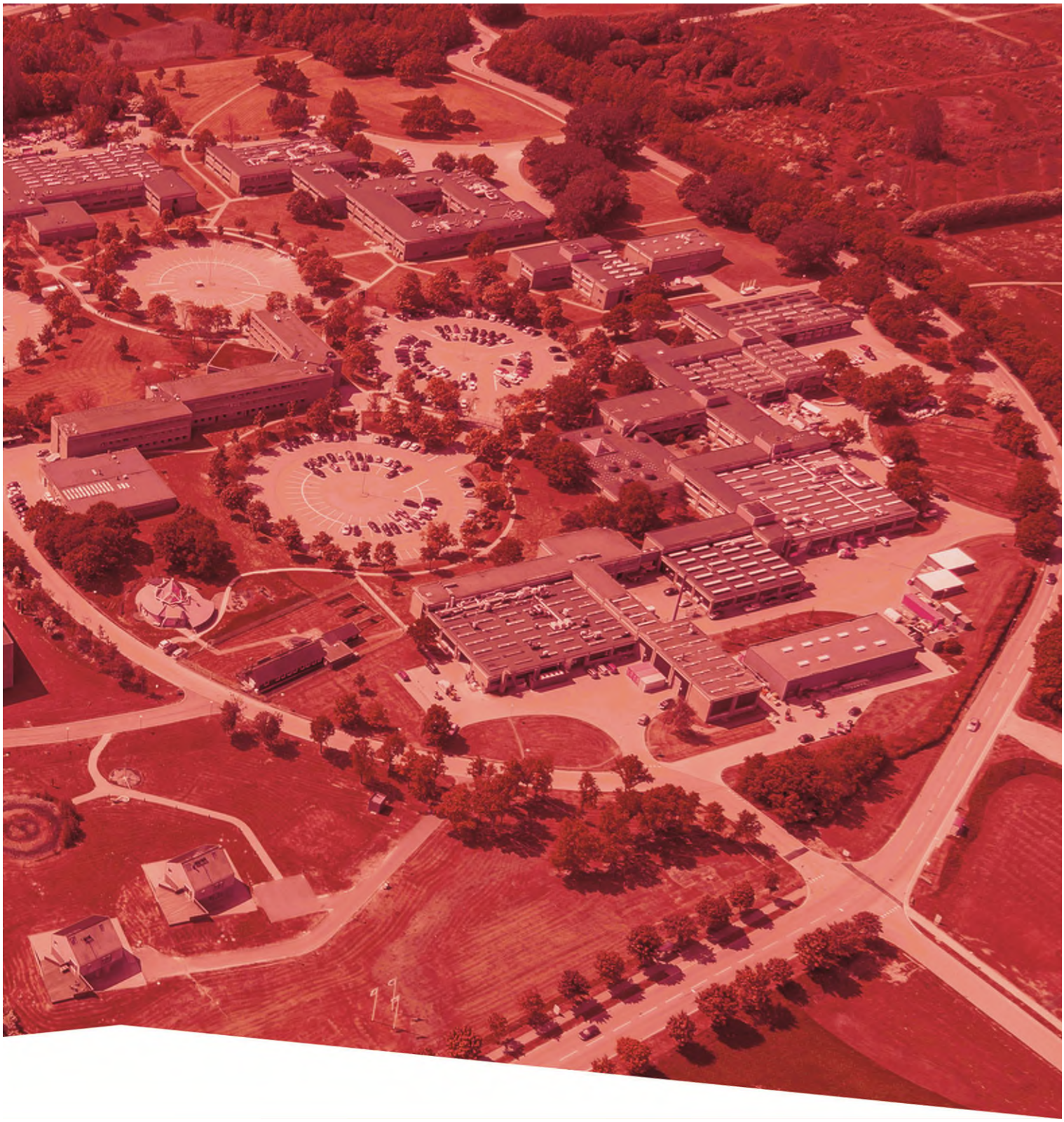


SOFT: Sporbar online fugt-måling i træflis

M6: Notat om on-site proof-of-concept målekam-pagne (v2)

TEKNOLOGISK INSTITUT

TEKNOLOGISK
INSTITUT

SOFT: Sporbar online fugtmåling i træflis

M6: Notat om on-site proof-of-concept målekampagne (v2)

Udført af
Teknologisk Institut
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Energi og Klima

September 2020
Forfatter: Henrik Kjeldsen m.fl.

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Resumé

I denne rapport har vi afprøvet forskellige former for fugtmåleudstyr til træflis. Rapporten er udarbejdet i projektet SOFT – Sporbar Online Fugtmåling i Træflis – som er støttet af EUDP. Fugtmåleudstyr kan foretage hurtige online målinger, der gør det muligt at optimere både styringen af kedler og modtagekontrol.

Det undersøgte udstyr har været baseret på forskellige principper og inkluderer NIR (infrarød stråling), MW-udstyr (mikrobølger) og fugttransducer (rf-bølger) samt forskellige hjælpesystemer til densitets-/vejemåling og miljødata (temperatur). NIR- og MW-udstyret har været placeret på et transportbånd, fugttransduceren ved siden af samme transportbånd, og desuden har separat NIR-udstyr være anvendt i et særligt setup til modtagekontrol.

Ud fra projektets undersøgelser er der gjort en række vigtige erfaringer, som beskrives kort i det følgende:

1: Online målinger har tydeligvis et potentiale, og således kan alt det afprøvede udstyr anvendes til at måle fugt i træflis på transportbånd.

2: For måling på transportbånd udmærkede NIR-udstyret sig i projektets data som det mest præcise, efterfulgt af fugttransduceren og MW-udstyret. Det skal dog nævnes, at der var relativt få datapunkter med fugttransduceren, hvilket gør projektets resultat mindre sikkert for dette udstyr (sammenlignet med MW-udstyret). Præcisionen (dvs. repeterbarheden) af NIR-udstyret er i testen ca. 1,8 procentpoint, mens det tilsvarende tal for MW-udstyret er 2,8 procentpoint.

3: Hvis to typer udstyr (f.eks. NIR og MW) kombineres, kan man opnå en bedre præcision. Desuden vil pålideligheden være større. Hjælpemålinger af miljødata (specielt temperatur) kan i visse tilfælde også anvendes til at forbedre målepræcisionen. Forbedringerne er dog begrænsede og skal vurderes i forhold til de højere omkostninger til indkøb og drift af to typer udstyr.

4: Fugtmålinger foretaget med NIR i forbindelse med modtagekontrol var karakteriseret af en større spredning end målinger på/ved transportbånd og opnåede dermed umiddelbart en væsentligt dårligere præcision. (Usikkerheden på prøveudtagning er ikke undersøgt i denne rapport, men betragtes kort i konklusionen.)

TEKNOLOGISK
INSTITUT

5: Referencemålinger, metoden for referencemålinger, kontrolmålinger og uddannelse er alle essentielle for at gøre fugtmåleudstyr retvisende. Der gælder bl.a. følgende:

- Det skal være muligt at udtage referenceprøver på den samme del – eller en helt tilsvarende del – af den træflis, som udstyret måler på.

- Der skal udarbejdes en procedure til at sikre kvaliteten af referencemålingerne.

- Referencemålinger skal deles jævnt ud over fugtmåleområdet, og det nytter ikke, at alle målingerne ligger midt i måleområdet. Det vil derfor typisk være en betydelig fordel at foretage referencemålingerne med specielt forberedte flisprøver.

I en separat rapport (M4: "SOFT - Reference Method") er der arbejdet med den metrologiske sporbarhed for referencefugtmålinger. Der er udviklet en metode til sporbar måling af materialefugt i bl.a. træflis. I kombination med arbejdet i denne rapport er vejen nu banet for sporbar online fugtmåling i træflis (SOFT).

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Indholdsfortegnelse

Resumé 3

1. Indledning 6

2. Anvendte metrologiske begreber 7

3. Hvordan er in-line målesystemet opbygget? 9

4. Referencemålinger 11

5. Måledata og analyse 12

   5.1. Fugtmåling med NIR 13

   5.2. Fugtmåling med MW 15

   5.3. Fugtmåling med NIR + MW 17

   5.4. Fugtmåling med transducer 18

   5.5. Effekt af supplerende målinger 20

6. Historiske målinger (MW) 22

7. Offline målinger med NIR 23

8. Konklusion 25

TEKNOLOGISK
INSTITUT

1. Indledning

Træflis er et vigtigt brændsel for danske kraftvarmeværker. Flis er et meget heterogent materiale, der er kendetegnet ved et meget varierende, men generelt højt, vandindhold. Hurtig online måling af fugt i træflis kan f.eks. betyde, at fugten måles umiddelbart inden, den brændes af i kedlen i kraftvarmeværker. Den slags målinger er af stor betydning. Målingerne gør det muligt at optimere styringen af kedler og kan desuden bruges til at diagnosticere forbrændingen og/eller værket. Et andet aspekt ved fugtmåling er modtagekontrol, fordi brændværdien – og dermed flisens værdi – er stærkt afhængig af vandindholdet.

Det har tidligere vist sig, at der er betydelige udfordringer forbundet med at opnå præcise data fra online målemetoder. Det skyldes i høj grad heterogeniteten af flisen, der bl.a. gør det vanskeligt at etablere en kalibreringskurve for måleudstyret, som dækker alle de relevante materialetyper.

Måleudstyr til fugtmåling kan betegnes enten in-line, at-line eller offline afhængigt af placering og funktion.

1) In-line måleudstyr måler på flisen under dens vej gennem værket og kan f.eks. placeres på et transportbånd før indfyring. En fordel ved placeringen er, at den giver udstyret mulighed for at måle på en meget stor del af flisen.

2) At-line måleudstyr placeres lige ved siden af flisens transportvej gennem værket således, at flisprøver (automatisk) kan udtages med jævne mellemrum og fugtindholdet måles. Med den rette placering, f.eks. ved faldende strøm eller ved siden af et transportbånd, er det relativt simpelt at udtage repræsentative prøver af flisen, og dermed bliver udstyrets funktion i praksis nærmest svarende til in-line måleudstyr.

3) Hvis prøveudtagningen foretages i en separat proces, tales der om offline målinger. Udstyrets rolle minder i dette tilfælde om den traditionelle tørre-vejemetode, men har den fordel, at det kan levere hurtigere resultater (og dermed i praksis ofte flere).

Både in-line, at-line og offline fugtmåleudstyr kan være "online" forstået på den måde, at det kan levere hurtige resultater, f.eks. via en internetforbindelse.

I denne rapport beskrives en målekampagne foretaget på Verdos værk i Randers, hvor den største del af de viste data er opnået i fyringssæsonen 2019–2020. Formålet med kampagnen er at etablere et nøjagtigt målesystem, der overvåger fugtindholdet af træflisen umiddelbart inden, den bliver ført ind i kedlerne. Der er tale om måleudstyr i kategorierne in-line og at-line. Under projektet er allerede eksisterende udstyr afprøvet ved siden af nyt udstyr. Alt udstyret er installeret på/ved transportbåndet mellem døgnsilo og kedler. Kombineringen af forskellige typer udstyr er motiveret af følgende: For det første at afprøve de forskellige typer udstyr og karakteriserer de ulemper, som de har hver især. For det andet

at undersøge mulighederne for opnå forbedret nøjagtighed gennem en kombination af flere forskellige målesystemer.

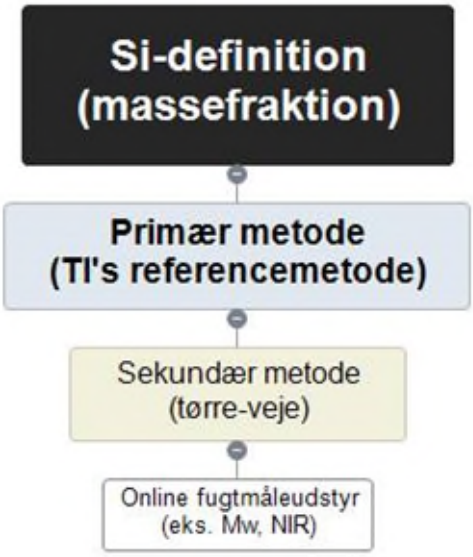
Planen har været at designe systemet og forbedre kalibreringsmetoden til den første test i fyringssæsonen 2018–2019. Derefter blev udstyret optimeret til fyringssæsonen 2019–2020. Systemet kan dermed tjene som "proof of concept" og derefter anvendes som model for systemer, der helt generelt kan installeres på andre flisfyrede værker.

Ud over målingerne på Verdo er der foretage to serier af målinger på Aabybro Fjernvarme. Det drejer sig om måleudstyr, som er placeret offline i forbindelse med modtagekontrol. Måleserierne vises sidst i denne rapport.

Rapporten er udarbejdet som en del af projektet SOFT (sporbar online fugtmåling i træflis). Projektet er støttet af Energistyrelsens EUDP-program. Rapporten er en opdatering af notatet M6: "Notat om on-site proof-of-concept målekampagnen" og benævnes "M6: Notat om on-site proof-of-concept målekampagne (v2)".

2. Anvendte metrologiske begreber

Det er relevant kort at redegøre for nogle metrologiske begreber. Det første er sporbarhed. Med sporbarhed menes, at en måling kan føres tilbage den relevante SI-enheds definition. I Figur 1 er det vist, hvordan den metrologiske sporbarhedskæde kunne se ud for måling af materialefugt i træflis med online måleudstyr. SI-definitionen for materialefugt er massefraktion, dvs. kg vand per kg materiale. Den primære metode i Figur 1 (f.eks. Teknologisk Instituts referencemetode for materialefugt) måler materialefugt direkte i en særligt udviklet måleopstilling. Ved at sammenligne målinger udført med tørre-vejemetoden og med målinger foretage med en primær metode er det i princippet muligt at gøre tørre-vejemetoden (næste trin i Figur 1) sporbar under visse omstændigheder, se "kalibrering". Hvis tørre-vejemetoden er gjort sporbar, er det også muligt at kalibrere det installerede online fugtmåleudstyr.



Figur 1. Metrologisk sporbarhedskæde for materialefugt i træflis.

Anvendelsen af Teknologiske Instituts referencemetode for materialefugt på træflis er beskrevet i "M4: SOFT – Reference Method".

I nær forbindelse til ovenstående er de to begreber kalibrering og justering. Når måleudstyr kalibreres,

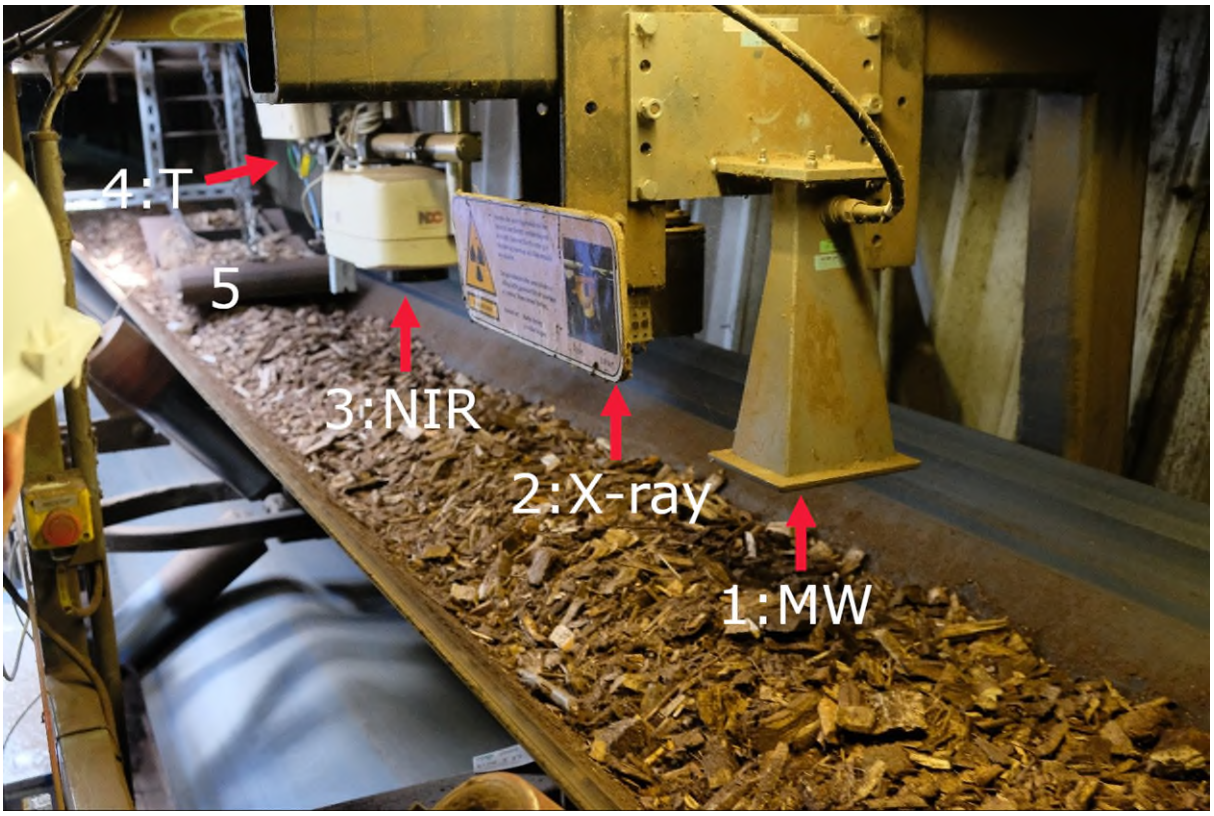
sammenlignes dets visning med værdien af en tilsvarende referencemåling. Det er et krav, at referencen er sporbar. I denne rapport sammenlignes fugtmåleudstyrets visninger med målinger foretaget med tørre-vejemetoden. Tørre-vejemetoden er her ikke sammenlignet med referencemetoden og er således ikke sporbar. Det er derfor ikke muligt at foretage en egentlig kalibrering af fugtmåleudstyret. Der er derimod muligt at laver en justering. Justeringen indebærer, at udstyrets visning korrigeres på en sådan måde, at der er bedst mulig overensstemmelse med tørre-vejemålingerne.

Præcision og nøjagtighed er to andre metrologiske begreber, som let kan forveksles. Præcision er et udtryk for, i hvilken grad en måling kan reproduceres med omtrent samme resultat. En lille spredning på tallene i en måleserie svarer til høj præcision (også kaldet god/stor præcision). Nøjagtigheden udtrykker resultatets overensstemmelse med den søgte størrelse.

3. Hvordan er in-line målesystemet opbygget?

For at opnå den ønskede funktionalitet er det testede målesystem på Verdos værk i Randers placeret ved det transportbånd, som transporterer træflisen fra lageret (i dette tilfælde: den såkaldte døgnsilo) til kedlerne. Dette er vist nedenfor i Figur 2. På fotoet ses transportbåndet og måleudstyret: Forest ses mikrobølgemåler efterfulgt af densitetsmåler (til måling af fladedensitet), infrarød måler og termosensorer.

Det samlede målesystemet er som nævnt baseret på flere forskellige måleinstrumenter og -principper. Der er to stærke argumenter for at anvende denne metode. For det første er det som nævnt sandsynligt, at kombinationen af flere målesystemer kan føre til større præcision og bedre pålidelighed. For det andet giver det mulighed for at sammenligne performance af de forskellige måleinstrumenter og -principper. Begge mål understøttes ved at tilføje en række hjælpemålesystemer, som f.eks. temperatur (hhv. luft og flis) og video (RGB-analyse).



Figur 2. Måleudstyr installeret på transportbånd mellem døgnsilo og kedler på Verdos værk i Randers. Fra højre mod venstre ses 1) øverste del af MW-udstyret, 2) tilhørende røntgenudstyr til fladedensitetsmåling, 3) NIR-udstyr og 4) udstyr til temperaturmåling m.m. Desuden ses 5) en plade til udjævning af flisen på tværs af båndet. Båndet bevæger sig fra venstre mod højre.

Målesystemet består af følgende hovedkomponenter af relevans for bestemmelse af fugtindholdet:

1. Måling med mikrobølger (MW = Micro Wave). I det konkrete tilfælde anvendes mikrobølger med en frekvens i området 2,8 – 3,2 GHz. En mikrobølgesender og -modtager placeres henholdsvis ovenover og nedenunder transportbåndet. Mikrobølgernes fase og intensitet påvirkes af vandet i flisen, og derigennem er det muligt at bestemme vandindholdet. Målingerne er penetrerende, fordi mikrobølgerne sendes tværs gennem flisen. Hvis fladedensiteten (somme tider kaldet fladevægten, dvs. vægt per areal; måles typisk i kg/m^2) er varierende, er det er nødvendigt at korrigere målingerne for denne. Fladedensiteten måles i dette tilfælde med røntgenstråling, men data fra den indbyggede båndvægt kunne i princippet også have været anvendt.

2. Måling med infrarød stråling (NIR = Near InfraRed). Der er en sammenhæng mellem vandindholdet og træflisens reflektivitet af infrarød stråling. Måleteknikken er hovedsageligt begrænset til overfladelaget (1 – 3 mm).

3. Fugttransducer. Måleprincippet er i familie med mikrobølgemålingerne beskrevet ovenfor. Der måles impedans, hvilket svarer til dæmpning og faseskift. Der er dog nogle afgørende forskelle. For det første anvendes der bølger med lavere frekvens i HF-området (27 MHz; HF = High Frequency). For det andet er sender og modtage samlet, så målingen er ikke dybt penetrerende – dog måles dybere end med infrarød stråling. Endeligt er målingerne suppleret med en densitetsmåling, som er baseret på en vejning.

Ud over hovedkomponenterne er der installeret en række hjælpemålesystemer, som skal hjælpe til med at sikre robustheden af målingerne, og dermed tilsikre et godt resultat. Disse inkluderer:

1. Densitet. Det er nødvendigt at kende træflisens fladedensitet (enhed: kg/m^2) for at kunne korrigere resultaterne fra mikrobølgemålingen for lasthøjden. Som nævnt ovenfor kan der i princippet også anvendes data fra en båndvægt.

2. Overfladetemperatur. Træflisens overfladetemperatur måles med en IR-sensor.

3. Lufttemperatur.

In-line målesystemet bestående af mikrobølgesensor, NIR-sensor m.v. optager et datapunkt hvert sekund i døgnets 24 timer. Der udtages sammenligningsprøver til tørre-veje én gang i døgnet mandag – torsdag, dvs. fire gange per uge.

TEKNOLOGISK
INSTITUT

4. Referencemålinger

Det er essentielt, at der tages højde for justeringsprocessen af online måleudstyr, både under installation og drift. Hvis der ikke foretages egentlige referencemålinger, er der intet håb om at gøre fugtmålingsudstyret nøjagtigt (retvisende ift. tørre-veje). Kravene er således 1) at placeringen er egnet, og 2) at der er fagligt forsvarlige procedurer for referencemålingerne og justeringsprocessen. Se i øvrigt notatet "M5: Guideline om on-line fugtmåling på flisfyrede værker (v2)", som er udfærdiget i forbindelse med dette projekt.

Figur 3. Prøveudtagning til kalibrering af in-line måleudstyr. Skeen til højre bruges til at udtage prøverne på tværs af båndet. Prøvematerialet blandes herefter i tønden, inden tre fraktioner udtages til tørre-vejeprøver. Se tekst.

In-line udstyr til fugtmåling kan installeres/placeres på forskellige måder, men det er under alle omstændigheder vigtigt, at følgende krav er opfyldt:

1) Udstyreret skal måle på en repræsentativ del af træflisen. Derfor er det oplagt enten at installere udstyret på et transportbånd eller i forbindelse med en faldende strøm.
2) Det skal være muligt at udtage prøver til kalibrering på en sådan måde, at sammensætningen af disse prøver afspejler det, in-line målesystemet måler på.

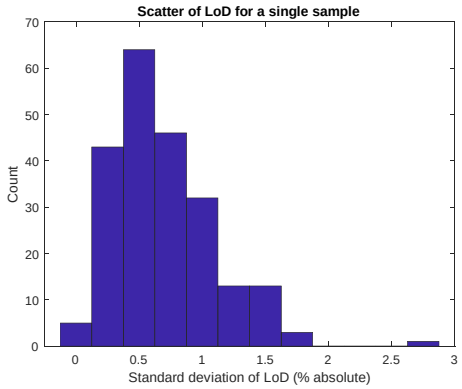
Overstående skal sikre, at prøver til kalibrering er repræsentative i forhold til in-line målingerne. Under driften er der ydermere krav til kalibreringsprocessen:

3) Procedurer skal udarbejdes for at sikre, at prøver til referencemålinger udtages og behandles på fagligt forsvarlig vis. Det skal sikres, at procedurerne følges.

4) Prøverne til kalibrering skal være jævnt fordelt over hele måleområdet. Det er særligt vigtigt, at der er tilstrækkeligt med prøver nær minimalt og maksimalt fugtindhold.

Udstyret, der er anvendt i dette projekt, er som nævnt placeret på det målebånd, som fører flisen fra døgnsilo til kedler. Krav nr. 1 er dermed opfyldt. Krav nr. 2 er også opfyldt, fordi det er muligt at tage snit på tværs af båndet, se Figur 3. Da det er udfordrende at foretage referencemålinger på eksakt den samme prøve som in-line udstyret har målt på, udtages i stedet prøver fra båndet i et veldefineret

tidsinterval (én prøve for hver 30 sekunder i 3 minutter), over hvilket der også måles in-line (gennemsnit over 3 minutter). Det sikres, at prøveudtagning er repræsentativ ved at udtage snit på tværs af båndet og efterfølgende blande det opsamlede materiale grundigt; herfra udtages der tre prøver til tørre-veje. Spredningen mellem de tre tørre-vejemålinger, der foretages i forbindelse med hver kalibreringsmåling, giver en idé om deres kvalitet. Den gennemsnitlige spredning er 0,7 procentpoint[1], se Figur 4.



Figur 4. Spredning (standardafvigelsen) for de tre tørre-vejeprøver udført for hver af de 220 kalibreringsmålinger på Verdo i 2018-2020.

For at sikre, at krav nr. 3 er opfyldt, er det bl.a. en bestemt (trænet) medarbejder, som udtager prøven og foretager tørre-vejemålingerne. Der foretages typisk prøveudtagning og tilhørende tørre-vejemålinger fire gange om ugen.

Krav nr. 4 er ikke opfyldt med den anvendte opstilling. Der sker en betydelig opblanding af træflisen i døgnsiloen, og de fleste referenceflisprøver har derfor været nær "gennemsnitsfugtigheden". Til fremtidige justeringer/kalibreringer foreslås en alternative procedure: I stedet for at måle på den flis, som tilfældigvis kommer forbi udstyret, anvendes specielt forberedte referenceprøver. På denne måde sikres en jævn fordeling af referenceprøver over hele fugtmåleområdet. Proceduren er dog forbundet med nogle praktiske udfordringer, fordi det er nødvendigt at afbryde flistilførslen til kedlerne i en periode. Dermed påvirkes værkets drift. En mulig løsning kunne være at udføre målingerne i forbindelse med en planlagt nedlukning.

5. Måledata og analyse

Data fra MW-, NIR- og temperaturmålinger er som nævnt ovenfor registreret for hvert sekund. Den store mængde data er derefter sorteret for at opnå tidslige sammentræf med tørre-vejemålingerne.

I projektets 12 måneder lange målekampagne er der foretages 122 referencemålinger med tørre-vejemetoden. Disse kan sammenkoblet med 79 mikrobølgemålinger, 84 NIR-målinger og 53 målinger med fugttransducer.

Endelig er der foretaget 110 sammenhørende tørre-veje- og NIR-målinger med en anden metode ved Aabybro Fjernvarmeværk; sidstnævnte betragtes isoleret sidst i rapporten.

[1] Fugtindholdet er generelt angivet i forhold til "wet basis", dvs. den oprindelige "våde" prøves vægt.

I det følgende er de forskellige datasæt fra fugtmåleudstyr sammenlignet med tørre-vejemålinger. Målet er at vise, hvor god en sammenhæng (korrelation) det er muligt at opnå.

5.1. Fugtmåling med NIR

NIR betyder Near Infra-Red, eller på dansk (nær-) infrarød. Udstyret måler som nævnt refleksion af infrarød stråling ved forskellige bølgelængder: nogle, der bliver påvirket af vand, og nogle, der ikke gør. Kun de øverste få mm af prøvematerialet påvirker signalet. Det anvendte udstyr er fremstillet af NDC og ses i Figur 5.

Figur 5. NIR-målinger over transportbåndet på Verdo.

Nedenstående procedure er benyttet for at vurdere, hvor godt NIR-udstyret er til at måle fugt. Fordelen ved denne procedure er, at den kan anvendes for udstyr, der måler flere parametre (f.eks. MW-udstyr).

1) Visningen fra NIR er justeret på basis af de koblede referencemålinger med tørre-vejemetoden. Til justeringen er der anvendt en lineær regression, se ligning (1).

2) Referencemålingerne er derefter sammenlignet grafisk med målingerne fra fugtmåleudstyret (Figur 6).

Ud fra regressionen fås bl.a. determinationskoefficienten og estimatet på standardafvigelsen. Determinationskoefficienten er bedre kendt som R^2 og angiver den andel af variationen (i fugtindholdet), der kan forklares ved modellen. For en ideel fugtmåler kunne man i princippet forvente $R^2 = 1$, dvs. jo tættere R^2 er på værdien 1, desto bedre. Estimatet på standardafvigelsen (= kvadratroden af variansen) angiver spredningen af målepunkterne, og det kan forventes, at afvigelsen mellem model og målepunkter vil være mindre end standardafvigelsen for 2/3 af alle målepunkter.

Til justeringen af NIR-fugtmåleudstyret er der benyttet en lineær regression af formen

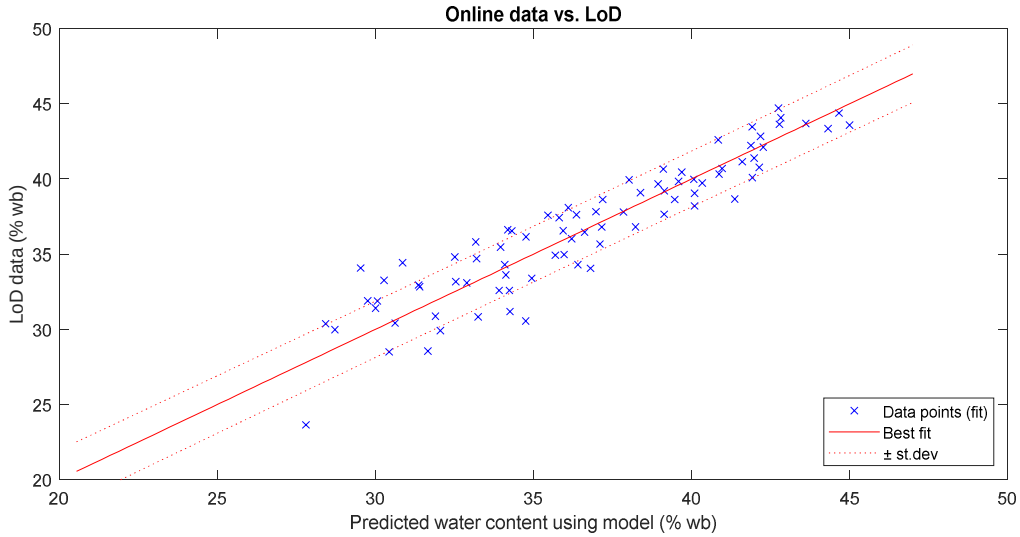
$$M = a \cdot NIR + b, \tag{1}$$

hvor M er fugtindholdet i procentpoint målt med tørre-vejemetoden, NIR er outputtet fra fugtmåleinstrumentet i fugt-%, og a og b er konstanter.

Grafen (Figur 6) indeholder nedenstående information:

- De blå datapunkter viser sammenhørende værdier fra hhv. tørre-vejemetoden og fugtmåleudstyr.
- Den røde linje på grafen viser sammenhængen mellem tørre-vejemetoden og fugtmåleinstrumentet (rød, fuldt optrukken). Der er tale om en 1:1-linje, fordi fugtmåleudstyret allerede er justeret, se ovenfor.
- Spredningen vist (svarende til én standardafvigelse) med røde stiplede linjer.

Resultaterne for NIR-målingerne er præsenteret i Figur 6. Der ses en meget tydelig sammenhæng mellem NIR- og tørre-vejedata, hvilket viser, at NIR-metoden kan anvendes til at bestemme fugtindholdet af træflis i det testede måleområde. Dette bekræftes af, at determinationskoefficienten er $R^2 = 0{,}88$, hvilket er relativt tæt på 1. Standardafvigelsen på regressionen er 1,8 procentpoint.

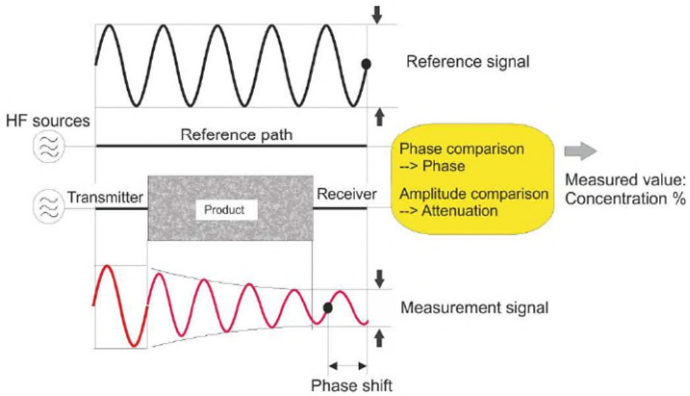


Figur 6. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger (vertikal akse) og NIR-målinger (horisontal akse).

5.2. Fugtmåling med MW

MW betyder MicroWave eller på dansk "mikrobølge". Udstyret ses i Figur 7: En sender under båndet og en modtager over båndet måler transmission og faseskift af de mikrobølger, der sendes gennem træflisen. Måleprincippet er illustreret i Figur 8. Det anvendte udstyr er fremstillet af Berthold og inkluderer en radiometrisk enhed til bestemmelse af lasten (fladedensiteten, typisk målt i kg/m^2).

Figur 7. Fugtmåling med mikrobølger. T.v.: Principskitser fra udstyrsmanualen (sender nederst, modtager øverste); t.h.: Udstyret ses på Verdo (forrest ses den radioaktive "load"-måler).



Figur 8. Måleprincip for mikrobølgeudstyr. (Kilde: Udstyrsmanual.)

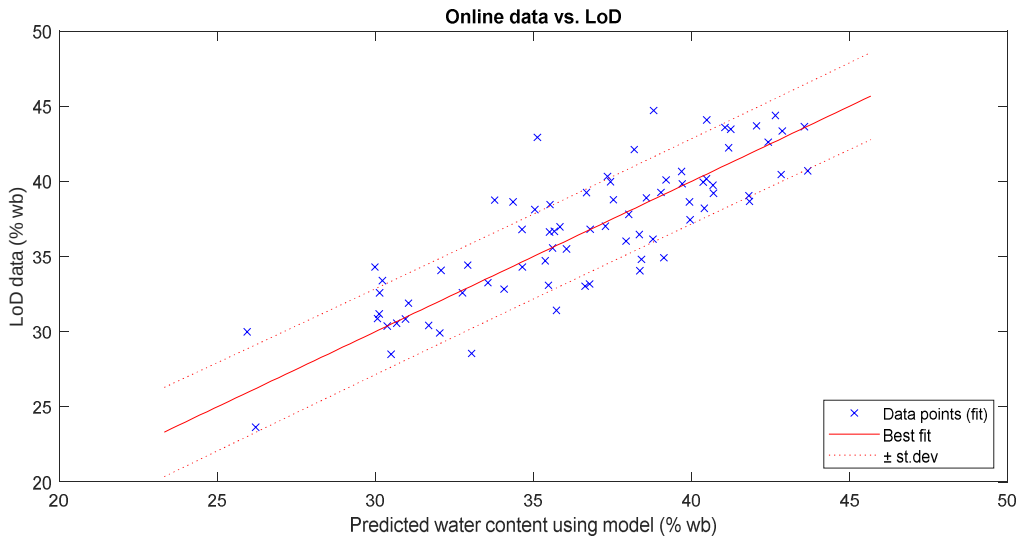
Til justeringen af NIR-fugtmåleudstyret er der benyttet en lineær regression af formen

$$M = a \cdot \frac{phase}{load} + b \cdot \frac{attenuation}{load} + c, \tag{2}$$

hvor M er fugtindholdet målt med tørre-vejemetoden i procentpoint, og a, b og c er konstanter. Outputtet fra MW-instrumentet er angivet som *load* (dvs. fladedensitet), *phase* og *attenuation*.

Resultaterne for MW-målingerne er præsenteret i Figur 9 . Ligesom det var tilfældet for NIR-målingerne, ses der en tydelig sammenhæng mellem MW- og tørre-vejedata. Det kan dog ses, at punkterne spreder sig mere omkring linjen, end det var tilfældet for NIR'en. MW-metoden kan således også anvendes til at bestemme fugtindholdet af træflis i det testede måleområde, men vores data indikerer, at præcisionen kan være lidt dårligere. Standardafvigelsen på regressionen er 2,8 procentpoint, og determinationskoefficienten er længere fra værdien 1, $R^2 = 0{,}72$. Begge parametre angiver altså en lidt dårligere ydelse end for NIR-instrumentet.

Det er muligt at anvende en simplere sammenhæng mellem MW-signalet og fugt end den, der er angivet ovenfor. Således kan man nøjes med at anvende enten dæmpning (*attenuation*) eller fase (*phase*). Vores data indikerer, at dæmpningen giver anledning til lidt mindre spredning end fasen, idet spredningen er hhv. 2,9 procentpoint og 3,2 procentpoint.



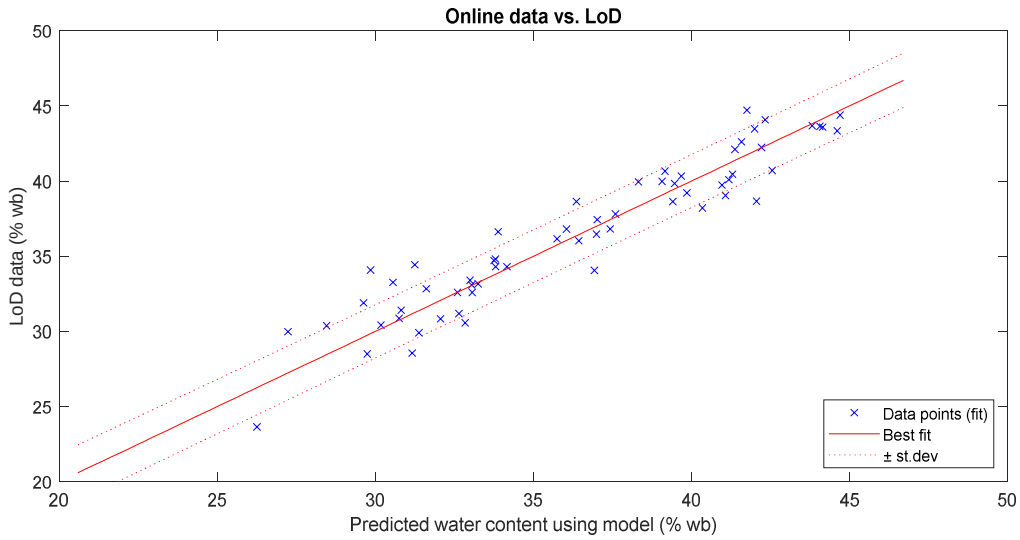
Figur 9. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger (vertikal akse) og MW-målinger (horisontal akse).

5.3. Fugtmåling med NIR + MW

Det er muligt at kombinere målingerne fra NIR og MW. Sammenhængen mellem fugt og måledata kan så skrives som

$$M = a \cdot \frac{phase}{load} + b \cdot \frac{attenuation}{load} + c \cdot NIR + d. \tag{3}$$

Sammenhængen mellem in-line måledata og tørre-vejedata er vist i Figur 10. Kombinationen af metoderne giver ikke overraskende anledning til mindre spredning end begge de individuelle metoder. Således er spredningen 1,7 procentpoint. Ligeledes kommer determinationskoefficienten tættere værdien 1, $R^2 = 0{,}91$.



Figur 10. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger og data fra NIR + MW kombineret.

5.4. Fugtmåling med transducer

En fugttransducer anvender et princip, der minder om MW-måleprincippet: Der måles ligeledes impedans (= faseskift og dæmpning) af elektromagnetiske bølger, men i stedet for mikrobølger anvendes radiofrekvensbølger. En anden forskel er, at sender og modtager er bygget sammen til én enhed – målingen er således ikke penetrerende. Det anvendte udstyr er fremstillet af firmaet ACO og er vist i Figur 11. På Verdo blev den installeret i bunden af en beholder. Måleprincippet var, at 10 L prøvemateriale blev overført fra tønden (se Figur 3) til beholderen inden tørre-vejemålingerne. Desuden var beholderen udstyret med en vejecelle, så densiteten også blev bestemt. Opstillingen er vist i Figur 12.

Figur 11. ACO fugttransducer (foto fra producents hjemmeside).

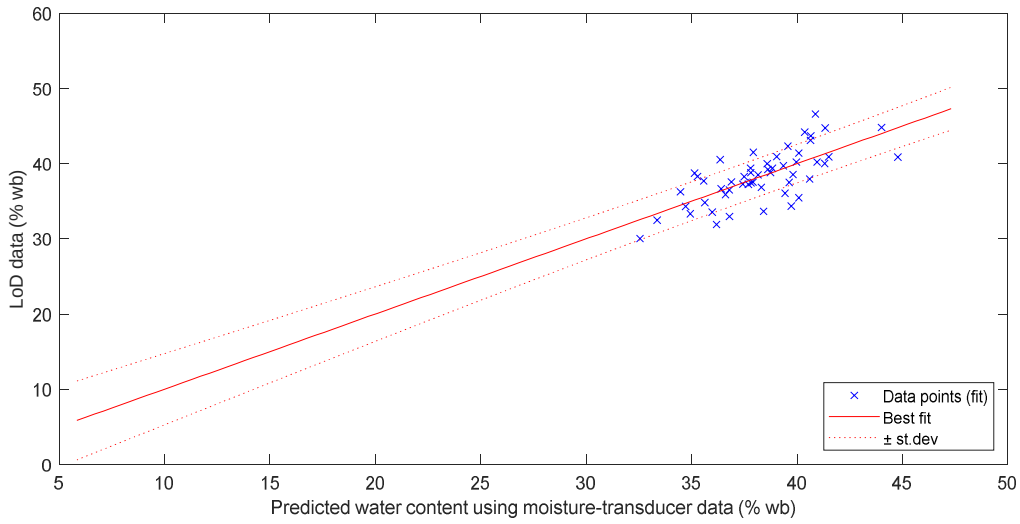
Figur 12. Opstillingen baseret på en ACO fugttransducer på Verdo.

Der er foretaget en regression af sammenhængen mellem tørre-vejemålingerne og målinger med regressionen har formen

$$M = a \cdot ACO + b \cdot \rho + c, \tag{4}$$

hvor M er fugtindholdet i procentpoint målt med tørre-vejemetoden, og a og b er konstanter. Output fra instrumenterne er fugt-% (angivet som *ACO*) og densitet (ρ).

Resultaterne fra fugttransduceren er præsenteret i Figur 13. Ligesom det var tilfældet for NIR- og MW-målingerne, indikerer data en tydelig sammenhæng mellem måler- og tørre-vejedata. Det skal dog bemærkes, at fugttransduceren blev installeret senere end de andre instrumenter, og datasættet er derfor mere begrænset. På grund af den relativt begrænsede fugtvariation i referencedata bliver værdien af determinationskoefficienten relativt lav, $R^2 = 0{,}50$. Standardafvigelsen på regressionen er 2,5 procentpoint, hvilket ligger mellem værdierne for NIR og MW.



Figur 13. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger og data fra fugttransducer + vægt (kombineret).

5.5. Effekt af supplerende målinger

Som tidligere nævnt er der foretaget forskellige former for supplerende målinger af miljødata ud over selve fugtmålingerne. Desværre har der været nogle tekniske problemer, som begrænser anvendeligheden af disse data. Dette gælder især foto-/videodata, der viste sig ikke at være af tilstrækkeligt høj kvalitet, og luftfugtighed (pga. nedbrud). Derimod er der målinger af flisens overfladetemperatur (med IR) og lufttemperaturen i forbindelse med de fleste referencemålinger.

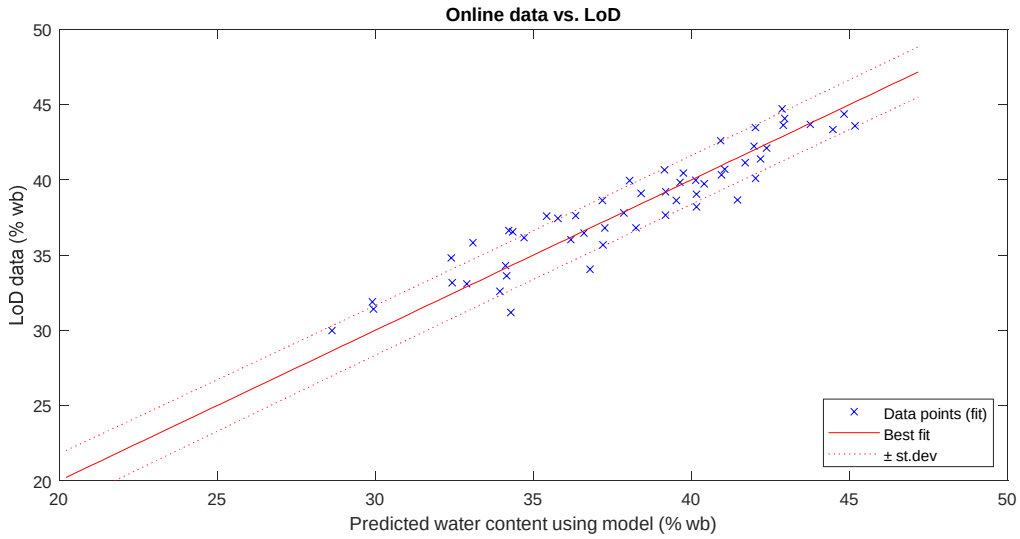
Som følge af ovenstående er der lavet test, som viser, hvorvidt temperaturmålingerne kan anvendes til at forbedre overensstemmelsen mellem fugtmåler- og referencedata. Der generelle konklusion for mikrobølgeudstyret er, at der ikke umiddelbart opnås nogen forbedring ved at inkludere temperaturmålinger. Det skal i den forbindelse bemærkes, at målingerne foretages i et afskærmet område, som normalt er frostfrit.

I forbindelse med NIR-fugtmåleudstyret ser der ud til at være en mindre forbedring ved at inkludere flisens overfladetemperatur. Der er benyttet en lineær regression af formen

$$M = a \cdot NIR + b \cdot T_{flis} + c, \tag{5}$$

hvor M er fugtindholdet i procentpoint målt med tørre-vejemetoden, NIR er outputtet fra fugtmåleinstrumentet i fugt-%, T_{flis} er overfladetemperaturen af flisen, og a, b og c er konstanter.

Resultatet er vist i Figur 14. Spredningen er i dette tilfælde 16 procentpoint og $R^2 = 0{,}91$ – altså en smule bedre end for NIR alene.

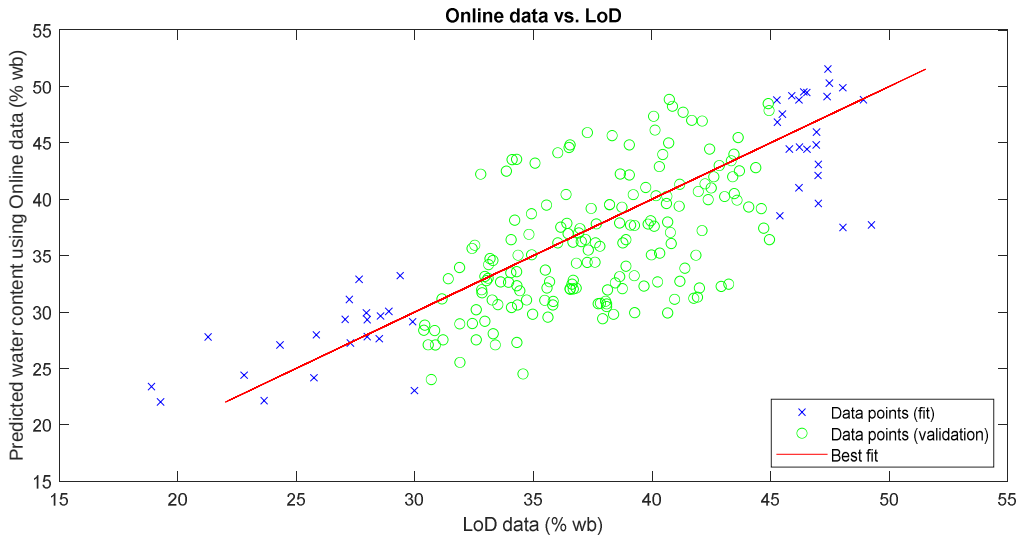


Figur 14. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger (vertikal akse) og kombinerede NIR- og flistemperaturmålinger (horisontal akse).

6. Historiske målinger (MW)

Verdo har haft et justeringsprogram til MW-udstyret kørende fra før projektets start. Der er i alt foretaget 648 referencemålinger med tørre-vejemetoden. Data målt efter den 1. januar 2018 er vist nedenfor i Figur 15[2]. I grafen ses en vis korrelation mellem MW- og referencedata, men den illustrerer en anden udfordring med datasættet til kalibrering, nemlig at punkterne er koncentreret omkring gennemsnitsværdien. Derfor bliver regression meget unøjagtig for de mere ekstreme værdier (nær min. eller maks.). For at løse dette problem er regressionen kun foretaget på de 10 % af punkterne, som ligger højst i fugt, samt de 10 % laveste. Ved at anvende denne metode opnås en tydelig korrelation mellem in-line- og tørre-vejedata, omend spredningen er relativt stor, ca. 4 procentpoint, mens værdien af determinationskoefficienten er $R^2 = 0{,}86$. Spredningen er altså større end de 2,8 procentpoint, der er observeret i projektet (afsnit 5.2).

Det er muligt at gøre spredningen af data væsentligt mindre ved at anvende en regressionsteknik baseret på machine leaning. Ulempen er, at regressionens evne til forudsigelser bliver mindre robust.



Figur 15. Historiske MW-målinger på Verdo. Øverst: alle målinger; nederst: målinger fra 2018-2020. Kun de blå punkter er anvendt til regressionen. Se tekst.

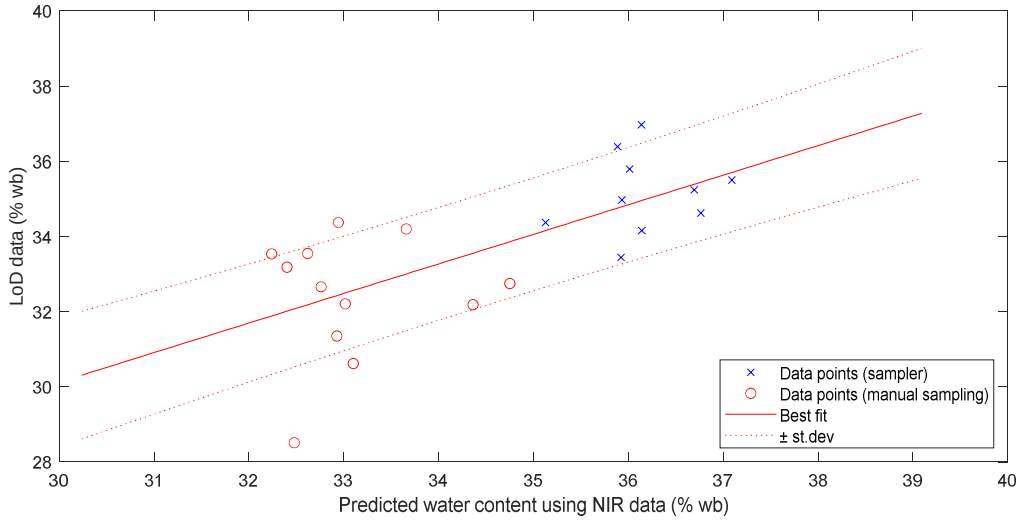
[2] Anvendes der også data fra før den 1. januar 2018, er der ikke umiddelbart nogen god sammenhæng mellem reference- og MW-data. Den sandsynligste årsag er, at proceduren for måling af referencedata er ændret; det formodes, at den faglige kvalitet af den oprindelige procedure i praksis ikke var tilstrækkelig god til at sikre brugbare referencedata.

7. Offline målinger med NIR

For at kunne anvende NIR-instrumentet til at måle på træflisprøver offline er der i projektet konstrueret det apparat, der er vist i Figur 16. Apparatet består af en roterende prøvebakke og en holder til NIR-instrumentet.

Der er foretaget to målekampagner med offline NIR-målinger på Aabybro Fjernvarmeværk. Den seneste blev foretaget under en demonstration/test af et prøveudtagningssystem udviklet til mindre værker. En række flisprøver blev udtaget ved hhv. manuel neddeling og prøveudtager. For alle fraktionen blev der både målt med NIR og tørre-vejemetoden. Resultaterne er vist i Figur 17 sammen med regressionen fra Verdo (se Figur 6); denne regression kan anvendes fordi NIR-udstyret er indstillet til at bruge samme procedure som ved Verdo. Det kan dog ses, at justeringen ikke er helt

Figur 16. NIR-setup til måling af fugtindhold offline.

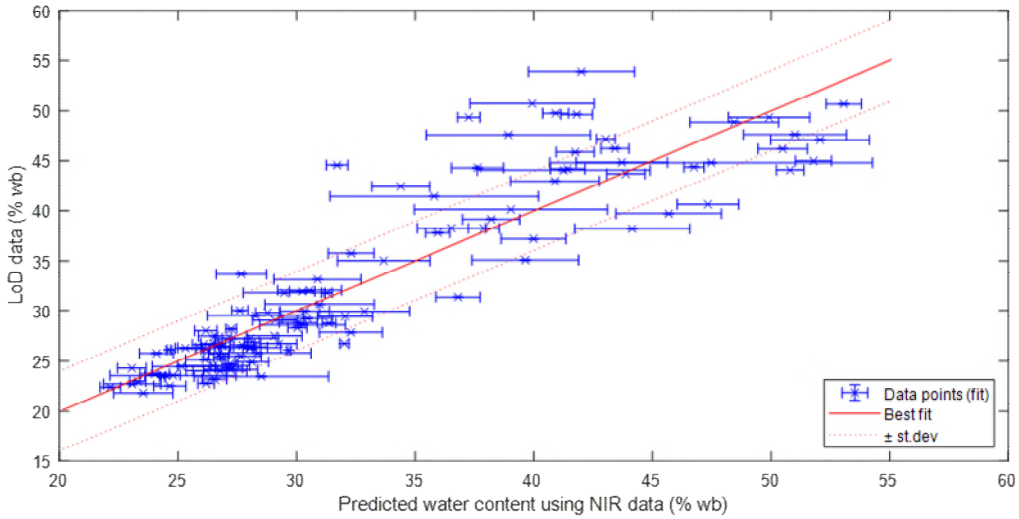


Figur 17. Sammenligning mellem NIR- og tørre-vejemålinger foretaget i Aabybro. Linjen angiver regressionen foretaget på baggrund af ovenstående data fra Verdo. Se tekst.

tilfredsstillende, idet der er forskel på den justerede NIR-værdi og tørre-vejedata (f.eks. svarer 39,5 fugt i NIR-målingen til ca. 37,5 % tørre-veje.). Alle målinger er baseret på flis fra samme stak.

Den anden målekampagne strakte sig over ca. en måned og involverede 113 målinger. Målingerne blev foretaget i forbindelse med modtagelsen af flislæs. Resultaterne fra kampagnen er vist i Figur 18. Der er god overensstemmelse mellem NIR- og tørre-vejedata for fugtværdier < 40 procentpoint (ca.), mens der ses en betydelig spredning for mere fugtholdige flisprøver. Dette er i modstrid med målingerne i Figur 6 og Figur 17. Forklaringen er ikke kendt, men den store spredning kan f.eks. skyldes 1) at NIR-instrumentet anvendte en anden beregningsprocedure, 2) problemer med udformning eller betjening af apparatet, eller 3) at prøven ikke blev neddelt korrekt til tørre-veje (kun ca. 1/5 af prøven anvendes til tørre-veje).

Betragtes de individuelle målinger, ses forskelle mellem NIR og tørre-vejedata fra -13 til +7 procentpoint. For hele datasættet er den gennemsnitlige spredning ca. 4 procentpoint. Til sammenligning en den tilsvarende værdi 1,8 procentpoint for måling med NIR-måling på transportbånd.



Figur 18. Sammenligning mellem NIR- og tørre-vejemålinger foretaget i Aabybro. NIR-instrument og procedure var anderledes end det anvendte i resten af projektet. Der er foretaget tre NIR-målinger på hver prøve, og usikkerhedsbjælkerne angiver den resulterende spredning.

8. Konklusion

I rapporten er en række instrumenter til online bestemmelse af fugtindholdet i træflis afprøvet. Det gælder både in-line (NIR + MW), at-line (rf-fugttransducer) og offline (NIR med specielt udstyr).

I tabellen nedenfor er nøgleparametre sammenlignet. For ideelt måleudstyr ville vi have, at $R^2 \approx 1$ og at spredningen er tæt på nul[3].

Målemetode	R^2 (= Determinationskoefficient)	Spredning (procentpoint)
NIR	0,88	1,8
MW	0,72	2,8
NIR+MW	0,91	1,7
Fugttransducer	0,50	2,5
NIR + Flistemperatur	0,91	1,6
NIR, offline	0,88	3,9

Først betragtes in-line og at-line målingerne foretaget hhv. på og ved et transportbånd. Af de tre metoder har NIR-udstyret tydeligvis klaret sig bedst i testen, idet determinationskoefficienten er tættest på 1, og spredningen er mindst. Mere bredt er konklusionen dog, at alle de testede målesystemer tilsyneladende kan anvendes, men at præcisionen er forskellig.

Den relativt lille værdi af R^2 (determinationskoefficient) set for fugttransduceren skyldes som nævnt begrænsninger i referencedata. Yderlige test over et bredere fugtområde kunne derfor være en fordel.

Testen viser også at bedre resultat kan opnås ved at kombinere flere typer fugtmåleudstyr. Det kan således ses at NIR + MW (kombinationen af infrarødt og mikrobølgeudstyr) giver endnu bedre resultater en NIR alene. Desuden ses, at NIR-målingerne potentielt kan forbedres med måling af flisens overfladetemperatur.

For offline målinger med NIR-udstyr ses en væsentlig større spredning, end det er tilfældet for online målinger. Således er forskelle fra -13 til +7 procentpoint observeret mellem NIR- og tørre-vejedata, svarende til en spredning på ca. 4 procentpoint. Årsagen til dette er endnu ikke kendt, og yderligere undersøgelser vil være en fordel. Det skal i den forbindelse bemærkes, at den totale usikkerhed på fugtmåling i forbindelse med modtagekontrol er en kombination af bidragene fra måling og prøveudtagning. Det

[3] Spredningen kan dog ikke forventes at blive mindre end 0,35 procentpoint, svarende til usikkerheden på middelværdien af tørre-vejemålingerne.

er flere gange vist, at sidstnævnte bidrag ofte er stort[4]. Fugtmåleudstyr gør det muligt at måle på en større del af flisen og kan derfor i princippet bidrage til at mindske usikkerheden på prøveudtagning.

En vigtig lære af undersøgelsen er, at forudsætningen for gode online målinger er *pålidelige* og *repræsentative* referencemålinger til justering af fugtmåleudstyret. *Pålidelige* referencemålinger stiller krav til anlæggets opbygning – herunder valg af fugtmåler og placering – og til procedure. Derudover - for at sikre, at referencemålingerne er *repræsentative* for hele det interessante fugtmåleområde - anbefales det at anvende specielle flisprøver til kalibreringen. Der kan f.eks. anvendes delvist tørret flis til den lave ende af fugtområdet.

[4] Forsøg med prøveudtagning ved Ørsted er beskrevet i PSO-projekt nr. 5297, "Biobrændselskarakterisering 2004 – Metodeudvikling", "Delrapport, arbejdspakke 1 Prøveudtagning". I et forsøg (p64) er der f.eks. målt fugtværdier fra 34–66 % for prøver taget forskellige steder i samme lastbillæs.

DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE