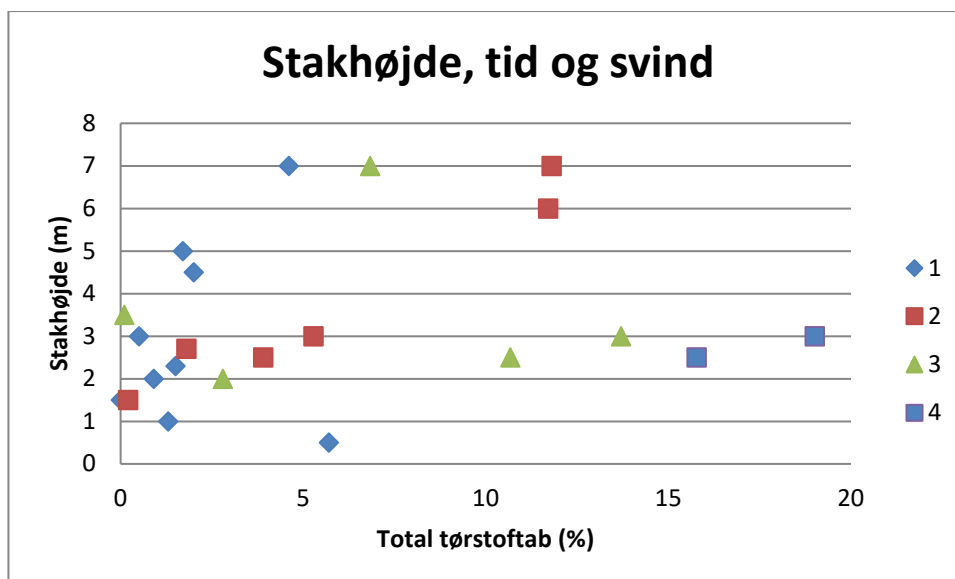
Generelt er der stor variation i træers/trædeles askeindhold. Art, alder, voksested osv. har indflydelse.



Opbevaring af flis på løst underlag kan meget nemt føre til en samlet forøgelse af askeindholdet gå grund af forurening med grus. (Foto: Simon Skov)

## Lagring

*Lagringsmodellen er håndteringen mellem flisen produceres og forbrændingen. Tiden er naturligvis en vigtig faktor, men også stakkens størrelse, overdækning, flisens vandindhold mv. er afgørende for udviklingen af stakken.*



Figur 12. På baggrund af data ekstraheret fra litteraturen vises, hvordan stakhøjden, lagringstiden hænger sammen med tørstofabet. Kategori 1: 1-3 mdr. 2: 4-6 mdr. 3: 7-9 mdr. 4: 10-12 mdr. For kategori 2 ses en tendens til øget svind ved øget stakhøjde. Der ses ingen tendenser ved de andre lagringstider. Datasættet dækker over varierende fliskvaliteter og behandlinger.

Ref. 36: Estimering af udvikling af varme i en stor stak ud fra resultater fra små stakke stemte ikke overens med resultater fra et reelt storskalaforsøg. Der er tydelige kanteffekter ved lagring i små stakke.

Ref. 18: Håndtering og lagring af flis i stor skala:

- Underlaget bør være asfalt og må ikke bestå af sten og grus.
- Stakke skal være aflange med en bredde dobbelt så stor som højden, så nedbør kan løbe af siderne.
- Jo flere ujævnheder i overfladen, des mere fugt vil stakken tage til sig.
- Ved lastning skal et eventuelt snedække skrubes væk, så det ikke kommer med i transporten.

Ref. 8: Praktiske råd om lagring af træbrændsel:

- Byg langstrakte stakke med en basebredde, som er det dobbelte af stakkens højde.
- Anbefalede stakhøjder: Træflis fra kernetræ: 15 m. Grot: 7 m.

Ref. 18: Anbefalinger om stakhøjder af ikke-komprimeret flis. Afbarket stamme flis 15 m, heltræsflis af løvtræ 12 m, heltræsflis af nåltræ 10 m, grot 7 m, bark 7 m.

Ref. 29: Understreger, at stakke bør være så store som muligt for at mindske indflydelsen af nedbør på stakken. Store stakke har mindre overflade pr. volumen. Stakke på 10 meters højde anbefales.

Ref. 42: Forsøg med lufttæt lagring af en stak aspeflis (indpakket i polyethylen-film) gav gode resultater. Temperaturen i stakken lå 2-3 °C over omgivelsernes og tørstofabet var kun 2,3 % i hele lagringsperioden på 185 dage. Et tilsvarende

forsøg med en skummembran af polyuretan gav et tab på 13 % på 7 måneder fordi membranen ikke var helt tæt. Resultaterne svarer her til referenceresultater fra en utildækket stak. Sidstnævnte tørstof-tab og temperaturstigning blev skabt af nedbrydning i en atmosfære, hvor ilt-niveauet var lavt (2-5 % ilt for 100 af de 185 dage) og CO<sub>2</sub>-niveauet var højt (18-20 % i samme periode). Dette viser, at ilt skal ekskluderes totalt ved lange lagringsperioder. Lageret skal være helt anaerobt for at hindre omsætningen.

Ref. 19: Det er almindelig praksis for at undgå selvopvarmning og -antænding, at flisen ikke lagres fugtig og i for store stakke.

Ref. 26: Jo grovere flisen er, des højere kan den stakkes uden risiko for selvantændelse. Stakke med grov flis ventileres bedre, hvorved varmen ledes ud af stakken.

Ref. 39: Overordnet set kan det konkluderes, at for at minimere tørstof-tab bør materiale håndteres efter princippet: Sidst ind – først ud. Køb brændsel der har været lagret et stykke tid, når det er muligt. Så er de let-nedbrydelige komponenter allerede nedbrudt, og dermed er de største tab sandsynligvis allerede sket.

## Konklusion

Da omsætningen og dermed svindet er størst i begyndelsen af lagringsperioden anbefales lagerstyring efter først ind – først ud princippet.

Det er ikke nødvendigvis muligt at overføre resultater fra små (forsøgs-)stakke til store stakke.

Nedbrydningen under anaerobe forhold går langsommere end under aerobe forhold, men selv meget lave koncentrationer af ilt giver mulighed for aerob omsætning.

Det er almindelig praksis at flis, der skal lagres skal være relativt tørt.

Grov flis er bedre egnet til lagring end fin flis.

## Tørring

*Flere har lavet forsøg med aktiv tørring af flis, for der igennem at øge lagerstabiliteten. Emnet er især interessant, hvis flisen skal brændes på anlæg uden røggaskondensering. Idet vandet på disse anlæg vil være en energimæssig udgift.*

Ref. 3: Tørring og eller nedkøling af flisstakke gennem ventilation er et muligt system, der kan forbedre brændselskvaliteten. Men to ting skal overvejes:

1. Materialet skal kontinuerligt gennemkøles til under 15 °C, for at minimere mikrobiel aktivitet.
2. Systemets følsomhed over for prisen på brændslet.

Ref. 31: Nogle af de undersøgte håndteringssystemer/substudier brugte kunstig tørring, men med lille tørringseffekt.



Ref. 37: At blæse udendørs luft ind i indendørs flislagre, er en praktisk og økonomisk måde at tørre flis og gøre den bedre til lang lagring. Dette er især et potentiale for små lagre. Tørring bør ske kort efter flisning, og bør være kortere end to uger.

Ref. 18: Småskala lagring på metalnet. Forsøget undersøgte effekten af at lægge en flisstak op på et metalnet 30 cm over jordoverfladen. I stakken på metalnettet steg temperaturen til 50-60 °C inden 10 dage og faldt herefter og fulgte omgivelsernes temperatur. Kontrolstakken steg 10 grader mere end stakken på net inden 10 dage, og forblev på dette niveau gennem hele lagringsperioden.

Ref. 4: En ventilationskanal eller et spaltegulv kan forbedre tørringen af en flisstak.

### **Konklusion**

Flere har forsøgt at øge udtørringen i flisstakke. Udtørring er især ønskelig, hvis der ikke foretages røggaskondensering efter afbrænding.

Aktiv ventilation af flisstakke kræver stort energiinput, hvilket reducerer en evt. gevinst.

Kun forsøg, der understøtter stakkens naturlige ventilation fx ved at hæve stakken på net (ref. 18) eller opbevare stakken på spaltegulv (ref. 4), uden at udføre aktiv gennemblæsning viser en rimelig balance mellem energiforbruget/udgiften og flisens tørring.

### **Lagring før hugning**

*Lagring af det ikke-flisede materiale er en oplagt løsning på de problemer, der er knyttet til flislagring. Der er dog andre ulemper og hensyn ved lagring af træbiomassen.*

Ref. 7: Lagring af ikke-findelt hugstaffald i rænker i skoven kan bruges med fordel, for at undgå de problemer, som opstår ved lagring i flisstakke.

Ref. 39: Stammetræ er ofte bedre at lagre end hugstaffald på grund af et lavere nitrogenindhold.

Ref. 5: At lagre træbrændsel *før* det findeles kan hjælpe med at minimere henfald, da det reducerer det overfladeareal, som er eksponeret for mikrobiel nedbrydning. Men håndtering af ikke-findelt træ er dyrere en håndtering af flis.

Ref. 39: Findel brændslet så tæt på forbrændingstidspunktet som muligt. Gerne ved forbrændingsanlægget.



Hugstaffald ligger til tørre i skoven inden det flises. (Foto: Simon Skov)

## Konklusion

I flis-litteraturen er der bred enighed om, at det er fordelagtigt, at lagre biomasse i sin oprindelige form og flishugge så tæt på forbrugstidspunktet som muligt.

Der er ikke inddraget litteratur, der undersøger svindet af ikke-hugget træbiomasse. Desuden kan der være driftsmæssige hensyn, der kræver, at materialet fjernes fra skovbunden.

## Presenning og tag

*Effekten af hhv. presenning og tag må forventes at variere med stakstørrelsen. I øvrigt er det langt dyre at bygge tag til store stakke. Ud over tags effekt på vandindhold og tørstofstab, så kan forsyningsikkerhed være en væsentlig faktor for opførelsen af tag.*

Ref. 1: Flisstakke tildækket af en presenning af åndbart materiale viste et fald i vandindhold i hele lagringsperioden og havde en jævn fordeling i top, midte og bund af stakken. Der blev målt et mindre tørstofstab i den tildækkede stak end i en ikke-tildækkede stak.

Ref. 5: Konkluderer, at flis bør lagres i koniske stakke under tag. Flis kan også dækkes af et åndbart materiale som Gore-Tex eller Top-Tex. Disse materialer er dyre, og fordelene retfærdiggør ikke omkostningen.

Ref. 35: Under lagringen faldt alle stakke sammen. Stakken under presenning sank mest sammen (48 % af højden). Stakken med materiale, der havde for-tørret i en

vækstsæson sank mindst sammen (32 %). Komponent sammensætningen blev mål før og efter. Den største forandring skete i andelen af småpartikler, som steg med 10 %.

Ref. 35: Det største energitab (21,4 %) blev registreret i forsøgsleddet med friskt, grov flis, som var dækket af presenning. Det største tørstoftab (3,3 % pr. mdr.) blev også registreret i dette forsøgsled. Temperaturen var gennemgående over 60 °C under hele lagringsperioden. Desuden steg det gennemsnitlige vandindhold i forsøgsleddet med 1,5 procentpoint.

Ref. 52: Presenning forhindrer, at stakken genopfugtes af nedbør, hvilket giver en bedre tørring. Forsøget viser, at flis tildækket med "fleece", uvist om det er en åndbar presenning, tørrer bedre end flis, der ikke er tildækket. Tørstoftabet ser ikke ud til at afhænge af tildækningen. Tildækning af flisstakken kan dog føre til akkumulering af varme, hvilket kan øge nedbrydningen.

Ref. 28: For chunk findes samme tørstoftab uanset om stakken overdækkes eller ej.

Ref. 15: Lufttæt opbevaring af flis er gavnlig; tørstoftabet mindskes; der findes ingen omfordeling af fugt; arbejdsmiljøet ved håndtering forbedres væsentligt. Omkostningerne ved tildækning indgik dog ikke i forsøget.

Ref. 6: Mindre stakke dækket af tag, som tillader luftcirkulation, viser en gennemsnitlig reduktion i vandindhold fra ca. 55 % til 20 % fra april til november. Hvis stakkene i stedet er dækket af presenning stiger det gennemsnitlige vandindhold.

Ref. 17: Forsøget viste et månedligt tørstoftab på 2 % for flis fra sitkagran ved lagring under tag. Tabet blev større end 4 % om måneden ved lagring i det fri. Barkflisstakke har dynamikker, der ligner træflisstakke, men tørstoftabet er større.

Ref. 4: Forsøg med poppel og pileflis. Beskyttelse imod regn kan forbedre tørringen betydeligt. Specielt for fin- og middelstørrelse flis har tag stor betydning.

Ref. 36: Ved lagring under tag kan vandindholdet reduceres med 20 %. Der opnås samtidig en lille reduktion i tørstoftabet i forhold til lagring uden tag.

Ref. 41: Det så ikke ud til at påvirke temperaturen, om flisen var overdækket med et luftigt tag af presenning eller ej.

Ref. 33: For både stakke af komprimeret og ikke-komprimeret hugstaffald gælder det, at lagring under tag mindsker tørstoftabet.

## **Konklusion**

Ved at bruge en åndbar presenning kan vandindhold og tørstoftab reduceres.

Der findes ikke entydige resultater til at beskrive effekten af lagring under presenning vs. utildækket. Faktorer som stakstørrelsen og nedbøren gør det svært

at konkluderer på undersøgelsernes resultater. Det er også vanskeligt at sammenligne tildækning med åndbare materialer med ikke åndbare.

Lagring under presenning hæmmer ventilationen i stakken og mindsker lagdelingen i stakken.

Især for små stakke medfører lagring under tag en øget tørring ift. lagring uden tag

Lagring under tag påvirker ikke maks. temperaturen, men reducerer tørstofabet.



En overdækket flisstak åbnes og damper kraftigt. (Foto: Simon Skov)

## Komprimering

### For

Ref. 17: Svampevækst kan styres ved at kende og kontrollere de betingelser biomasse lagres under. Øget overfladeareal og øget andel af bark/løv/nål vil forbedre svampevækst. Ved at komprimere stakken begrænses permeabiliteten og derigennem luftgennemstrømning. Dette kan hæmme svampeaktiviteten. Svampevækst kan også hæmmes ved at pakke flisen ind i en lufttæt membran.

Ref. 36: Forsøg med træflis (uspecificeret træart) har vist, at komprimering kan mindske stofabet væsentligt.

Ref. 41: Der henvises til en undersøgelse af effekten af komprimering på egeflis. Efter 6 måneders lagring var det gennemsnitlige stofabet for komprimeret flis 0,5 % og for ikke-komprimeret flis 2,8 %.

## Imod

Ref. 33: Studiet viser, at den bedste måde at lagre flis fra egestammer og flis fra hugstaffald er ikke-komprimeret og under tag. Lagringsmetoderne for flis i stak er herunder listet med stigende energitab.

- Ikke-komprimeret under tag
- Ikke-komprimeret udendørs
- Komprimeret under tag
- Komprimeret udendørs

Ref. 7: Lagring af fliset hugstaffald fra nåletræ og egetræsstammer i komprimerede stakke, kan øge væksten af svampe sammenlignet med ikke-komprimeret lagring. Det anbefales ikke at lagre flis i udendørs kompakte stakke, fordi det kan lede til akkumulering af varme (især i stakke med nåle og bark).

Ref. 20: Forsøg med komprimering af flisstakke viste hurtigere temperaturstigninger til højere temperaturstigninger, men også en hurtigere afkøling af stakken, sammenlignet med ikke komprimerede stakke.

Ref. 33: De højeste temperaturer blev registreret i det komprimerede flis af hugstaffald, lagret indenfor. Temperaturer på over 300 °C blev målt. På grund af mangel på oxygen opstod ingen selvantænding. For egetræflisen var den maksimale temperatur 55 °C. Den blev målt efter 10 dages lagring. Resultatet af denne undersøgelse viser, at flis af hugstaffald og flis af egestammer ikke bør lagres i komprimerede stakke. Højeste tørstof-tab i komprimeret, udendørs fliset hugstaffald.

## Konklusion

Der er forsøgsresultater både for og imod komprimering af flisstakke.

Ref. 33, som fraråder komprimering, er citeret mange gange og danner grundlag for en accept af, at komprimering bør undgås.

Der er flere, som fraråder komprimering af hensyn til risikoen for selvantændelse.

## Gasemission

*Undersøgelserne af gasemissionen fra flislagre er meget begrænsede. Der findes ikke undersøgelser, der belyser, hvordan fliskvaliteten, lagringsformen og emissionen hænger sammen. Det må forventes, at der ud over CO<sub>2</sub> også frigives mere skadelige drivhusgasser. Og idet omsætningen af flisen går hurtigere, når den har et højt indhold af nåle, kviste og bark, så må det forventes, at gasemissionen er større fra den type flis.*

Ref. 12: Positiv korrelation mellem det procentvise tørstof-tab og gasemission, når den totale emission af CO<sub>2</sub> og VOC over hele lagringsperioden blev inddraget. Den totale gasemission var højere fra aerobe reaktorer end fra anaerobe reaktorer.

Ref. 13: Biologiske processer spiller en væsentlig rolle for gasemission fra træflis. Anderledes er det ved lagring af træpiller, hvor hovedmekanismen bag gasemission og lagringstab er en kemisk oxidation af fedt og fedtsyrer.

Ref. 24: Det konkluderes, at emission af drivhusgasser fra lagring, i nogle tilfælde, kan være meget større end emissionen fra resten af brændslets produktion og transportkæde.

Det anbefales, at stakke ikke åbnes under lagring, da dette formodentlig vil intensivere nedbrydningsprocessen, og derved øge emission af gasser.

Pga. gasemission anbefales det at bruge varme brændselsstakke før stakke, der er kølet ned igen.

Ref. 48: Forsøg med tørring af flis ved 140 °C, 170 °C og 200 °C, som undersøger frigivelsen af organiske forbindelser ved tørring af biomasse. Frigørelse af volatile organic compounds (VOC'er) i kondensat eller udskillelsen af gasser under tørring af biomasse er et potentielt miljøproblem. Det kan bidrage til luftforurening og eutrofiering. VOC'er udsendes i luften ved lave temperaturer, når biomasse tørrer. Når træ tørres består VOC'erne primært af mono-terpener. Terpener udgør omkring 90 % af de let-ekstraherbare stoffer i nåletræ.

Monoterpener er tilstedeværende i højere grad i granflis fra træ dyrket i Nordsverige end fra træ dyrket i Sydsverige.

Undersøgelsen finder, at hovedkomponenterne af udsendte komponenter er mono-terpener og sesquiterpener, imens emissionen af di-terpener var negligerbar.

## Konklusion

Nedbrydning af flis, tørstof-tab, medfører en emission af CO<sub>2</sub> og andre drivhusgasser.

Der sker en emission af terpener under opvarmning af nåletræ.

Indholdet af terpener varierer med træernes voksested.

## Samlet konklusion

### Nedbrydningsprocesser

Nedbrydningen i flisstakke skyldes 1)respiration i levende celler, 2)mikrobiel aktivitet, 3)exoterme kemiske processer. Førstnævnte aftager i takt med, at cellerne dør. Sidstnævnte øges, når temperaturen overstiger 40-50 °C og er helt dominerende over ca. 80-90 °C.

Den væsentligste årsag til tørstof-tab er vednedbrydende svampes aktivitet.

Der er svampevækst i stakke med fugtigheder fra ca. 20 % til ca. 150 %, og temperaturer fra ca. 0 °C til ca. 60 °C, hvilket betyder, at der i praksis altid er svampeaktivitet i skovflis.

Bakterier har generelt en ringe evne til at nedbryde ved, men kan opretholde aktiviteten under iltfrie og mere våde og varme forhold, end svampe kan.

Over ca. 100 °C begynder pyrolysen at fordampe træ, hvorved afgasset trækul efterlades.

Jo større andel af små partikler, der er i en stak, jo større er den mikrobielle aktivitet, idet koloniseringen af en partikel sker fra overfladen.

Jo større andel nåle/løv, kviste og bark, jo hurtigere nedbrydning, idet ved nedbrydes langsommere end de "bløde" fraktioner.

Nedbrydningen medfører tørstof-tab og varmeudvikling.

### Temperaturudvikling

Varmeudvikling og isoleringsevne er afgørende for temperaturudviklingen i en stak.

Generelt opnås en temperatur på mellem 60 og 80 °C i løbet af de første to ugers lagring af flis. Der bevares en høj, men typisk faldende, temperatur i adskillige måneder (6-18 mdr.).

Jo vådere flisen er, jo højere bliver temperaturen i stakken.

Stakke med 15-20 % vandindhold vil følge den omgivende temperatur.

Tilstedeværelsen af metal i stakken kan øge varmeudviklingen.

Jo grovere flisen er, jo mindre er varmeudviklingen pga. mindsket mikrobiel aktivitet.

Jo grovere flisen er, jo større er ventilationen i stakken. Ventilationen fører til en hurtigere afkøling og en øget tørring.

Jo grovere flisen er, jo bedre ledes den opvarmede og fugtige luft ud af stakken. Bedre ventilation fører til øget tørring under lagringen.

## Selvantændelse

Skovflis af grov kvalitet med vandindhold under ca. 40 % selvantænder ikke (egen erfaring).

Jo større indholdet af nåle/blade, kviste og bark er, jo større er risikoen for selvantændelse.

Jo større oplaget er, og jo længere lagringstiden er, jo større er risikoen for selvantændelse.

Hvert materiale/fraktion har sine egne egenskaber mht. selvantændelse, hvilket fører til anbefalinger om maksimal stakhøjde.

Der findes ikke en veldokumenteret forklaring på hele opvarmningsforløbet fra den biologisk aktivitet aftager på grund af varme til selvantændelse.

## Tørstoftab

Der er sammenhæng mellem tørstoftab, varmeudvikling, flisens vandindhold og fordelingen af hhv. ved, nåle, kviste og bark i flisen.

Et vandindhold under 20 % hæmmer omsætningen meget. Et vandindhold under 35-40 % giver begrænset tab, mens vandindhold over 40 % medfører væsentligt større tab og vandindhold over 50 % endnu større tab.

Tørstoftabet er størst i de første uger af lagringen.

Indeholder flisen nåle, kviste og bark, så øges tørstoftabet.

Mange finder et tørstoftab på 1-3 % pr måned for skovflis med vandindhold omkring 40 %. Tørstoftabet er langt størst i begyndelsen af lagringsperioden.

Der findes ikke sammenhæng mellem tørstoftabet og flisens volumen, men på grund af tørstoftab falder flispartiklernes rumvægt under lagring. Flisstakkens volumen falder også under lagring, men det skyldes øget pakning/komprimering.

De fleste undersøgelser finder, at grovere flis svinder mindre end finere flis, men der er også resultater, der viser det modsatte.

Det kræver en meget kraftig tørring at kompensere for tørstoftabet. Tørringen har kun kompenserende effekt ved udnyttelse af den nedre brændværdi.

Flis i stak svinder mere end det ikke-huggede træ-biomasse.

## Vand

I langt de fleste stakke, men ikke alle, dannes der en markant tør midte/kerne og en meget våd side/skorpe og top. Typisk er det gennemsnitlige vandindhold ikke markant anderledes end udgangspunktet, men vandet er omfordelt.

Hvis materialet er tilpas vådt til at den biologiske aktivitet varmer stakken op, så er der mulighed for at fordampe en del vand ud af stakken. Hvis stakken samtidig



holdes fri for nedbør, typisk ved at ligge under tag, så vi det samlede vandindhold falde over en 3-5 måneders lagringsperiode.

Små, lave stakke vil være mere påvirket af nedbøren end store, høje stakke.

Der er tendenser til, at stakke, der overdækkes med presenning ikke tørrer og ikke omfordeler vandet i samme grad som utildækkede stakke.

Der sker i højere grad tørring fra stakke med grov flis end fin flis.

### **Brændværdi**

Biomassens øvre brændværdi ændres kun ubetydeligt, og teoretisk set kan der forventes en svag stigning i øvre brændværdi efter lagring, idet ligninandelen typisk stiger.

På grund af omfordeling af vand under lagring, så stiger nedre brændværdi nederst og midt i stakke, mens den falder øverst og yderst i stakke.

### **Askeindhold**

Nedbrydningen af flisen under lagring vil medføre, at den resterende flis har et højere askeindhold, idet asken fra den nedbrudte flis indeholdes i det tilbageværende.

Da askeprocenten i flis er forholdsvis lav, så er effekten af nedbrydningen på askeprocenten minimal.

I praksis vil hver håndtering/omladning/opstakning medføre, at der tilføres fremmede elementer fra omgivelserne til flisen. Det er hovedsageligt materiale fra underlaget fx grus. Også luftbærent materiale som sand kan øge askeindholdet.

Generelt er der stor variation i træers/trædeles askeindhold. Art, alder, voksested osv. har indflydelse.

### **Lagring**

Da omsætningen og dermed svindet er størst i begyndelsen af lagringsperioden anbefales lagerstyring efter først ind – først ud princippet.

Det er ikke nødvendigvis muligt at overføre resultater fra små (forsøgs-)stakke til store stakke.

Nedbrydningen under anaerobe forhold går langsommere end under aerobe forhold, men selv meget lave koncentrationer af ilt giver mulighed for aerob omsætning.

Det er almindelig praksis at flis, der skal lagres skal være relativt tørt.

Grov flis er bedre egnet til lagring end fin flis.

## Tørring

Flere har forsøgt at øge udtørringen i flisstakke. Udtørring er især ønskelig, hvis der ikke foretages røggaskondensering efter afbrænding.

Aktiv ventilation af flisstakke kræver stort energiinput, hvilket reducerer en evt. gevinst.

Kun forsøg, der understøtter stakkens naturlige ventilation fx ved at hæve stakken på net (ref. 18) eller opbevare stakken på spaltegulv (ref. 4), uden at udføre aktiv gennemblæsning viser en rimelig balance mellem energiforbruget/udgiften og flisens tørring.

## Lagring før hugning

I flis-litteraturen er der bred enighed om, at det er fordelagtigt, at lagre biomasse i sin oprindelige form og flishugge så tæt på forbrugstidspunktet som muligt.

Der er ikke inddraget litteratur, der undersøger svindet af ikke-hugget træbiomasse. Desuden kan der være driftsmæssige hensyn, der kræver, at materialet fjernes fra skovbunden.

## Tildækning

Ved at bruge en åndbar presenning kan vandindhold og tørstofstab reduceres.

Der findes ikke entydige resultater til at beskrive effekten af lagring under presenning vs. utildækket. Faktorer som stakstørrelsen og nedbøren gør det svært at konkludere på undersøgelsernes resultater. Det er også vanskeligt at sammenligne tildækning med åndbare materialer med ikke åndbare.

Lagring under presenning hæmmer ventilationen i stakken og mindsker lagdelingen i stakken.

Især for små stakke medfører lagring under tag en øget tørring ift. lagring uden tag.

Lagring under tag påvirker ikke maks. temperaturen, men reducerer tørstoffabet.

## Komprimering

Der er forsøgsresultater både for og imod komprimering af flisstakke.

Ref. 33, som fraråder komprimering, er citeret mange gange og danner grundlag for en accept af, at komprimering bør undgås.

Der er flere, som fraråder komprimering af hensyn til risikoen for selvantændelse.

## Gasemission

Nedbrydning af flis, tørstofstab, medfører en emission af CO<sub>2</sub> og andre drivhusgasser.

Der sker en emission af terpenier under opvarmning af nåletræ.

Indholdet af terpenier varierer med træernes voksested.

## Bilag 1, Dataskema

Oversigtsskema over forsøgsparametre og resultater, som er ekstraheret fra forskellige forsøg i litteraturen.

Det understreges, at skemaet indeholder data, fra forsøg under varierende forhold. Derfor kan datasættet ikke bruges uden forbehold.

Vi er bekendt med at det er vanskeligt at læse tallene i skemaet. Datasættet er leveret særskilt til DONG. Skemaet er blot en visuel fremstilling.

De indsamlede parametre er:

- Forsøgsnummer. Svarer til litteraturoversigten, Bilag 2.
- Stak/sektion. Antallet af stakke eller sektioner, der er undersøgt.
- Træart. Træarten bag flisen.
- Typen. Flistypen, som opgives i litteraturen.
- Behandling. Lagringsformen.
- Lagringstid. Lagringstiden, som er valgt i forsøget.
- Kategori. Lagringstiderne inddeles i kategorier á 3 mdr.
- Volumen. Volumen af den undersøgte stak.
- Stakhøjde. Den opgivne stakhøjde.
- Start vandindhold. Vandindholdet ved etableringen.
- Slut vandindholdet. Vandindholdet ved analysen på lagringstidspunktet.
- Gns. Tørstof-tab/mdr. Svindet på analysetidspunktet i gennemsnit pr lagringsmåned.
- Total tørstof-tab. Svindet fra start til analysetidspunktet.
- Energita-b. Ændringen af nedre brændværdi fra start til analyseidspunktet.
- Maks temperatur. Den højeste temperatur i lagringsperioden fra start til analyse.
- Ø. Brandværdi før. Øvre brændværdi i flisen ved forsøgsstart.
- Ø. Brandværdi efter. Øvre brændværdi i flisen ved analysetidspunktet.
- E. Brandværdi efter. Effektiv/nedre brændværdi i flisen ved forsøgsstart.
- E. Brandværdi efter. Effektiv/nedre brændværdi i flisen ved analysetidspunktet.



## Bilag 2, Referenceoversigt

Ref.	
1	<p>Afzal, M. T., Bedane, A. H., Sokhansanj, S., &amp; Mahmood, W. (2010). Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. <i>BioResources</i>, 5(1), 55–69.</p> <p><b>Undersøger:</b> Brændværdi, vandindhold, tørstof-tab, askeindhold, temperaturudvikling  <b>Sted:</b> Det østlige Canada  <b>Lagringstid:</b> Et år  <b>Type:</b> Flis, bundles og loose slash piles.  <b>Træart:</b> Hvid birk <i>Betula papyrifera</i>  <b>Behandling:</b> Flisstakke, lagret tildækket og utildækket.            Tre kegleformede stakke af flis.                1) Overdækket på skovbund.                2) Ikke-overdækket på skovbund.                3) Ikke-overdækket på plastikunderlag.  <b>HxLxB/volumen:</b> højde på 3 meter.</p>
2	<p>Gejdoš, M., Lieskovský, M., Slančík, M., Němec, M., &amp; Danihelová, Z. (2015). Storage and Fuel Quality of Coniferous Wood Chips. <i>BioResources</i>, 10(3), 5544–5553</p> <p><b>Undersøger:</b> Eksperimentet beskriver, hvordan specifikke vejrforhold (atmosfærisk temperatur og nedbør) har indflydelse på flisstakkes temperaturudvikling, brændværdi og askeindhold. Vandindhold, relativt vandindhold, brændværdi og askeindhold blev målt. Bestemmelse af partikelstørrelse. Mikrobiel identifikation af svampe i prøverne. Temperatur og relativ luftfugtighed blev målt hver dag nær stakken.  <b>Sted:</b> Det centrale Slovakiet  <b>Lagringstid:</b> 15 måneder  <b>Type:</b> Træflis. Biomassen blev hugget til flis umiddelbart efter fældning. Hele træer.  <b>Træart:</b> Rødgran (<i>Picea abies L.</i>) og ædelgran (<i>Albies alba L.</i>)  <b>Behandling:</b> Stakken var placeret på vandfast stykke plastik på 12x14 m. Prøver blev samlet fra hver højde (1 m, 2 m, 3 m) i starten og i slutningen af eksperimentet.  <b>HxLxB/volumen:</b> 4 m høj stak. Startvægt: 163,5 ton. Efter 456 dage blev 148,3 ton kørt væk i lastbiler.  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Flisen har en partikelstørrelse på op til 35,5 mm.</p>
3	<p>Jirjis, R. (1995). Storage and drying of wood fuel. <i>Biomass and Bioenergy</i>, 9(1-5), 181–190. <a href="http://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00090-9">http://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00090-9</a></p> <p>Review: Flere eksperimenter beskrives.</p>
4	<p>Scholz, V., Idler, C., Daries, W., &amp; Potsdam, J. E. (2005). Storage of Chipped Field Wood Losses and Mould Fungi Infestation. <i>Landtechnik</i>, 4, 210–211.</p> <p><b>Undersøger:</b> Tørstof-tab, Tørring, Skimmelsvampe  <b>Sted:</b> Tyskland</p>

	<p><b>Lagringstid:</b> Et år.  <b>Type:</b> Flis  <b>Træart:</b> Poppel og pil  <b>Behandling:</b> Tre typer lagring: i silo, i boks og i stakke (Uventilerede udendørs stakke). Temperatur i stakken blev målt, og tørstof-tab blev bestemt med "balance bags".  <b>HxLxB/volumen:</b> Siloer: 1,5 m<sup>3</sup>, 2 m høj cylinder. Bokse: 10 m<sup>3</sup>, 2,5 m høje. Stakke: 18-2000 m<sup>3</sup>, 3-6 m høje.  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Hugget med 4 forskellige flishuggere. Gennemsnitlig længde fra 16 til 156 mm.</p>
5	<p>Barontini, M., Scarfone, A., Spinelli, R., Gallucci, F., Santangelo, E., Acampora, A., Pari, L. (2014). Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. <i>Biomass and Bioenergy</i>, 62, 17–25.  <a href="http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.022">http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.022</a></p> <p><b>Undersøger:</b> Temperatur, vandindhold, <math>\phi</math>. og n. brændværdi, kemisk komposition, askeindhold, tørstof-tab.  <b>Sted:</b> I det centrale Italien.  <b>Lagringstid:</b> 6 måneder, fra marts til september 2012  <b>Type:</b> Flis  <b>Træart:</b> Poppel  <b>Behandling:</b> Sammenligning af lagring af flis fra stamme og flis fra krone. Tre stakke af stamme, tre stakke af krone. Hver stak delt i to semi-stakke med et plastiknet.  <b>HxLxB/volumen:</b> Hver stak: 10 m lang, 8 m bred og 4 m høj. Gennemsnitligt 117 m<sup>3</sup>.</p>
6	<p>Thörnqvist, T. (1985). Drying and Storage of Forest Residues for Energy Production. <i>Biomass</i>, 7, 444-453.  Opsamling på studier af tørring og lagring af hugstaffald siden 1978 udført af Department of Forest Product, Swedish University of Agricultural Science.  Baseret på Thörnqvists egen artikler.</p> <p><b>Undersøger:</b> Temperatur, vandindhold, stof-tab og brændværdi  <b>Type:</b> Hugstaffald reduceret til flisagtige fraktioner.  <b>Træart:</b> Fra ukendt træ.</p>
7	<p>Noll, M., &amp; Jirjis, R. (2012). Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. <i>Applied Microbiology and Biotechnology</i>, 95(3), 551–563.  <a href="http://doi.org/10.1007/s00253-012-4164-3">http://doi.org/10.1007/s00253-012-4164-3</a></p> <p>Artiklen gennemgår tilgængelig viden om mikrobiologiske effekter på lagret biomasse. Svampe- og bakteriesamfund og identitet.  <b>Undersøger:</b> Potentielle funktioner af mikroorganismer i store stakke af lagret træflis diskuteres:  1) Reduktion af brændselskvalitet og 2) selvantænding.  Godt skema over nøgleparametre for mikrobiel aktivitet i flisstakke.</p>

8	<p>Blomqvist, P., Persson. B. (2003). Spontaneous Ignition of Biofuels – A Literature Survey of Theoretical and Experimental Methods. <i>SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP Arbetsrapport, 18.</i></p> <p><b>Træart:</b> Ukende træarter  <b>Undersøger:</b> Metoder til at bestemme risikoen for spontan antænding gennemgås. Den mest udbredte metode i dag (2003) er Frank-Kamenetskii metoden, som beskrives i detaljer. Metodens begrænsninger beskrives.  Artiklen indeholder en kortlægning af risiko for spontan selvantændelse i forskellige biomasselagre i Sverige.</p>
9	<p>Eriksson, L., &amp; Gustavsson, L. (2010). Comparative analysis of wood chips and bundles - Costs, carbon dioxide emissions, dry-matter losses and allergic reactions. <i>Biomass and Bioenergy, 34(1), 82–90.</i>  <a href="http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.002">http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.002</a></p> <p><b>Undersøger:</b> Komparativ analyse af to Svenske systemer. Bundle-systemet sammenlignes med det traditionelle træflissystem og det svenske og finske bundle-system sammenlignes. Forskelle i CO<sub>2</sub> emission, tørstof-tab og potentielle allergiske relationer.  <b>Type:</b> Bundles. Ikke flis.</p>
10	<p>Ferrero, F., Lohrer, C., Schmidt, B. M., Noll, M., &amp; Malow, M. (2009). A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles. <i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22(4), 439–448.</i>  <a href="http://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.009">http://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.009</a></p> <p><b>Undersøger:</b> En matematisk model til at forudsige opvarmning af storskala flisstakke. Formål er at forstå forstadier til selvantænding i storskala flisstakke.  <b>Sted:</b> Tyskland  <b>Lagringstid:</b>  Stak 1: 10 måneder med start i juli 2007.  Stak 2: i 6 måneder med start i maj 2008.  <b>Type:</b> Flis  <b>Træart:</b> Flis af fyrretræ (pine wood).  <b>Behandling:</b> Temperatur, gasemission blev mål for to flisstakke.  <b>HxLxB/volumen:</b> Volumen over 1000 m<sup>3</sup> for begge stakke.  Stak 1: 15x20 m, 6 m i højden  Stak 2: 15x20 m, 5 m i højden  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Stak 1: gennemsnitlig partikelstørrelse omkring 10 mm. Start vandindhold: 35 %. Maks temperatur omkring 45 °C.  Stak 2: gennemsnitlig partikelstørrelse omkring 2 mm. Start vandindhold: 46 %. Maks temperatur omkring 67 °C.</p>
11	<p>He, X., Lau, A. K., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, X. T., &amp; Melin, S. (2014). Investigating gas emissions and dry matter loss from stored biomass residues. <i>Fuel 134, 159–165.</i> <a href="http://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.061">http://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.061</a></p> <p><b>Undersøger:</b> Undersøger gas emission fra hugstaffald af douglas gran</p>

	<p>(<i>Pseudotsuga menziesii</i>) under forskellige temperaturer, og undersøger på samme tid de procentvise ændringer af tørstofmængden over lagringsperioden. s</p> <p><b>Sted:</b> Laboratorie</p> <p><b>Lagringstid:</b> 2 måneders lagring</p> <p><b>Type:</b> Flis og nåle (greens) fra British Columbia.</p> <p><b>Træart:</b> Douglas gran (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)</p> <p><b>Behandling:</b> Laboratorieforsøg med små beholdere (2 L)</p> <p>En testserie med ren træflis</p> <p>En testserie med træflis og nåle i ratioen 1:1 på tørstofbasis.</p> <p>Temperatur: 5, 20, 35 eller 50 °C. Testet under både aerobiske og anaerobiske forhold.</p> <p>Sundhedsrisiko og NMVOC'er diskuteres.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> 2 L</p> <p><b>Flisens komponenter:</b> Træflis med under 1 % bark.</p> <p><b>Fraktionsstørrelse:</b> Flis: Partikelstørrelse på 5-30 mm.</p>
12	<p>He, X., Lau, A. K., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, X. T., &amp; Melin, S. (2015). Quantification of gas emissions from stored softwood chips as solid biofuels. <i>International Journal of Environmental Science and Technology</i>, 12(5), 1549–1558. <a href="http://doi.org/10.1007/s13762-014-0541-z">http://doi.org/10.1007/s13762-014-0541-z</a></p> <p><b>Undersøger:</b> Laboratorieforsøg med flis fra Western Red Cedar. Der blev målt på gasser som CO<sub>2</sub>, CO og VOCs</p> <p><b>Lagringstid:</b> Lagret i to måneder ved forskellige temperaturer.</p> <p><b>Behandling:</b> Aerobiske og anaerobiske forhold.</p> <p>Forsøget genbekræftede den karakteristiske henfalds-resistens for Western Red Cedar.</p> <p>Kvantitativ GC/MS analyse indikerede, at størstedelen af udledte VOC'er inkluderede benzen og benzens derivater metanol, terpen, aldehyder, syrer osv.</p>
13	<p>Alakoski, E., Jämsén, M., Agar, D., Tampio, E., &amp; Wihersaari, M. (2016). From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass - A short review. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i>, 54, 376–383. <a href="http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.021">http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.021</a></p> <p><b>Træart:</b> ukendt</p> <p><b>Type:</b> Træpiller og flis</p> <p>En gennemgang af afgangsstudier af træpiller og sammenligning med nedbrydning af træflis. Manglende studier af gas emission (og sundhedsrisiko) fra flis. Derfor sammenligning med træpiller.</p> <p>Artiklen postulerer, at siden både træflis og piller er produceret af træbiomasse, er fænomenologi ved lagring af begge lignende og derfor kan væsentlig indsigt i lagring af flis opnås ved at kigge på/overveje studier med træpiller. Lighederne reflekteres.</p>
14	<p>Kofman, P. D. (1998). Er flis brandfarlig? Park- og landskabsserien, 12.0-5.</p> <p><b>Træart:</b> Pil</p>



	<p><b>Type:</b> Flis af energipil</p> <p>Forklarer, hvorfor flisstakke ryger (damper)</p> <p>Konkluderer, at flis ikke er brandfarlig.</p>
15	<p>Kofman, P. D., Thomsen, I. M. (1998) Lufttæt lagring af energiflis. <i>Skovbrug Videnblade</i>, 7.2-5.</p> <p><b>Undersøger:</b> Lufttæt lagring af flis fra skovflis.</p> <p><b>Sted:</b> Danmark</p> <p><b>Lagringstid:</b> 5 mdr. Lagret fra september 1997 til januar 1998</p> <p><b>Type:</b> Skovflis</p> <p><b>Træart:</b> Rødgran</p> <p><b>Behandling:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Sommertørret heltræsflis. Under presenning</li> <li>2) Sommertørret heltræsflis. Lufttæt indpakning</li> <li>3) Grøn heltræsflis. Lufttæt indpakning</li> <li>4) Frisk stammeflis. Lufttæt indpakning</li> </ol> <p><b>HxLxB/volumen:</b> Fire stakke: 45-50 tons (150-60 m<sup>3</sup>)</p> <p><b>Konklusion:</b> Lufttæt opbevaring af flis er gavnlig: tørstofabet mindskes, der findes ingen omfordeling af fugt, arbejdsmiljøet ved håndtering forbedres væsentligt.</p>
16	<p>Kofman, P. D. (1993). Lagring af flis, chunk og brænde fra heltræer. <i>Skovbrug Videnblade</i>, 7,2-1.</p> <p><b>Sted:</b> Danmark</p> <p><b>Undersøger:</b> Lagringsforsøg af sommertørret træ. Temperatur og vandindhold blev målt.</p> <p><b>Træart:</b> Pinus contorta heltræer.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> Tre stakke på 200 rm – flis, fin chunk, grov chunk. Brændestablen var 100 rm.</p> <p><b>Behandling:</b> Anlagt på presenning og overdækket med landbrugsplastik.</p> <p><b>Konklusion:</b> Temperaturen steg mest i stakke med fine partikler. Vandindholdet faldt betydeligt mere i de grove partikler, end i de fine partikler.</p>
17	<p>Krigstin, S., &amp; Wetzel, S. (2016). A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. <i>Fuel</i> 175, 75–86.  <a href="http://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.014">http://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.014</a></p> <p>Gennemgang og diskussion af mekanismer bag ændringer i lagret træbiomasse</p> <p>Inddrager bl.a. litteratur om flis, chunk, bundles og "choppice stems". Fokus på mekanismer, massetab, vandtab og energiindhold.</p> <p><b>Konklusion:</b> Hovedaktørerne i ændringer i lagret biomasse er levende cellers respiration, mikrobiel aktivitet, termokemiske reaktioner og fordampning af vand. Ved at ændre lagringsforhold, kan man influere på mekanismerne.</p>
18	<p>Lethtikangas, P. (1999) Lagringshandbok för trädbränslen. <i>Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala, Lagringshandbok för trädbränslen, 2:a</i></p>

	<p><i>upplagan.</i></p> <p>Afsnit om træbrændselskvalitet. Variabler som vandindhold, brændværdi, askeindhold og fraktionsstørrelser. Resultater fra forskellige lagringsforsøg. Stor skala og lille skala.</p>
19	<p>Li, X. R., Koseki, H., &amp; Momota, M. (2006). Evaluation of danger from fermentation-induced spontaneous ignition of wood chips. <i>Journal of Hazardous Materials</i>, 135(1-3), 15–20. <a href="http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.034">http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.034</a></p> <p>Laboratorieforsøg. <b>Undersøger:</b> Langvarende lav-temperatur antændelse af stakke af træflis. <b>Træart:</b> Ukendt træart. Vanskeligt at ekstrapolere fra lille skala til storskala forsøg. Artiklen undersøger typen af reaktioner, der er involveret ved lave temperaturer, når træflis lagres. Dette undersøges med højsensitive kalorimetre. Det undersøges, hvilke betingelser selvantændelse kræver. Spontaneous ignition tester (SIT)</p>
20	<p>Petersen, R. S. (2009) Selvantændelse i oplagret biomasse – En erfaringsindsamling. <i>Danmarks Tekniske universitet. Institut for Byggeri og Anlæg. Afgangsprojekt.</i></p> <p>På grundlag af statistiske oplysninger om selvantændelsesbrande i biomasse i Danmark. En spørgeskemaundersøgelse fra aktuelle selvantændelsesbrande og litteratur. Formålet er at foretage erfaringsindsamling om selvantændelsesbrande. Mange typer lagret biomasse er inddraget. Statistikker om brande i Danmark fra selvantændt biomasse.</p>
21	<p>Rupar-Gadd, K. (2006) Biomass Pre-treatment for the Production of Sustainable Energy – Emission and Self-ignition. <i>Bioenergy Technology, Acta Wexionensia</i>, 88.</p>
22	<p>Whittaker, C., Yates, N. E., Powers, S. J., Misselbrook, T., Shield, I. (2016) Dry Matter Losses and Greenhouse Gas Emissions From Outside Storage of Short Rotation Coppice Willow Chip. <i>BioEnergy Research</i>, 9, 288-302</p>
23	<p>Whittaker, C., Macalpine, W., Yates, N. E., Shield, I. (2016) Dry Matter Losses and Methane Emissions During Wood Chip Storage: the Impact on Full Life Cycle Greenhouse Gas Savings of Short Rotation Coppice Willow for Heat. <i>BioEnergy Research</i>. 1-16</p>
24	<p>Wihersaari, M. (2005). Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. <i>Biomass and Bioenergy</i>, 28(5), 444–453. <a href="http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.011">http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.011</a></p> <p><b>Træart:</b> Uspecificeret træart <b>Undersøger:</b> tørstof-tab. Evaluering af risikoen for emission af drivhusgasser.</p>

	<p><b>Type:</b> Bl.a. flis af frisk hugstaffald og naturligt tørret hugstaffald. Ref.ererer til mange svenske og finske rapporter og undersøgelser. Heriblandt Thörnqvist.</p>
25	<p>Jirjis, R., Bjurman, J. (1995). Inaccuracy in the Determination of Dry Matter Losses in Logging Residues. <i>Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products</i>. (In prep.)</p> <p><b>Træart:</b> Pil og nåletræ  <b>Undersøger:</b> Laboratoriestudie af fejl i bestemmelse af vand og tørstofindhold i hugstaffald.  <b>Konkluderer:</b> Det blev indikeret, at tab af flygtige organiske komponenter (VOC's) er en vigtig faktor, som kan forklare, hvorfor der i flere studier er blevet observeret et negativt tørstof-tab.</p>
26	<p>Thörnqvist, T., Jirjis, R. (1990) Changes in fuel chips during storage in large piles. <i>SLU, Rapport nr. 219</i></p> <p>Formålet med forsøget er at undersøge hvordan energiindholdet og mængden af mikrosvampe udvikler sig over tid ved lagring af flis i store stakke. Resultatet skal ligge til grund for at beslutte om lagring af fliset hugstaffald skal følge modellen først ind først ud eller modellen først ind sidst ud.</p> <p><b>Sted:</b> Lagret ved Böksholm i Sverige  <b>Lagringstid:</b> 28 uger – 7 mdr. Fra d. 18 maj til 26 juni 1987.  <b>Type:</b> Flis  <b>Træart:</b> Hugstaffald, hvor gran udgjorde mindst 70 % af total volumen. Noget frisk fældet og hugget, andet hugget for nogle måneder siden.  <b>Behandling:</b> Udendørs udækket lagring på jorden.  <b>HxLxB/volumen:</b> 90 m lang, 7 m høj. 12 forsøgsled/sektioner med 6 meters mellemrum.  Total volumen: 5285 rm. Masse: 1553,8 ton. Bulk densitet: 294 kg/rm.  <b>Flisens komponenter:</b> Proportionen af træ i stakken var 46 %, kviste og bark udgjorde 16 %, nitrogenrige fraktioner - nåle og bark - udgjorde 21 % og 11 %. (af tørstof). Se tabel 2.  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Fraktioner og bestanddele: se side 1. Den største andel af partiklerne var 5-20 mm store.</p>
27	<p>Bjørklund, L. og Frederikson, H. (1984) Lagring av komprimerade hyggesrester och komprimerat røjningsvirke. <i>SLU. Rapport 143</i>.</p> <p>Forsøg med lagring af hugstaffald i komprimerede baller. Sammenligner kort tørring, mængden af svampesporer og tørstof-tab med flis. Beskriver kvaliteten af flisen efter lagring og flisning.</p> <p><b>Sted:</b> Sverige  <b>Lagringstid:</b> Fra start juni til slut oktober. Omkring 5 mdr.  <b>Type:</b> Ikke-sønderdelt hugstaffald  <b>Træart:</b> Hugstaffald 90 % Gran, tyndingstræ af 30 % fyr og 70 % birk  <b>Behandling:</b> Komprimeret i baller og ikke komprimeret</p>

28	<p>Baadsgaard-Jensen, J. (1988) Storage and energy economy of chunk and chip piles. <i>Danish institute of forest technology.</i></p> <p>Rapporten præsenterer resultatet af en komparativ undersøgelse af chunk og flis i forskellig størrelse. Dansk undersøgelse.</p> <p><b>Sted:</b> Danmark</p> <p><b>Lagringstid:</b> Stakke etableret 1.-13. december 1986. Lagret i 4,5, 8 og 11 måneder. En tredjedel af hver stak blev taget ned d. 21-22. april, en tredjedel d. 24-25. august og en tredjedel 4-5. november 1987.</p> <p><b>Type:</b> Flis og chunk</p> <p><b>Træart:</b> rødgran</p> <p><b>Type:</b> Chunk fra sommertørret træ. Rødgran, mikset med lærk og ædelgran</p> <p><b>Behandling:</b> Én stak flis (overdækket). To stakke af hver længde chunk (7,5 cm, 10 cm og 15 cm). Dækket med presenning og udækket.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> Alle 2,5 m høje og 4,5 m bredde ved basis.</p> <p><b>Fraktionsstørrelse:</b> længde chunk (7,5 cm, 10 cm og 15 cm)</p>
29	<p>Garstang, J., Weeks, A., Poulter, R. and Barlett, D. (2002) Identification and characterization of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulk storage of woodchips and development of best storage practices. <i>First Renewables Ltd</i></p> <p>Indeholder dels en litteraturgennemgang og dels et lagringsforsøg, dog IKKE med nåletræ.</p> <p><b>Undersøger:</b> Karakteriserer faktorer, som påvirker tab i ikkeventilerede, storskala flisstakke, for at udvikle den bedste lagringsteknik, som kan implementeres i kommerciel skala.</p> <p><b>Sted:</b> Lagret ved North Yorkshire.</p> <p><b>Lagringstid:</b> 15 mdr.</p> <p><b>Type:</b> Flis</p> <p><b>Træart:</b> En stak pil. En stak hugstaffald af løvtræ.</p> <p><b>Behandling:</b> To flisstakke, begge udækket. En af pileflis. En af løvtræ-hugstaffald.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Pil: i en stak med trekantet tværsnit. Højde 5 m, hældning 39 grader.</li> <li>- Hugstaffald: i en stak med trekantet tværsnit. 4,5 m høj og 37 grader.</li> </ul> <p><b>Målt:</b> Temperatur, kemisk sammensætning, nedbør og udendørs temperatur, svampesporer, askeindhold, brændværdi.</p> <p>Forsøgsresultater og diskussion over emnerne: Vejr, vandindhold, askeindhold, temperatur, brændværdi, partikelstørrelse, stakkenes densitet, biokemi, nær ifra-red, modellering af luftflow og vanddynamik.</p>
30	<p>Kofod, E.O. (1983) Biologiske og kemiske processer i brændsels-flislagre. <i>Skovteknisk Institut. Rapport 8-1983</i></p> <p>Udredning på bases af eksisterende litteratur primært om lagring af flis. Redegør for biologiske og kemiske processer: temperaturudvikling, tørstof-tab, fugtighedsændringer, brændværdi og sundhedsrisici.</p>

	<p><b>Træart:</b> Uspecificerede træarter. Blandt andet nåletræer</p> <p><b>Type:</b> skovflis</p>
31	<p>Frederikson, H. (1985) Lagring af skogbrændsle vid mindre forbrænningsanlæggingar. <i>SLU. Rapport nr. 159</i></p> <p><b>Formål:</b> Undersøgelse af ændringer i tørstof-tab, vandindhold og mængden af svampesporer i skovbrændselet, ved håndtering af skovbrændsel på 12 mindre, individuelle forbrændingsanlæg. Koncentreret om findelt brændsel. I praktisk drift.</p> <p><b>Sted:</b> I det centrale Sverige</p> <p><b>Lagringstid:</b> Lagret i 1 til 6 måneder. Flis hugget på forskellige tidspunkter i tidsrummet fra aug. 1983 til jan. 1984</p> <p><b>Type:</b> Flis i små stakke</p> <p><b>Træart:</b> Meget forskelligt</p> <p><b>Behandling:</b> Jeg tror at flisen primært lagres under tag, i et skur eller lignende.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> De fleste brændselsflislagre var rektangulære og blev fyldt med flis til en højde på 2-3 meter. Tre havde en højde på 1 m</p> <p>Størstedelen af råmaterialet var stammetræ. Næringskompositionen i dette materiale undertrykker svampevæksten for råd-, blåsplint- og skimmelsvampe i forhold til materiale fra heltræ</p>
32	<p>Nilsson, t. (1987) Jämförande lagringsstudie av småved och brändselsflis. <i>SLU. Rapport 192</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Undersøgelse af forskelle i ændringer i energiindhold og svampevækst imellem flis og chunk. Temperaturudvikling, vandindhold, stof-tab, askeindhold, brændværdi.</p> <p><b>Sted:</b> Sveriges Landbrugsuniversitet i Garpenberg</p> <p><b>Lagringstid:</b> 8 måneder. Fra juni 1985 til feb. 1986.</p> <p><b>Type:</b> Flis og chunk</p> <p><b>Træart:</b> 90 % birk og resten nåletræ. Fra unlimbed heltræ fra en tidlig tynding.</p> <p><b>Behandling:</b> Oversigt s. 11</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tørresilo med koldlufttørrer. 40-45 rummeter materiale.</li> <li>- Netkasse med tag (net bin): 10 rummeter materiale</li> <li>- Stak, først udækket i 2 mdr. herefter presenningstag, luftigt: 55 rummeter materiale.</li> </ul> <p><b>Flisens komponenter:</b> Forholdsvis meget træ og lav proportion af nåle/blade.</p> <p><b>Fraktionsstørrelse:</b> Domineret af fraktioner på omkring 30 mm og chunk: omkring 100 mm.</p>
33	<p>Løvegren, G. och Jonsson, L. (1987) Storing of chipped logging residues and chipped oak stemwood in big piles. <i>SLU. Rapport 191</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Tester en lagringsmetode, der mindsker tørstof-tab og dannelsen af mikrosvampe.</p> <p><b>Sted:</b> Böksholm i det centrale Sverige</p> <p><b>Lagringstid:</b> Lagret fra ca. 01.06.85 til 15.01.86. Omkring 7 mdr.</p>

	<p><b>Type:</b> Flis</p> <p><b>Træart:</b> 4 led af fliset hugstaffald (grene og toppe) af 70 % gran og 4 led af fliset stammeved fra eg.</p> <p><b>Behandling:</b> To forsøgsstakke med i alt 8 forsøgsled. 4 led under tag og 4 i det fri. 4 led komprimeret og 4 ikke-komprimeret. Oversigt over forsøgsled s. 25.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> Ca. 60 m lang, 14 m bred og 7 m høj. Hver stak omkring 2500 m<sup>3</sup>.</p> <p><b>Flisens komponenter:</b> s. 11</p> <p><b>Fraktionsstørrelse:</b> s. 12</p> <p>Et niende forsøgsled med 3 m egestammer lagret i en stak på 15x2x3 m. Temperatur og gasudvikling blev målt.</p>
34	<p>Nellist, M.E. (1997) Notes on procedures used in conducting drying and storage trials with short rotation forestry. <i>Aberdeen University. Paper 1997:2</i></p> <p>Håndbog for hvordan lagringsforsøg bedst udføres, samt hvordan værdier måles og beregnes.</p> <p>Noter om procedurer for udførelse af forsøg med lagring og tørring af træ i form af flis, chunk, billets og hele skud. Der er behov for at kunne forklare, fortolke og ekstrapolere på forsøg i mindre skala, for at kunne overføre til større skala.</p> <p><b>Type:</b> Flis fra short rotation forestry</p> <p><b>Træart:</b> typisk pil, birk eller poppel</p> <p>Ved vurdering af lagringsforsøg kan følgende overvejes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ikke-ventilerede, udendørs stakke af flis eller chunk:</li> </ul> <p>En undersøgelse af naturligt ventilerede, udendørs stakke vil være stærkt afhængige af vejrforhold, i særdeleshed nedbørsmængden, ratioen mellem eksponeret overflade i forhold til volumen, vindforhold samt stakkens permeabilitet for vind. Fordi disse forhold er unikke for hvert eksperiment og fordi denne lagringsmetode er den mest variable og ukontrollerbare er det essentielt at fortolke resultaterne. Jo større forsøgsstak, jo mindre betyder nedbørsmængden.</p>
35	<p>Thörnqvist, T. (1983) Lagring af sønderdelade hyggesrester. <i>SLU. Uplag 137</i></p> <p><b>Sted:</b> AB Iggesunds Bruk i Sverige</p> <p><b>Lagringstid:</b> Undersøgelsen gik fra oktober 1980 til april 1981. Egentlig lagring 4,5-5,5 mdr.</p> <p><b>Type:</b> Stak 1: ubehandlet hugstaffald, Stak 2-6: flis af hugstaffald</p> <p><b>Træart:</b> Miks af træ træsorter: 10 % fyr, gran og løvtræ</p> <p><b>Behandling:</b> Lagret i Sverige hen over vinteren. Udendørs overdækket og ikke-overdækket.</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> Omkring 6 m høj. Stak 1: 600 m<sup>3</sup>, stak 2-6 4-500 m<sup>3</sup></p> <p><b>Flisens komponenter:</b> s. 21-22</p> <p><b>Fraktionsstørrelse:</b> s. 24</p> <p>Undersøgelse af lagring af sønderdelt hugstaffald. 6 substudier.</p> <p>1. Ubehandlet hugstaffald</p>

	<p>2. flis af friskt hugstaffald. Sønderdelt med Bruks-Svedala-Arbrås hammerkværn.</p> <p>3. flis af friskt hugstaffald. Sønderdelt med Morgårdshammers skivkross (MS)</p> <p>4. flis af friskt hugstaffald. MS. Under presenning.</p> <p>5. substudie: hugstaffald som har ligget en vegetationsperiode i hugningsområdet og knust. MS.</p> <p>6. substudie: hugstaffald som har ligget to vegetationsperioder i hugningsområdet og knust. MS.</p>
36	<p>Thörnqvist, T. (1985) Storskalig sæsongslagring av biobrændsel. <i>SLU. Rapport 154</i></p> <p>En sammenskrivning af daværende viden om storskala sæsonlagring af biobrændsel.</p> <p><b>Konkluderer:</b> at der hidtidigt (1985) ikke er meget data om forsøg i stor skala.</p> <p>Store stakke = mindst 1000 m<sup>3</sup> Der bør udføres forsøg i stor skala. Med fokus på blandt andet stoftab, tørring, komprimering, iltfrit miljø (fortrænge ilt med andre gasser), fraktionsstørrelse.</p> <p>Stofatab er større i det sydlige Sverige end i det nordlige Sverige pga. temperaturen.</p>
37	<p>Gislerud, O. and Heding, N. (1984) Storing, drying and internal handling of wood fuels. <i>Danish institutet of forest technology</i></p> <p>Proceedings of a conference held by the International Energy Agency (IEA) Forestry Energy Programme Group C, 1984 KBH</p>
38	<p>Thörnqvist, T. (1983) Brænsleflisningens forændring under eet års lagring. <i>SLU. Rapport 148</i></p> <p>En del af projektet "Forest energy"</p> <p>Formål med forsøgelsen er at oplyse, hvordan faktorer som vandindhold, tørstof, askeindhold, brændværdi og svampe ændrer sig gennem et års lagring af en stak fliset hugstaffald.</p> <p><b>Sted:</b> Det centrale Sverige.</p> <p><b>Lagringstid:</b> 12 mdr. Fældet i februar 1981 og fliset i juni. 6 sektioner/tværsnit, en sektion fjernes hver 2. måned. Seks gange i alt.</p> <p><b>Type:</b> Flis</p> <p><b>Træart:</b> Fra skovområder med 40 % fyr (pine) og 60 % gran (spruce).</p> <p><b>Behandling:</b> udendørs udækket</p> <p><b>HxLxB/volumen:</b> 21 m lang og 3 m høj, sunket sammen til 2.2 m efter to måneder</p> <p><b>Flisens komponenter:</b> se side 12</p> <p><b>Fraktionsstørrelse:</b> se side 13</p>
39	<p>Eriksson, A. (2011) Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and powerplants. <i>SLU. Examensarbete 2011:05</i></p>

	<p>Om lagring af biobrændsel. Indeholder blandt andet et litteraturstudie og to lagringsforsøg.</p> <p>Lagringsforsøg 1:  <b>Sted:</b> Vattenfall Heat Sverige, i Sverige  <b>Lagringstid:</b> 6 uger  <b>Type:</b> Flis  <b>Træart:</b> En stak flis fra affaldstræ og en stak flis fra</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Affaldstræet er rester fra industri, byggeri og emballagetræ.</li> <li>- Stammetræet var et miks af gran, fyr og birk. Mest nåletræ.</li> </ul> <p><b>Behandling:</b> udendørs, ikke-ventilerede stakke  <b>HxLxB/volumen:</b> ca. 4,5 m høje. Affaldstræ (20x8x4,5 m – 4-500 m<sup>3</sup>) og stammetræ (20x9x5 m – 4-500 m<sup>3</sup>).</p> <p>Lagringsforsøg 2:  <b>Sted:</b> Vattenfall Heat Sverige, i Sverige  <b>Lagringstid:</b> 4 dage  <b>Type:</b> Flis affaldstræ  <b>Træart:</b> Ukendt  <b>Behandling:</b> En stak flis af affaldstræ blev placeret på et varmt underlag. For at teste om flis kan tørres med overskudsvarme  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Højere andel af store fraktioner end i affaldstræet i Lagringsforsøg 1.  Øvre og nedre brændværdi, energitab og askeindhold</p>
40	<p>Hansen, E. B. (1995). Forsyningskæder for træ. <i>Skovbrugsserien nr. 14-1995 Forskningscentret for Skov &amp; Landskab, Hørsholm 87 s., ill.</i></p> <p>Rapporten beskriver en række forsyningskæder til varme- og el-industrien.  Ikke stor fokus på lagring og tab. Fokus på transport- og håndteringsomkostninger.  Beskriver effekten af for-tørring af træ i skoven (som er en typisk Dansk model i 1995).</p>
41	<p>Thörnqvist, T. (1982) Betydelse av tak och luftigt underlag vis lagring av bränsleflis. <i>SLU. Rapport 127</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Effekten af tag og underlag på udendørs flisstakke. Undersøgelse af ændringer i vandindhold, tørstof og mængden af svampediasporer.  <b>Sted:</b> Det centrale Sverige. Hissmofors.  <b>Lagringstid:</b> ca. 7 mdr. Fra april 1980 til november 1980  <b>Type:</b> Flis af friskhugget hugstaffald  <b>Træart:</b> Trädlagsblanding. Miks af træarter.  <b>Behandling:</b> Fire stakke. To på metalnet (sträckmetal) 30 cm over jorden og to på asfalt. To overdækket og to uden overdække.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) På stackmetal, luftigt tag af presenning.</li> <li>2) På stackmetal, uden overdække</li> <li>3) På asfalt, luftigt tag af presenning</li> <li>4) På asfalt, uden overdække</li> </ol> <p><b>HxLxB/volumen:</b> 3 m høje, 55 m<sup>3</sup></p>



	<p><b>Flisens komponenter:</b> s. 18  <b>Fraktionsstørrelse:</b> s. 19</p>
42	<p>Feist, W. C. et al. (1971) Encasing wood chip piles in plastic membranes to control chip deterioration. <i>Technical Association of the Pulp and Paper Industry, Vol. 54, No. 7, 1140-1142</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Effektiviteten af at omslutte flisstakke med lufttætte membraner, for at undgå nedbrydning af flisen under lagring. Ekskludering af ild skulle forebygge temperaturstigning og nedbrydning.  <b>Sted:</b> USA  <b>Lagringstid:</b> 185 dag. Ca. 6 mdr.  <b>Type:</b> Flis. Pulpwood chips  <b>Træart:</b> Bævreasp  <b>Behandling:</b> Lagret indendørs, temperatur omkring 22 °C. Lufttæt lagring. En stak pakket ind i polyethylen film og en stak pakket ind i polyuretan skum.  <b>HxLxB/volumen:</b> 1,2 m høj, 3,5 m bred, 3,5 m lang.</p>
43	<p>Jirjis, R. (2001) Forest residue – Effect of handling and storage on fuel quality and working environment. <i>FRI Bulletin, vol. 223, 136-145</i></p> <p>Beskriver problemer i forbindelse med forskellige metoder for lagring af hugstaffald, og diskuterer effekten af lagring og håndtering af hugstaffaldet på brændselskvaliteten og arbejdsmiljøet.</p>
44	<p>Suchomel, J. et al. (2014) Analysis of fungi in wood chip storage piles. <i>BioResources 9(3), 4410-4420</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Formålet med forsøget er at identificere arter af sundhedsskadelige svampe, som dannes i en flisstak under langvarig lagring.  <b>Sted:</b> I Slovakiet nær byen Zvolen  <b>Lagringstid:</b> Ca. 9 mdr. Fra 13. dec. 2011 til 30. aug. 2012.  <b>Type:</b> Frisk flis  <b>Træart:</b> Almindelig bøg (<i>Fagus sylvatica</i>), Bævre-asp (<i>Populus tremula</i>) og rødgran (<i>Picea abies</i>)  <b>Behandling:</b> Udendørs udækket. Tre stakke – en af hver træart. Vandindhold og temperatur blev målt i tre højder; 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m over jordoverfladen.  <b>HxLxB/volumen:</b> 4 m bred og 4 m lang.</p>
45	<p>NORDTEST(2008) NT METHOD - Guidelines for storing and handling of solid biofuels. <i>NORDTEST a Nordic Innovation Centre brand, NT ENVIR 010</i></p> <p>Guidelines for lagring og håndtering af biobrændsel, i form af heltræ, stammer, hugstaffald, træflis, træpiller og savsmuld.</p>
46	<p>Lin, Y., Pan, F (2015) Monitoring woody Biomass Chips Quality during field storing in Michigan, <i>Forest Products Journal, vol. 65(7), 327-336</i></p>

	<p><b>Sted:</b> Michigan  <b>Lagringstid:</b> 4 mdr.  <b>Type:</b> Flis  <b>Træart:</b> Site 1) Banks fyr (<i>pinus banksiana</i>), Site 2) beg-fyr (<i>Pinus Rigida</i>) og Site 3) europæisk lærk (<i>Larix decidua</i>)  <b>Behandling:</b> Tre stakke flis blev lagret på tre forskellige steder. Site 1) i Escabanaba, Site 2) i East Lansing og Site 3) i Augusta.  <b>HxLxB/volumen:</b> Site 1) 4,6 m lang og 2,1 m høj. 33,14 green tons. Site 2) 3,7 m lang og 1,8 m høj. 25,87 green tons. Site 3) 3 m lang og 1,8 m høj. 20 green tons.</p>
47	<p>Fuller, W. S. (1985) Chip pile storage – a review of practices to avoid deterioration and economic loses, <i>Tappi Journal</i>, vol. 68(8), 48-52</p> <p>En sammenfatning af tidligere litteratur i en række anvisninger for lagring af flis.</p>
48	<p>Rupar, K., Santani, M. (2003) The release of organic compounds during biomass drying depends upon the feedstock and/or altering drying heating medium, <i>Biomass and bioenergy</i> 25, 615-622</p> <p>Studie af organiske forbindelser der frigøres under tørring af biomasse som en funktion af tørringsparametre, kilden til råmaterialet og effekten af den lokalitet hvorpå biomassen er dyrket.  Tørring ved 140 °C, 170 °C og 200 °C undersøges. Med henblik på at undersøge frigivelsen af organiske forbindelser ved tørring af biomasse i forbindelse med produktion af tørt brændsel som træpiller.</p> <p><b>Træart og sted:</b> Grønne og tørrede flisprøver af skovfyr (<i>Pinus sylvestris</i>) og rødgran (<i>Picea abies</i>) fra Nordsverige. Grønne flisprøver af gran fra Sydsverige.</p>
49	<p>Bedane, A. H. et al. (2011) Simulation of temperature and moisture changes during storage of woody biomass owing to weather variability, <i>Biomass and bioenergy</i> 35, 3147-3151</p> <p><b>Undersøger:</b> Vandindhold- og temperaturprofiler i stakke af træbiomasse ud fra en todimensionel matematisk model.  Der blev brugt eksperimentelle data fra et feltforsøg med træflis og bundles (Ref. 1 på denne liste).  <b>Sted:</b> Det østlige Canada  <b>Lagringstid:</b> Et år  <b>Type:</b> Flis, bundles og loose slash piles.  <b>Træart:</b> Hvid birk <i>Betula papyrifera</i>  <b>Behandling:</b> Flisdynger lagret tildækket og utildækket  Tre kegleformede stakke af flis.  1) Overdækket på skovbund.  2) Ikke-overdækket på skovbund.  3) Ikke-overdækket på plastikunderlag.  <b>HxLxB/volumen:</b> højde på 3 meter</p>

	<p>En matematisk model for varme og vandoverførsel under tørringsprocessen af biomasse. Simuleret ved hjælp af MATLAB programmering. Simuleringen blev udført ud fra målte klimaforhold under lagringsperioden og konstante lufttørrings forhold.</p>
50	<p>Wu, M. R. et al. (2011) Physical properties of solid biomass. <i>Biomass and bioenergy</i> 35, 2093-2105</p> <p>Artiklen præsenterer forskellige fysiske egenskaber for tre typer biomasse brændsel: Træpiller, træflis og "torref.ied" pellets.  <b>Sted:</b> Frisk flis fra Holland  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Tre forskellige størrelser (0-20 mm, 0-40 mm og 0-100 mm).</p>
51	<p>Jenkins, B. M. et al. (1998) Combustion properties of biomass. <i>Fuel Processing Technology</i> 54, 17-46</p> <p>Egenskaber for biomasse som kan bruges til forbrænding gennemgås. Tabel over standart metoder for analyse af biobrændsel s. 20.  Tabel 2. Kemisk komposition, brændværdi og alkaliindeks for udvalgte brændsler. "Biomass power plant fuel blend" på s. 24.</p>
52	<p>Mendel, T. et al. (2016) Fuel quality changes during the storage of chips in large piles. <i>PowerPoint, 24'th European Biomass Conference, June 7'th 2016</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Overvåge og sammenligne tørstof-tab, tørringsprocessen og ændringer i brændselskvalitet for forskellige typer flis og lagringsperioder. Sammenligning af lagringsmetoder.  <b>Sted:</b> Tyskland, Bayern  <b>Lagringstid:</b> 5 måneder  <b>Type:</b> To typer flis: FRC = Flis fra hugstaffald. ERC = Flis fra energirundtræ.  <b>Træart:</b> Ukendt  <b>Behandling:</b> To lagringsperioder: vinter 2014/15 og sommer 2015. Overdækket og ikke overdækket.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vinter <ul style="list-style-type: none"> <li>• FR, ikke overdækket</li> <li>• FR, overdækket</li> <li>• ER, ikke overdækket</li> <li>• ER, overdækket</li> </ul> </li> <li>- Sommer <ul style="list-style-type: none"> <li>• FR, ikke overdækket</li> <li>• FR, overdækket</li> <li>• ER, ikke overdækket</li> <li>• ER, overdækket</li> </ul> </li> </ul> <p><b>HxLxB/volumen:</b> 3 m høj, 21 m lang og 6 m bred  <b>Flisens komponenter:</b>  <b>Fraktionsstørrelse:</b> Følger ISO 17225-4 standarder:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vinter FR: P31</li> <li>- Sommer FR: P31</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vinter ER: P16</li> <li>- Sommer ER: P31S</li> </ul>
53	<p>Bergman, Ö., Nilsson, T. (1974) Studies of wood deterioration in outside storage of a commercial pine chip pile. <i>Department of forest products, nr. R 93</i></p> <p><b>Undersøger:</b> Med papirindustrien i fokus. Temperatur, ilt, svind, gasemission. Indbygger netposer</p> <p><b>Sted:</b> Sydsverige</p> <p><b>Træarter:</b> skovfyr og rødgran</p>
54	<p>Bergman, Ö., Nilsson, T. (1978) Methods of controlling deterioration of wood chips in outdoor storage. <i>SLU, Rapport nr. U79</i></p> <p>Undersøger egenskaberne af flis ifht. papirindustrien. Behandler flis med base.</p>
55	<p>Træ til energiformål. (1999) Videncenter for halm- og flisfyring. s71. ill.</p> <p>Generelle forhold om flis bl.a. beregning af nedre brændværdi.</p>

## Bilag 3, Litteraturliste

### Flis, lagring, selvopvarmning, energitab

#### Artikler

Afzal, M. T., Bedane, A. H., Sokhansanj, S., & Mahmood, W. (2010). Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. *BioResources*, 5(1), 55–69.

Alakoski, E., Jämsén, M., Agar, D., Tampio, E., & Wihersaari, M. (2016). From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass - A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 376–383. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.021>

Barontini, M., Scarfone, A., Spinelli, R., Gallucci, F., Santangelo, E., Acampora, A., ... Pari, L. (2014). Storage dynamics and fuel quality of poplar chips. *Biomass and Bioenergy*, 62, 17–25. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.022>

Bedane, A. H. et al. (2011) Simulation of temperature and moisture changes during storage of woody biomass owing to weather variability, *Biomass and bioenergy* 35, 3147-3151

Blomqvist, P., Persson, B. (2003). Spontaneous Ignition of Biofuels – A Literature Survey of Theoretical and Experimental Methods. *SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP Arbetsrapport*, 18.

Eriksson, L., & Gustavsson, L. (2010). Comparative analysis of wood chips and bundles - Costs, carbon dioxide emissions, dry-matter losses and allergic reactions. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 82–90. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.10.002>

Feist, W. C. et. Al. (1971) Encasing wood chip piles in plastic membranes to control chip deterioration. *Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, Vol. 54, No. 7, 1140-1142

Ferrero, F., Lohrer, C., Schmidt, B. M., Noll, M., & Malow, M. (2009). A mathematical model to predict the heating-up of large-scale wood piles. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4), 439–448. <http://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.009>

Fuller, W. S. (1985) Chip pile storage – a review of practices to avoid deterioration and economic losses, *Tappi Journal*, vol. 68(8), 48-52

Gejdoš, M., Lieskovský, M., Slančík, M., Němec, M., & Danihelová, Z. (2015). Storage and Fuel Quality of Coniferous Wood Chips. *BioResources*, 10(3), 5544–5553.

He, X., Lau, A. K., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, X. T., & Melin, S. (2014). Investigating gas emissions and dry matter loss from stored biomass residues. *Fuel* 134, 159–

165. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.061>

He, X., Lau, A. K., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, X. T., & Melin, S. (2015). Quantification of gas emissions from stored softwood chips as solid biofuels. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1549–1558. <http://doi.org/10.1007/s13762-014-0541-z>

Jenkins, B. M. et al. (1998) Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54, 17-46

Jirjis, R. (2001) Forest residue – Effect of handling and storage on fuel quality and working environment. *FRI Bulletin*, vol. 223, 136-145

Jirjis, R. (1995). Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*, 9(1-5), 181–190. [http://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00090-9](http://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00090-9)

Jirjis, R., Bjurman, J. (1995). Inaccuracy in the Determination of Dry Matter Losses in Logging Residues. *Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Forest Products*. (In prep.)

Kofman, P. D. (1998). Er flis brandfarlig? *Park- og landskabsserien*, 12.0-5.

Kofman, P. D., Thomsen, I. M. (1998) Lufttæt lagring af energiflis. *Skovbrug Videnblade*, 7.2-5.

Kofman, P. D. (1993). Lagring af flis, chunk og brænde fra heltræer. *Skovbrug Videnblade*, 7,2-1.

Krigstin, S., & Wetzel, S. (2016). A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. *Fuel* 175, 75–86. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.014>

Lethtikangas, P. (1999) Lagringshandbok för trädbränslen. *Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala, Lagringshandbok för trädbränslen, 2:a upplagan*.

Li, X. R., Koseki, H., & Momota, M. (2006). Evaluation of danger from fermentation-induced spontaneous ignition of wood chips. *Journal of Hazardous Materials*, 135(1-3), 15–20. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.11.034>

Lin, Y., Pan, F (2015) Monitoring woody Biomass Chips Quality during field storing in Michigan, *Forest Products Journal*, vol. 65(7), 327-336

Noll, M., & Jirjis, R. (2012). Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 95(3), 551–563. <http://doi.org/10.1007/s00253-012-4164-3>

Petersen, R. S. (2009) Selvantændelse i oplagret biomasse – En erfaringsindsamling. *Danmarks Tekniske universitet. Institut for Byggeri og Anlæg. Afgangprojekt*.

- Rupar, K., Santani, M. (2003) The release of organic compounds during biomass drying depends upon the feedstock and/or altering drying heating medium, *Biomass and bioenergy* 25, 615-622
- Rupar-Gadd, K. (2006) Biomass Pre-treatment for the Production of Sustainable Energy – Emission and Self-ignition. *Bioenergy Technology, Acta Wexionensia*, 88.
- Scholz, V., Idler, C., Daries, W., & Potsdam, J. E. (2005). Storage of Chipped Field Wood Losses and Mould Fungi Infestation. *Landtechnik*, 4, 210–211.
- Suchomel, J. et al. (2014) Analysis of fungi in wood chip storage piles. *BioResources* 9(3), 4410-4420
- Thörnqvist, T. (1985). Drying and Storage of Forest Residues for Energy Production. *Biomass*, 7, 444-453.
- Whittaker, C., Yates, N. E., Powers, S. J., Misselbrook, T., Shield, I. (2016) Dry Matter Losses and Greenhouse Gas Emissions From Outside Storage of Short Rotation Coppice Willow Chip. *BioEnergy Research*, 9, 288-302
- Whittaker, C., Macalpine, W., Yates, N. E., Shield, I. (2016) Dry Matter Losses and Methane Emissions During Wood Chip Storage: the Impact on Full Life Cycle Greenhouse Gas Savings of Short Rotation Coppice Willow for Heat. *BioEnergy Research*. 1-16
- Wihersaari, M. (2005). Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. *Biomass and Bioenergy*, 28(5), 444–453.  
<http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.011>
- Wu, M. R. et al. (2011) Physical properties of solid biomass. *Biomass and bioenergy* 35, 2093-2105

## Rapporter

- Baadsgaard-Jensen, J. (1988) Storage and energy economy of chunk and chip piles. *Danish institute of forest technology*.
- Bergman, Ö., Nilsson, T. (1978) Methods of controlling deterioration of wood chips in outdoor storage. *SLU, Rapport nr. U79*
- Bjørklund, L. og Frederikson, H. (1984) Lagring av komprimerade hyggesrester och komprimerat røjningsvirke. *SLU. Rapport 143*.
- Eriksson, A. (2011) Energy efficient storage of biomass at Vattenfall heat and powerplants. *SLU. Examensarbete 2011:05*
- Frederikson, H. (1985) Lagring af skogbrændsle vid mindre forbrænningsanlægninger. *SLU. Uplag 159*

Garstang, J., Weeks, A., Poulter, R. and Barlett, D. (2002) Identification and characterization of factors affecting losses in the large-scale, non-ventilated bulk storage of woodchips and development of best storage practices. *First Renewables Ltd*

Gislerud, O. and Heding, N. (1984) Storing, drying and internal handling of wood fuels. *Danish Institute of Forest Technology*

Hansen, E. B. (1995). Forsyningskæder for træ. *Skovbrugsserien nr. 14-1995 Forskningscentret for Skov & Landskab, Hørsholm 87 s., ill.*

Kofod, E.O. (1983) Biologiske og kemiske processer i brændsels-flislagre. *Skovteknisk Institut. Rapport 8-1983*

Løvegren, G. och Jonsson, L. (1987) Storing of chipped logging residues and chipped oak stemwood in big piles. *SLU. Rapport 191*

Nellist, M.E. (1997) Notes on procedures used in conducting drying and storage trials with short rotation forestry. *Aberdeen University. Paper 1997:2*

Nilsson, t. (1987) Jämförande lagringsstudie av småved och brændselsflis. *SLU. Rapport 192*

NORDTEST(2008) NT METHOD - Guidelines for storing and handling of solid biofuels. *NORDTEST a Nordic Innovation Centre brand, NT ENVIR 010*

Thörnqvist, T., Jirjis, R. (1990) Bränsleflisens förändring över tiden – vi lagring i stora stackar. *SLU. Rapport 219*

Thörnqvist, T. (1985) Storskalig säsongslagring av biobrændsel. *SLU. Rapport 154*

Thörnqvist, T. (1983) Bränsleflisningens förändring under ett års lagring. *SLU. Rapport 148*

Thörnqvist, T. (1983) Lagring af sønderdelade hyggesrester. *SLU. Rapport 137*

Thörnqvist, T. (1982) Betydelse av tak och luftigt underlag vid lagring av bränsleflis. *SLU. Rapport 127*

---

## Foredrag

Mendel, T. et al. (2016) Fuel quality changes during the storage of chips in large piles. *PowerPoint, 24'th European Biomass Conference, June 7'th 2016*



KØBENHAVNS UNIVERSITET

INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB  
OG NATURFORVALTNING

ROLIGHEDSVEJ 23  
1958 FREDERIKSBERG

TLF. 35 33 15 00  
IGN@IGN.KU.DK  
WWW.IGN.KU.DK