

SOFT: Sporbar online fugt- måling i træflis

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



**DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE**



SOFT: Sporbar online fugtmåling i træflis

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

Prepared by

Teknologisk Institut
Kongsvang Allé 29
8000 Aarhus C
Energy and Climate

September 2020

Author: Henrik Kjeldsen



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 være 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 læringer, som beskrives kort i det følgende.

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

Læring 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.

Læring 3: Hvis to typer udstyr (f.eks. NIR og MW) kombineres, kan man opnå 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.

Læring 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.)

Læring 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 træflisen som udstyret måler på.
- Procedure skal udarbejdes til at sikre kvaliteten af referencemålingerne.
- Referencemålinger skal deles jævnt ud over fugtmåleområdet, og det nytter altså ikke at alle målinger ligger midt i måleområdet. Det vil derfor typisk være en betydelig fordel at foretage referencemålinger med specielt forberedte flisprøver.



I en separat rapport (M4: "SOFT - Reference Method") er der arbejdet med den metrologiske sporbarhed af referencenfugtmålinger. 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).



Indholdsfortegnelse

Resumé	3
1. Indledning.....	6
2. Anvendte metrologiske begreber	7
3. Hvordan er in-line målesystemet opbygget?	8
4. Referencemålinger	9
5. Måledata og analyse	11
5.1. Fugtmåling med NIR.....	11
5.2. Fugtmåling med MW.....	14
5.3. Fugtmåling med NIR + MW	16
5.4. Fugtmåling med transducer	17
5.5. Effekt af supplerende målinger	19
6. Historiske målinger (MW).....	21
7. Off-line målinger med NIR	22
8. Konklusion.....	24



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 af fugtmåling er modtagekontrol, fordi brændværdien – og dermed flisens værdi – er stærkt afhængigt af vandindholdet.

Det har tidligere vist sig at der er betydelige udfordringer forbundet med at opnå præcise data fra online-målemetoder. Dette 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 off-line 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 tilsvarende til in-line måleudstyr.
- 3) Hvis prøveudtagningen foretages i en separat proces, tales der om off-line målinger. Udstyrets rolle minder i dette tilfælde om den traditionelle tørre-vejemetode, men har fordelen at det kan levere hurtigere resultater (og dermed i praksis ofte flere).

Både in-line, at-line og off-line 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 VERDO's 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 døgnsilos og kedler. Kombinationen 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 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 foretaget to serier af målinger på Aabybro Fjernvarme. Det drejer sig om måleudstyr som er placeret off-line 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.

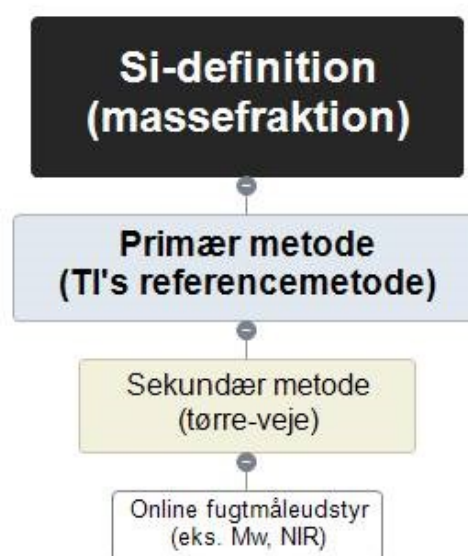
2. Anvendte metrologiske begreber

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 foretaget 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.

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 således ikke sporbar. Det er derfor ikke muligt at foretage en egentlig kalibrering af fugtmåleudstyret. Der er derimod muligt at lave 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.



Figur 1. Metrologisk sporbarhedskæde for materialefugt i træflis.

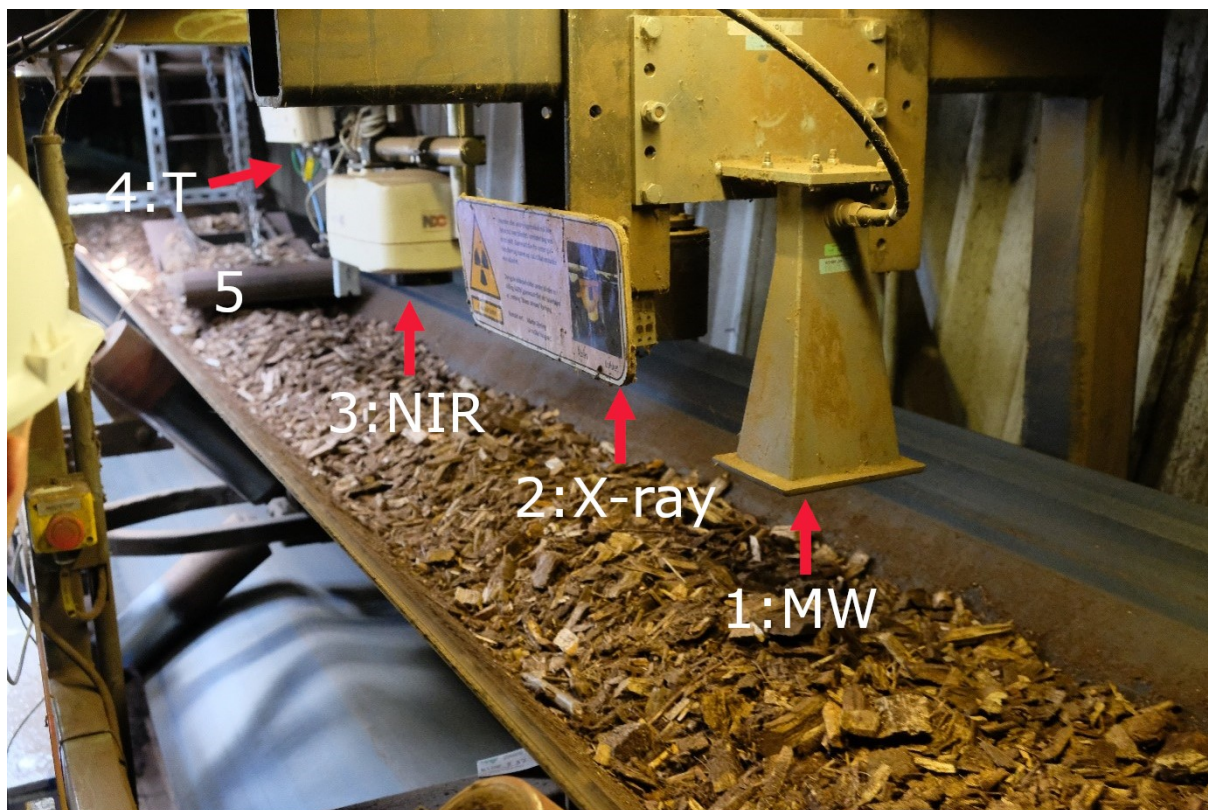
3. Hvordan er in-line målesystemet opbygget?

For at opnå den ønskede funktionalitet er det testede målesystem på VERDO's værk i Randers placeret ved det transportbånd, som transporterer træflisen fra lageret (i dette tilfælde: den såkaldte døgnsilø) til kedlerne. Dette er vist nedenfor i Figur 2. På fotoet ses det transportbåndet og måleudstyr: Forest ses mikrobølgemåler, efterfulgt af densitetsmåler, 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).

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 mikrobølge sender og -modtager placeres henholdsvis ovenover og nedenunder



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



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 densiteten er varierende, er det nødvendigt at korrigere målingerne for denne. Densiteten (kg/m^3) 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 modtager samlet, så målingen er ikke dybt penetrerende – dog måles dybere end med infrarød stråling. Endelig 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. 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 mikrobølge-sensor, NIR-sensor etc. optager et datapunkt hvert sekund i døgnet 24 timer. Der udtages sammenligningsprøver til tørre-veje en gang i døgnet mandag – torsdag, dvs. 4 gange per uge.

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 til opsætning af in-line måleudstyr til bestemmelse af fugtindhold i træflis (v2)", som også er udfærdiget i forbindelse med dette projekt.

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

- 1) Udstyret 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 yderligere 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 anvendt i dette projekt er som nævnt placeret på det målebånd, som fører flisen fra døgn silo 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 veldefineret tidsinterval (en 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 3 prøver til tørre-veje. Spredningen mellem de 3 tørre-vejemålinger, der foretages i forbindelse med hver kalibreringsmåling, giver en ide om deres kvalitet. Den gennemsnitlige spredning er 0,7 procentpoint¹, se Figur 4.

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 4 gange om ugen.



Figur 4. Spredning (standardafvigelsen) for de 3 tørre-vejrøve udført for hver af de 220 kalibreringsmålinger på Verdo i 2018 - 2020.

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 3 fraktioner udtages til tørre-vejrøve. Se tekst.

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

Krav 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 af afbryde flistilførslen til kedlerne over en periode. Dermed påvirkes værkets drift. En mulig løsning kunne være at udføre målingerne i forbindelse med 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 tidlige sammentræf med tørre-vejemålingerne.

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

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

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 6.

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 7).



Figur 5. NIR-målinger over transportbåndet på Verdo.



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 jo bedre. Estimatet på standardafvigelsen (= kvadratroden af variansen) angiver spredningen af målepunkterne, og det kan forventes 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

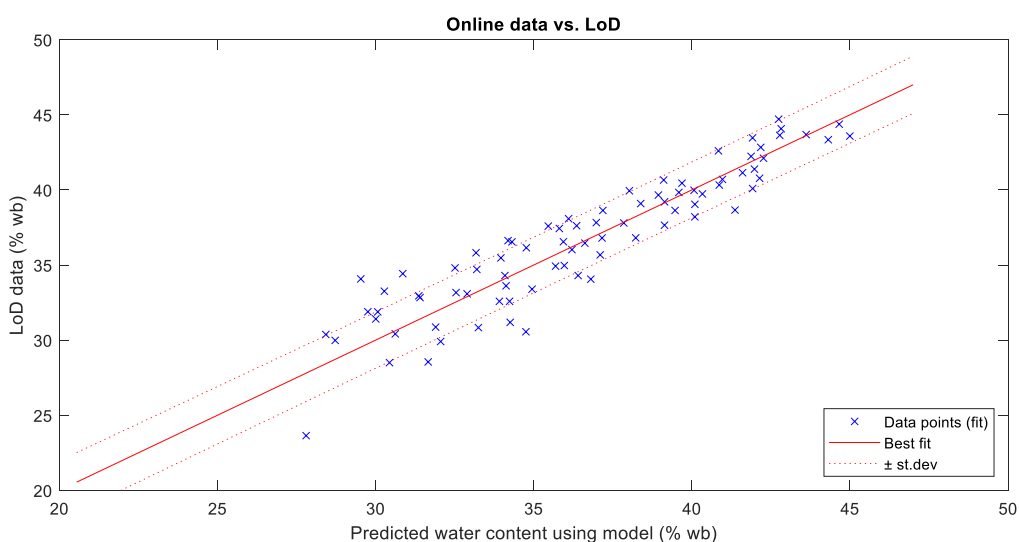
$$M = a \cdot NIR + b, \quad (1)$$

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 7) 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 fuldtoptrukken). 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 7. 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.



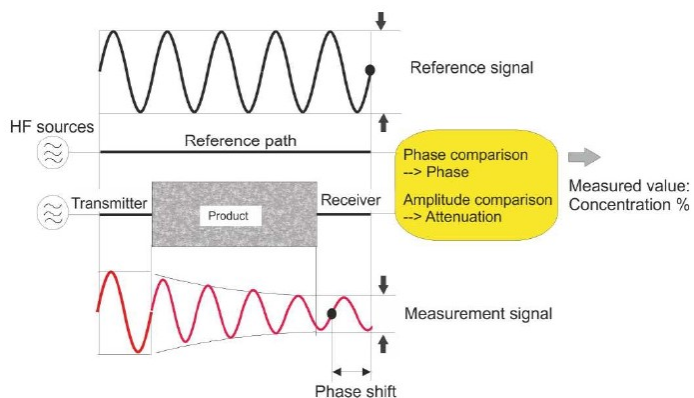
Figur 6. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger (vertikal akse) og NIR-målinger (horisontal akse).

5.2. Fugtmåling med MW

MW betyder MicroWave, eller på danske "mikrobølge". Udstyret ses i Figur 9: En sender under båndet og en modtager over båndet måler transmission og faseskift af mikrobølger, den 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^3).



Figur 8. Fugtmåling med mikrobølger. Tv: Principskitser fra udstyrsmanualen (sender nederst, modtager øverste); th: Udstyret ses på Verdo (forest ses den radioaktive "load"-måler).



Figur 7. Måleprincip for mikrobølgeudstyr. (Kilde: Udstyrsmanual.)

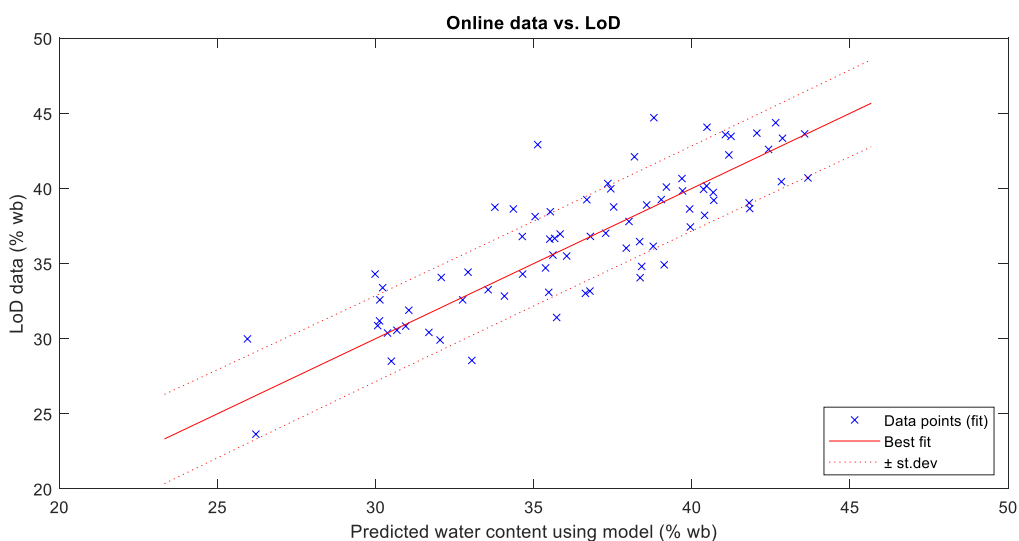
Til justeringen af NIR-fugtmåleudstyret er der benyttet en lineær regression af formen

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

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

Resultaterne for MW-målingerne er præsenteret i Figur 10. Ligesom det var tilfældet for NIR-målingerne, ses der en tydelig sammenhæng mellem MW- og tørre-vejedata. Det kan dog ses at punkterne spredte 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 indikere 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 simple 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 faser, idet spredningen er hhv. 2,9 procentpoint og 3,2 procentpoint.



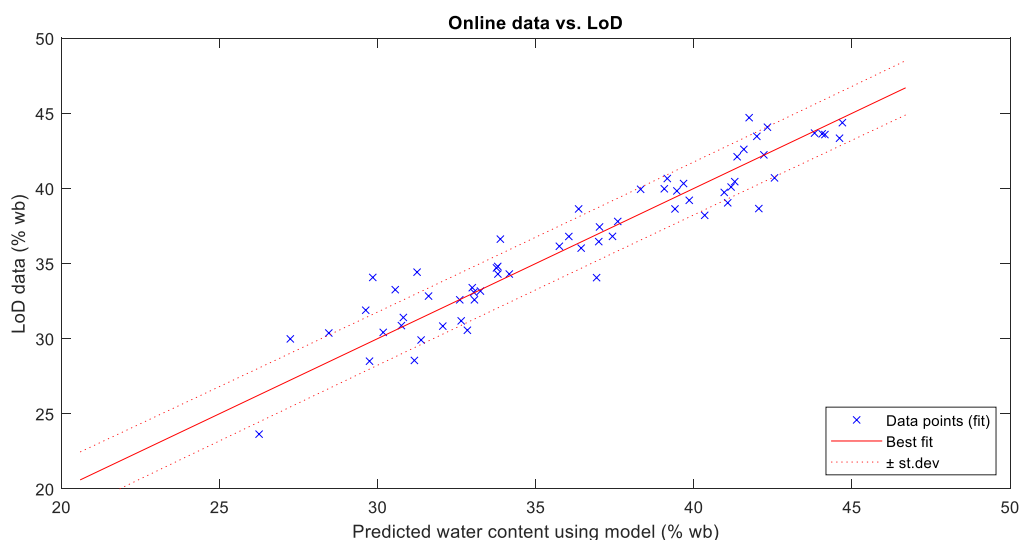
Figur 9. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger (vertikal akse) og MW-målinger (horisontal akse).

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

$$M = a \cdot \frac{\text{phase}}{\text{load}} + b \cdot \frac{\text{attenuation}}{\text{load}} + c \cdot \text{NIR} + d. \quad (3)$$

Sammenhængen mellem in-line måledata og tørre-vejedata er vist i Figur 11. Kombinationen af metoderne giver ikke overraskende anledning til mindre spredning end begge de individuelle metoder. Således er spredningen 1,7 procent-point. Ligeledes kommer determinationskoefficienten tættere værdien 1, $R^2 = 0,91$. B



Figur 10. Sammenligning mellem tørre-vejemalinger 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 en enhed – målingen er således ikke penetrerende. Det anvendte udstyr er fremstillet af firmaet ACO og er vist i Figur 12. 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 13.



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



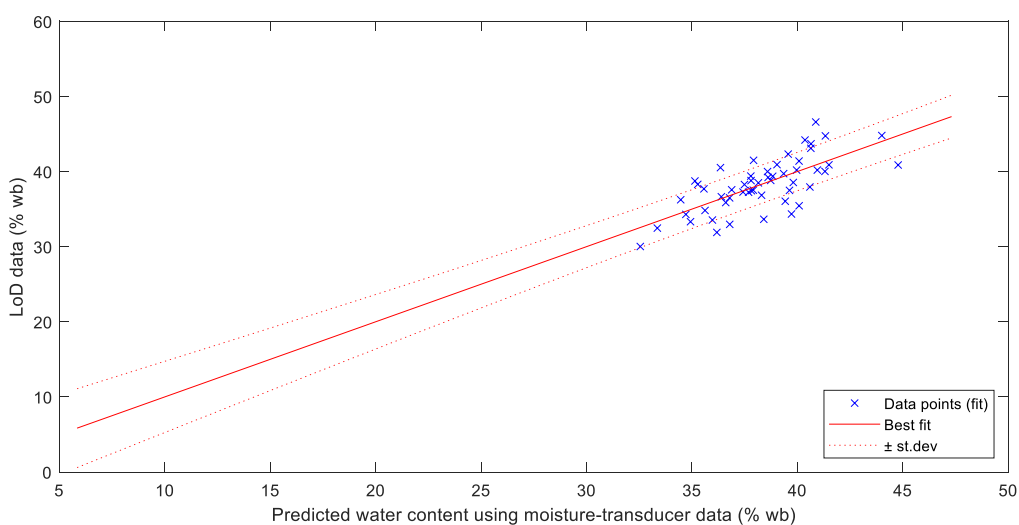
Figur 12. Opstillingen baseret på en ACO fugttransducer på Verdo.

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

$$M = a \cdot ACO + b \cdot \rho + c, \quad (4)$$

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 14. Ligesom det var tilfældet for NIR- og MW-målingerne, indikere 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.

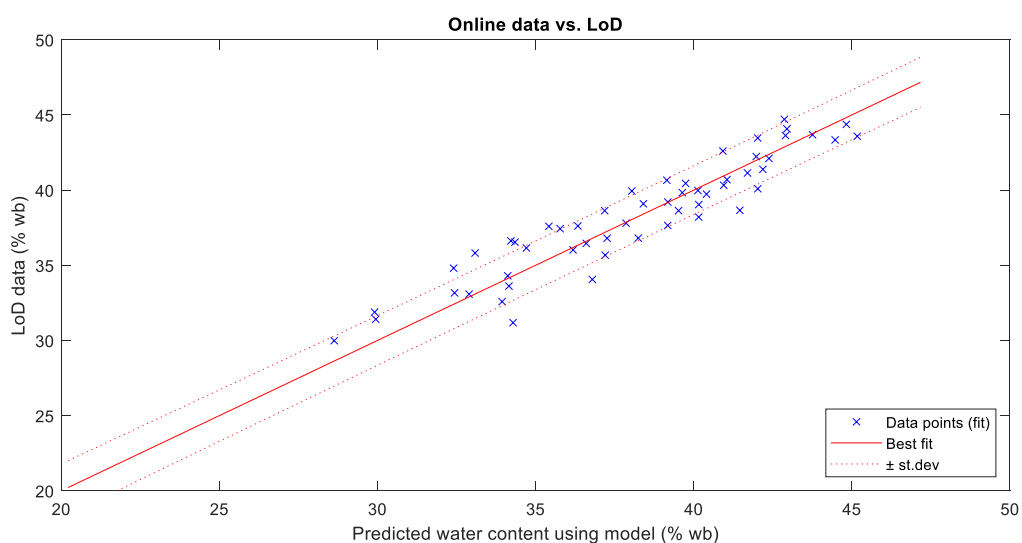
Som følge af ovenstående er der lavet test som viser, hvorvidt temperaturmålingerne kan anvendes til at forbedre overensstemmelsen mellem fugtmåler- og referencedata. Der generelle konklusion for mikrobølgeudstyret er at der ikke umiddelbart opnås nogen forbedring ved at inkludere temperaturmålinger. 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

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

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 15. Spredningen er i dette tilfælde 1.6 procentpoint og $R^2 = 0,91$ – altså en smule bedre end for NIR alene.

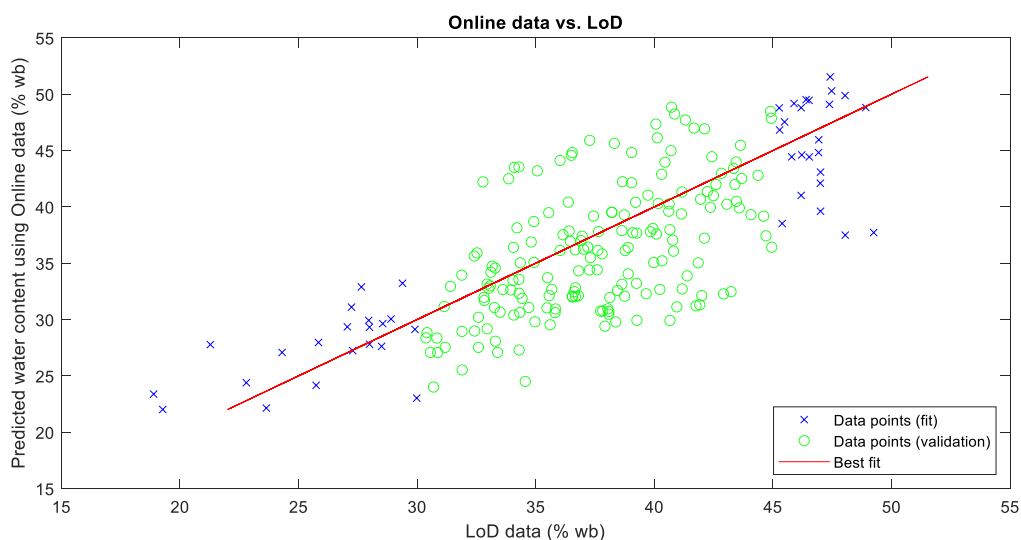


Figur 14. Sammenligning mellem tørre-vejemålinger (vertikal akse) og kombinerede NIR- og flistemperaturmålinger (horizontal akse).

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 tage efter den 1/1 2018 er vist nedenfor i Figur 16². 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 max). For at løse dette problem er regressionen kun foretaget på de 10% af punkterne som ligger højest i fugt samt de 10 % laveste. Ved at anvende denne metode opnås en tydelig korrelation mellem in-line- og tørre-vejedata, om end 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 learning. 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 det blå punkter er anvendt til regressionen. Se tekst

² Anvendes der også data fra før den 1/1 2018 er der ikke umiddelbart nogen god sammenhæng 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.

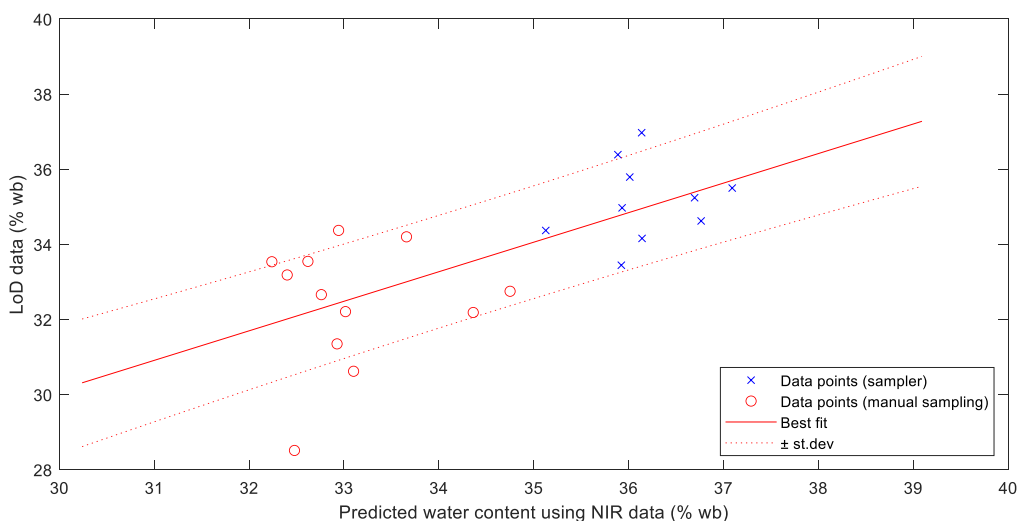
7. Off-line målinger med NIR

For at kunne anvende NIR-instrumentet til at måle på træflisprøver off-line er der i projektet konstrueret apparatet vist i Figur 17. Apparatet består af en roterende prøvebakke samt en holder til NIR-instrumentet.

Der er foretaget to målekampagner med off-line NIR-målinger på Aabybro Fjernvarmeverk. 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 18 sammen med regressionen fra Verdo (se Figur 7); 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 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.



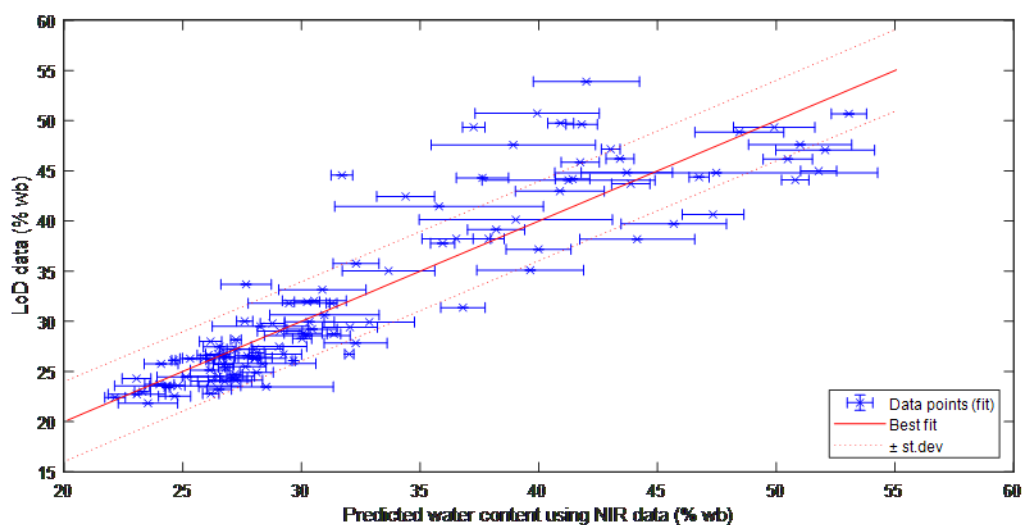
Figur 16. NIR-setup til måling af fugtindhold off-line.



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

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 19. Der er godt 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 7 og Figur 18. 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 del 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 er den tilsvarende værdi 1,8 procentpoint for måling med NIR-måling på transportbånd.



Figur 18. Sammenligning mellem NIR- og tørre-vejemalinger foretaget i Aabybro. NIR-instrument og procedure var anderledes end det anvendte i resten af projektet. Der er foretaget 3 NIR-målinger på hver prøve og usikkerhedsbjælkerne angiver den resulterende spredning.

8. Konklusion

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

I tabellen nedenfor er nøgleparametre sammenlignet. For ideelt måleudstyr ville vi have at $R^2 \approx 1$ og spredningen tæt på nul³.

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 off-line målinger med NIR-udstyr ses en væsentlig større spredning end det er tilfældet for on-line 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 er flere gange vist at sidstnævnte bidrag ofte er stort⁴. Fugtmåleudstyr gør det muligt at måle på en større del af flisen og kan derfor i princippet bidrage til at mindske usikkerheden på prøveudtagning.

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

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



En vigtig lære af undersøgelsen er at forudsætningen for gode online målinger er *pålidelige* og *repræsentative* referencemålinger til justering af fugtmåleudstyret. *Pålidelige* referencemålinger stille 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.



**DANISH
TECHNOLOGICAL
INSTITUTE**