

N6.075.26

Støj fra solcelleparker



Sweco Danmark A/S	CVR nr. 48233511
Projekt	P489_Generalized_Industrial_noise
Projektnummer	41013037
Kunde	EMD International A/S
Udfærdiget af	Niels Frederik Christensen
Kontrolleret af	Jørgen Heiden
Dato	24-08-2026
Ver	1
Dokumentnr.	N6.075.26
Dokumentnavn:	Støj fra solcelleparker

Indholdsfortegnelse

1	Indledning og formål	4
2	Støjforhold i solcelleparker	5
2.1	Støjkilder	5
2.1.1	Invertere	5
2.1.2	Mellemspændingstransformatorer	6
2.1.3	Højspændingstransformatorer	6
2.1.4	Trackere	6
2.2	Døgnvarians i støjen	6
2.3	Lydudbredelsesforhold	7
3	Metode	8
3.1	Målinger	8
3.1.1	Kildestyrkemålinger	8
3.1.2	Målinger af døgnvarians	9
3.1.3	Målinger af solpanels betydning for udbredelsen	11
3.2	Data fra leverandører	12
3.2.1	Fastlæggelse af kildestyrker fra leverandørdata	12
3.3	Databehandling	13
3.3.1	Kategorisering af støjdata	13
3.3.2	Usikkerheder	13
3.3.3	Fastlæggelse af generaliserede kildestyrker	13
3.3.4	Fastlæggelse af generaliserede kildestyrkespektre	14
4	Resultater	15
4.1.1	Kildestyrker – målte og beregnede fra datablade	17
4.1.2	Kildespektre – målte	18
4.1.3	Døgnvarians – målt	20
4.1.4	Solpanels indflydelse på lydudbredelsen	22
5	Diskussion	24
6	Konklusioner	26

1 Indledning og formål

I forbindelse med planlægning og etablering af solcelleparker er der behov for at vurdere parkernes miljøpåvirkning, herunder den eksterne støjbelastning af omgivelserne.

EMD International A/S introducerer muligheden for at beregne ekstern støj fra solcelleparker i beregningsprogrammet WindPro, og har i den forbindelse anmodet Sweco om at undersøge støj fra solcelleparker med henblik på at tilvejebringe et dokumenteret og generaliseret datagrundlag for støj fra de væsentligste anlægsdele i solcelleparker.

Undersøgelsen baserer sig på kildestyrkemålinger udført i eksisterende solcelleparker samt på støjdata indsamlet i forbindelse med støjberegninger af planlagte solcelleparker. Den opsamlede viden anvendes til at opstille forslag til generaliserede støjdata for invertere og kombinerede inverter- og transformatorenheder, som kan benyttes i støjberegninger til planlægnings- og screeningsformål, hvor konkrete leverandørdata endnu ikke foreligger.

For øvrige anlægsdele præsenteres måle- og datagrundlaget. Trackere, som er de enheder der bevæger solpanelerne for at følge solens bane, vurderes generelt at have begrænset støjmæssig betydning, og der fastlægges derfor ikke generaliserede støjtal. For transformatorer fastlægges der heller ikke generaliserede støjtal, idet datagrundlaget er begrænset, selv om transformatorer i konkrete tilfælde kan have væsentlig betydning for den samlede støjpåvirkning.

Som led i projektet er der endvidere gennemført supplerende undersøgelser af støjens døgnvariation samt af solpanelers indflydelse på lydudbredelsen. Formålet med denne delundersøgelse er at bidrage til en retvisende beskrivelse af disse særlige forhold, som gør sig gældende for solcelleparker.

Resultaterne fra undersøgelsen anvendes som input til EMD International A/S' implementering af støj kilde data og støj kilde beskrivelser i WindPro.

Rapporten er udarbejdet med henblik på at kunne læses og anvendes af både myndigheder, projektudviklere og tekniske rådgivere. Rapporten udgør dokumentation for de foreslåede støjdata, men har ikke til formål at erstatte projektspecifikke støjvurderinger baseret på konkrete anlægsdata.

Opgaven er udført for EMD International A/S og er finansieret af EMD Fonden.

Sweco ønsker at takke nedenstående for at stille solcelleparker til rådighed for støjmålinger i forbindelse med projektet.

Virksomhed

Eurowind Energy A/S

NRGi Renewables A/S

ÆEnergy P/S

2 Støjforhold i solcelleparker

I dette kapitel gives en overordnet beskrivelse af de væsentligste støjkloder i solcelleparker samt af karakteristiske forhold, der har betydning for støjen. Formålet er at danne grundlag for de efterfølgende metodebeskrivelser og resultater.

I forbindelse med opstilling af solcelleparker indgår der i stigende grad batterilagringssystemer (BESS – Battery Energy Storage Systems) i projekterne. Nærværende undersøgelse omfatter imidlertid ikke støj fra BESS-anlæg. Beskrivelser og resultater tager således udelukkende udgangspunkt i anlæg bestående af enheder relateret til solcelleanlæg.

2.1 Støjkloder

Støjkloderne i solcelleparker kan normalt inddeles i kategorierne beskrevet i afsnit 2.1.1-2.1.4. Støjen fra anlægsdelene er typisk domineret af støj fra ventilatorer til afkøling af invertere og transformatorer. Støjen fra ventilatorer har ofte en bredbåndet karakter, men der kan i nogle tilfælde forekomme højfrekvente toner relateret til bladpassagefrekvensen eller mellem-og lavfrekvente toner fra ventilatormotorens elektriske komponenter. For inverterne kan der forekomme højfrekvent støj og toner fra de switching-teknikker, der bruges til konverteringen fra jævnspænding til vekselspænding. I støjen fra transformatorer kan der være risiko for indhold af toner omkring 100 Hz, svarende til det dobbelte af frekvensen af vekselspændingen på 50 Hz, samt harmoniske multipler af frekvensen, for eksempel ved 200 Hz.

I rapporten skelnes der mellem invertere uden integreret transformer, kombinerede inverter- og transformatorenheder samt selvstændige transformatorer.

Samlet set er invertere og transformatorer de dimensionerende støjkloder i solcelleparker. Øvrige anlægsdele, herunder trackere, har normalt et ubetydeligt støjbidrag i forhold til invertere og transformatorer og indgår derfor som udgangspunkt ikke i støjvurderingen.

2.1.1 Invertere

Invertere konverterer jævnspændingssignalet fra solcellerne til vekselspænding. Hver inverter kan være tilknyttet et større antal paneler afhængigt af inverterens størrelse. I forbindelse med konverteringen fra jævnspænding til vekselspænding, sker der et energitab i form af varme, og der er derfor behov for afkøling. Invertere kan køles passivt, men oftest sker afkølingen ved hjælp af indbyggede ventilatorer. Disse ventilatorer er normalt den afgørende støjkilde i invertere. Behovet for køling stiger som hovedregel med inverternes effektstørrelse, og det er derfor en tendens, at en øget kapacitet medfører en øget støjudsendelse.

Afhængigt af udformningen af solcelleparken kan der benyttes et stort spænd af antal enheder og kapacitet per enhed. Hvis der benyttes enheder med større kapacitet, vil der som regel være behov for færre enheder. Sweco har i forbindelse med støjundersøgelser af solcelleparker set både decentraliserede og centraliserede anlægskoncepter. Decentraliserede solcelleparker kan bestå af flere hundrede invertere, hvor de enkelte invertere har en nominel aktiv effekt ned til omkring 60 kW.

I mere centraliserede solcelleparker forekommer løsninger med et begrænset antal enheder, hvor invertere er integreret med mellemspændingstransformatorer i samlede enheder med en kapacitet på omkring 4.000 kVA (kVA angiver den tilsyneladende effekt, jf. afsnit 4).

For nyere solcelleparker er det dog almindeligt med invertere i størrelsesordenen ca. 200–350 kW pr. inverter, og solcelleparker består ofte af omkring 200–600 invertere.

Støjen fra invertere og transformatorer er generelt bredbåndet og har typisk et maksimum i frekvensområdet omkring 500–800 Hz.

2.1.2 Mellemspændingstransformatorer

Mellemspændingstransformatorerne, somme tider kaldet transformerhuse eller transformerkiosker, transformerer spændingen fra inverterne op til en højere spænding. Disse har normalt en kapacitet på omkring 4-5000 kVA, og omkring 20-30 transformatorer i en solcellepark, der hver servicerer omkring 10-20 invertere. Transformatorerne er ofte placeret spredt i solcelleparken. Ofte er støjen domineret af støj fra ventilatorer til afkøling. Støjen er ligesom støjen fra inverterne typisk bredbåndet, men har tendens til at have mere lydenergi i det mellem- og lavfrekvente sammenlignet med inverterne.

2.1.3 Højspændingstransformatorer

Afhængigt af solcelleparkens størrelse er der typisk 1-2 hovedtransformatorer som transformerer spændingen fra mellemspændingstransformatorerne op inden den sendes på højspændingsnettet. I nogle sammenhænge planlægges solcelleparker hvor der benyttes eksisterende hovedtransformatorer fra eksempelvis en eksisterende vindmøllepark eller anden energiinfrastruktur.

2.1.4 Trackere

Nogle solcelleparker er designet med solpaneler der kan vinkles i forhold til den optimale solindstråling ved hjælp af trackere med indbyggede aktuatorer. Aktuatorerne er ofte elektriske motorer som styres af en indbygget kontrolenhed i trackeren. Støjen fra trackermotorerne er normalt kortvarig, 5-10 sekunder, når panelerne justeres gradvist i løbet af dagen for at følge solen. Dog kan trackerne være i drift i flere minutter ad gangen hvis der er store variationer i skydækket. Ofte er trackerne i en solcellepark indstillet, så de ikke kører samtidigt, men aktiveres forskudt i forhold til hinanden, hvilket betyder, at støjledningen fra trackerne ikke nødvendigvis forekommer samtidigt på tværs af parken. Der kan være flere tusinde trackere i de solcelleparker hvor de er installeret. Kildestyrkerne er markant lavere end de øvrige støjklude, og støjudsendelsen er normalt begrænset til kortvarige driftsperioder i dagperioden og der er ikke tomgangsstøj. Trackere er derfor normalt ikke en betydende støjklude.

2.2 Døgnvarians i støjen

Generelt gælder det, at støjen er døgnvariant, og er højest i perioder med kraftig solindstråling, hvor produktionen er høj. I aften og natperioderne er støjen markant reduceret, da behovet for køling reduceres og der ikke bliver produceret strøm. Der kan dog stadig forekomme tomgangsstøj.

2.3 Lydudbredelsesforhold

I solcelleparker med invertere med en relativ lav effekt per enhed, under 500 kW, er inverterne ofte jævnt fordelt i solcelleparken og monteret på rækkerne af solpaneler. Dette medfører, at panelerne kan fungere som støjafskærmning i nogle retninger og reflektere lidt af støjen i andre retninger. Det vurderes i udgangspunktet, at man ved støjberegninger kan se bort fra panelernes indvirkning. Dette repræsenterer en worst-case betragtning, da den skærmende virkning forventes at være større end refleksionsbidraget. Panelerne er vinklet, og den første refleksion af støjen rammer terrænet, der som oftest er akustisk blødt terræn bestående af jord og græs og dermed absorberer en del af lyden.

Mellem- og højspændingstransformatorer er normalt placeret i en afstand til solpanelerne, der gør, at det direkte refleksionsbidrag samt den afskærmende virkning af solpanelerne vurderes uden betydning.

3 Metode

Undersøgelsen baserer sig på målinger udført af Sweco i eksisterende solcelleparker. Disse suppleres med data fra støjberegninger, som er udført i forbindelse med planlægning og miljøvurderinger for solcelleanlæg.

De enkelte rapporter er fortrolige og frigives derfor ikke, idet de er et anliggende mellem Sweco og de pågældende rekvirenter. I de fleste tilfælde er datablade og andet materiale dog offentligt tilgængelige fra leverandørernes hjemmeside. Resultater fra de udførte kildestyrkemålinger præsenteres på et overordnet niveau. En mere detaljeret præsentation af de enkelte målinger er fravalgt af hensyn til rapportens omfang og læsbarhed.

Kombinationen af målinger og beregningsdata muliggør et bredere datagrundlag for vurdering af støjforholdene end målinger alene.

På baggrund af det samlede datagrundlag opstilles generaliserede støjdata, som vurderes egnede til anvendelse i screeningsfasen for solcelleparker, i tilfælde hvor projektspecifikke støjdata ikke er tilgængelige. De generaliserede støjdata omfatter invertere og kombinerede inverter- og transformatorenheder. For trackere og selvstændige transformatorer vurderes datagrundlaget ikke tilstrækkeligt til fastlæggelse af generaliserede værdier.

3.1 Målinger

Sweco har i juni, juli og august 2024 udført målinger i fire eksisterende solcelleparker. Målingerne er udført efter aftale med ejerne af solcelleparkerne, som har stillet anlæggene til rådighed. Målingerne er udført som kildestyrkemålinger samt to supplerende langtidsmålinger af døgnvariansen af støjen og en enkelt undersøgelse af den støjafskærmende virkning af et solpanel.

3.1.1 Kildestyrkemålinger

Der blev udvalgt fire måledage i sommerperioden med fuld sol og målingerne er foretaget indenfor tidsrummet kl. 10-15 for at sikre højest mulig produktion. En oversigt over målingerne er vist i Tabel 1. Formålet var at foretage identifikation samt bestemmelse af kildestyrken for alle relevante støjklender ved maksimal produktion. Kildestyrkemålinger er udført i henhold til Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 5, 1993 "Beregning af ekstern støj fra virksomheder". Målsætningen var at bestemme kildestyrken fra mindst tre invertere og transformatorer af samme type for hver solcellepark og fastlægge middelværdi og spredning på resultaterne. Kildestyrkerne er bestemt som A-vægtede 1/3-oktav lydeffektspektre fra 10 Hz til 20 kHz.

Der blev lagt begrænset vægt på bestemmelse af kildestyrken for trackere, idet disse på forhånd blev vurderet at have mindre betydning for den samlede støjbelastning. Denne vurdering blev bekræftet, idet der under målingerne blev målt relativt lave kildestyrker og driften var kortvarig. Der blev foretaget målinger på et begrænset antal trackere i de tre solcelleparker med trackersystemer. Måleforholdene omkring trackerne var vanskelige da de var automatisk styret og kun kørte i kort tid ad gangen, og det derfor ikke var muligt at forudse hvornår en tracker gik i gang. I den ene af parkerne var det dog muligt efter aftale med ejeren at styre trackerne manuelt under målingerne. Målingerne blev foretaget længst muligt fra invertere og transformatorer for at reducere baggrundsstøjen.

Tabel 1. Oversigt over måledage til kildestyrkemålinger.

Solcellepark	Dato	Tidsrum	Skydække	Trackersystem
Greenlab	25-06-2024*	12.15-14.30	0/8-2/8	Ja
Høvsøre	28-08-2024	10.00-14.30	0/8-1/8	Ja
Veddum Kær	26-06-2024*	11.30-14.00	0/8	Ja
Vemb	30-07-2024	11.15-12.45	0/8-1/8	Nej

*Støj fra Trackerenheder er målt under højere skydække d. 03-07-2024. Støjen fra disse enheder afhænger ikke af anlæggets effektproduktion.

3.1.2 Målinger af døgnvarians

Der er supplerende udført målinger af støjens tidsvarians over en uge i to af solcelleparkerne. Formålet var at undersøge hvordan faldet i anlæggets produktion i aften og natperioderne, samt på dage med overskyet vejr, påvirkede støjudsendelsen.

Til målingerne blev benyttet monitoreringsenheder placeret i ét referencepunkt i parken. I den ene park var målepositionen placeret nær en samling af fem invertere og i den anden park ved et kombineret inverter og transformator anlæg med høj effekt. Begge solcelleparker lå i forbindelse med en vindmøllepark. Målingerne blev foretaget i positioner hvor den målte støj var domineret af solcelleanlæggene i de perioder, hvor de var i drift. I natperioden, hvor støjen fra anlæggene var reduceret markant, forventedes det, at den målte støj er relateret til baggrundsstøjen fra vindmølleparkerne samt en nærliggende vej ved den ene park. Målepositioner er vist i Figur 1 og Figur 2. Billedet i Figur 1 er taget på dagen, hvor måleren blev afmonteret, og ikke på dagen for kildestyrkemålingerne på invertere og transformatorer. Dette er anført for at undgå misforståelser, da kildestyrkemålingerne blev udført i skyfrit vejr, mens Figur 1 viser skydække.

Støjen blev målt som det ækvivalente A-vægtede lydtrykniveau med en midlingstid på et minut, $L_{Aeq,1min}$, for hele måleperioden. Der er frasorteret kortvarige perioder med høj baggrundsstøj. Resultaterne er efterfølgende normaliseret ved at fratrække den højeste målte $L_{Aeq,1min}$. Den normaliserede størrelse er angivet som $\Delta L_{Aeq,1min}$ og beskriver reduktionen i forhold til den maksimale støjudsendelse.

For hver halve klokke blev der beregnet en energimiddelværdi af $\Delta L_{Aeq,1min}$ med henblik på at estimere reduktionen i forhold til den maksimale støj. En halvtimes referenceperiode er valgt, da dette svarer til det korteste referencetidsrum for vurdering af støjen i natperioden i henhold til Vejledning nr. 5, 1984 fra Miljøstyrelsen "Ekstern støj fra virksomheder".

Figur 1. Placering af måleposition til måling af døgnvarians fra en samling af fem invertere. Målepositionen er markeret med en rød ring.



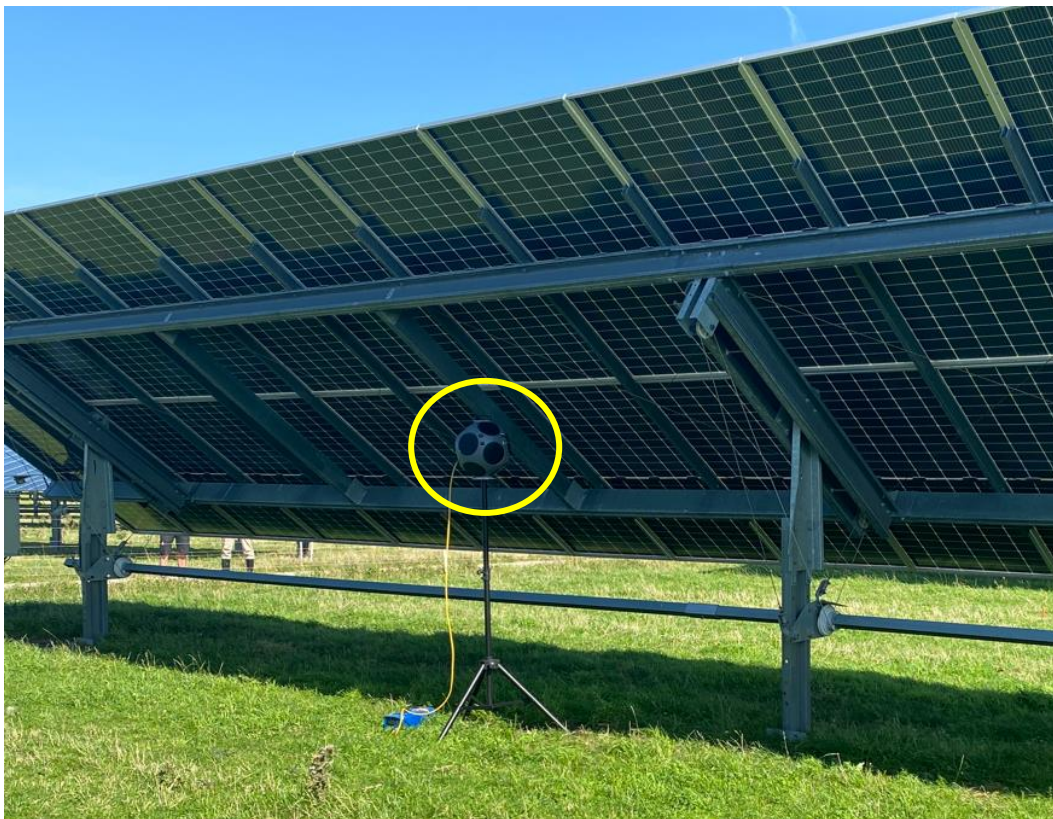
Figur 2. Placering af måleposition til måling af døgnvarians fra en samling af et kombineret inverter og transformator anlæg. Målepositionen er markeret med en rød ring.



3.1.3 Målinger af solpanels betydning for udbredelsen

I den ene af de tre solcelleparker med trackere var der aftalt mulighed for manuelt at styre vinklen på solpanelerne under målingerne. Her blev der i forbindelse med kildestyrkemålingerne foretaget en supplerende undersøgelse af panelernes indflydelse på lydudbredelsen. Der blev benyttet en rundstrålende højttaler der spillede et bredbåndet støjsignal. Der blev benyttet en højttaler for at sikre et godt signal-støjforhold, da højttaleren havde en betydeligt højere støjudsendelse end støjkilderne i solcelleparken. Det var desuden muligt at placere højttaleren væk fra de øvrige støjkilder, og dermed begrænse deres indflydelse på målingen. Solpanelet var vinklet 35 grader i forhold til vandret, den laveste side af solpanelet var 0,9 m over terræn og højttaleren var placeret i en højde på 1,8 m over terræn ud for midten af panelets bredde. Der blev foretaget målinger i fem positioner i henholdsvis 0, 45, 90, 135 og 180 grader i fem meters højde over terræn og otte meters vandret afstand fra højttaleren. For at undgå at de øvrige paneler reflekterede lyden blev målingerne foretaget midt på dagen, hvor de øvrige paneler var vinklet tæt på horisontalt. Placeringen af højttaleren er vist i Figur 3 og eksempler på placeringen af målepositionerne er vist i Figur 4.

Figur 3. Placering af højttaler til måling af den støjafskærmende virkning af et solpanel. Højttaleren er markeret med gul cirkel.



Figur 4. Eksempel på placering af målepositioner i 5 m højde. Måleposition 180 grader (til venstre) og 90 grader (til højre). Målepositionerne er markeret i rødt og højtaleren er markeret med gul.



3.2 Data fra leverandører

Sweco har i forbindelse med beregninger af planlagte solcelleparker modtaget oplysninger fra udviklerne om forventede støjdata fra anlæggenes enheder. Kvaliteten af støjdata varierer meget. Somme tider er støjen oplyst som lydeffektniveauer (kildestyrker), men oftest er data angivet som støjen målt i en afstand, typisk 1 meter eller 10 meter fra enheden, uden at der er angivet forudsætninger for støjmålingen, såsom måleopstilling, placering af enhed og målemikrofon og reflekterende flader i nærheden. Informationerne indeholder normalt ikke frekvensfordelinger i form af 1/3-oktav eller 1/1-oktav værdier.

I leverandørernes datablade er der i mange tilfælde ikke oplysninger om støjen. I de tilfælde hvor støjen er angivet, er der ofte ikke oplyst om støjtallet angiver kildestyrken eller lydtrykniveauet målt i en afstand fra enheden. I nogle tilfælde er støjen angivet som en maksimal støj (støj er mindre end eller lig med) og i andre tilfælde som en forventet støj. Det er ofte ikke oplyst om støjtallet er A-vægtet eller uden frekvensvægtning (dB(A) eller dB(Z)).

3.2.1 Fastlæggelse af kildestyrker fra leverandørdata

Der er i denne undersøgelse udelukkende anvendt støjdata fra datablade, hvor det er oplyst, om støjen er angivet som lydeffektniveau eller lydtrykniveau i en afstand, og hvor den pågældende måleafstand i givet fald er oplyst. Kildestyrker er beregnet fra den målte støj i henhold til Miljøstyrelsens vejledning nr. 5, 1993 "Beregning af ekstern støj fra virksomheder", under antagelsen, at støjen er målt svarende til en kassemåling over ét reflekterende plan og overfladearealet af måleboks og referenceboks er beregnet fra enhedens dimensioner.

Der er benyttet data, som er angivet A-vægtet i databladet.

3.3 Databehandling

I dette afsnit beskrives den videre databehandling af støjdata, som danner grundlag for fastlæggelse af de generaliserede kildestyrker for invertere. Databehandlingen tager udgangspunkt i både målte kildestyrker og kildestyrker fastlagt på baggrund af leverandørplysninger.

I databehandlingen skelnes der mellem fastlæggelse af generaliserede totalniveauer for kildestyrker og fastlæggelse af kildestyrkespektre. Kildestyrkernes totalniveau baseres på både målinger og leverandørdata (afsnit 3.3.3), mens de anvendte kildestyrkespektre (frekvensfordelinger) udelukkende er baseret på målinger (afsnit 3.3.4)

3.3.1 Kategorisering af støjdata

Indledende analyser viste, at støjudsendelsen overordnet hænger sammen med enhedernes effektkapacitet. På denne baggrund er støjdata struktureret og grupperet i effektkategorier, hvorefter der inden for hver kategori er foretaget statistisk behandling af data, herunder bestemmelse af middelværdier og usikkerheder. Leverandørstøjdata, som indgår i undersøgelsen, er vægtet lige i forhold til de målte støjdata ved opstilling af datagrundlaget.

3.3.2 Usikkerheder

Usikkerheder er estimeret svarende til fremgangsmåden beskrevet i Orientering nr. 36 fra Miljøstyrelsens referencelaboratorium for støjmålinger. Standardusikkerheden σ , for hver af de målte støjklender er estimeret ved stikprøvestandardafvigelsen defineret som:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n L_{p,i}^2 - (\sum_{i=1}^n L_{p,i})^2}{n \cdot (n - 1)}}$$

Hvor

$L_{p,i}$ er måleresultat nr. i, i [dB]

og

n er antallet af måleresultater for den pågældende type.

I tilfælde hvor der udelukkende er målt ét eksemplar af en støjkilde er kildestyrken bestemt med en standardusikkerhed på 2 dB og 3 dB for henholdsvis gode og mindre gunstige forhold i henhold til Orientering nr. 36. Eksempler på gode forhold er målinger udført i fravær af refleksioner i en passende afstand fra støjklenden og uden betydende baggrundsstøj. Disse forhold gjorde sig generelt gældende på målinger på transformatorer og på invertere med høj kapacitet. Eksempler på mindre gunstige forhold, er hvor invertere og trackere har været placeret tæt på solpanelernes reflekterende flade og målinger på trackere hvor målingerne har været påvirket af baggrundsstøj.

Standardusikkerheden på oplyste støjdata fra datablade benyttet i denne undersøgelse vurderes at være 5 dB.

3.3.3 Fastlæggelse af generaliserede kildestyrker

Inden for hver effektkategori er der foretaget fastlæggelse af en generaliseret kildestyrke på baggrund af de tilgængelige støjdata fra de udførte kildestyrkemålinger samt datablade. Værdien er beregnet som den aritmetiske

middelværdi af kildestyrkerne for de invertere, der indgår i den pågældende effektgruppe. Den estimerede standardusikkerhed for hver enkelt invertertype i hver af de tre effektgrupper, σ , bruges til at bestemme den kombinerede standardusikkerhed for den pågældende effektgruppe ved at benytte udtryk (5) fra orientering nr. 36:

$$\sigma_{kil} = \frac{\sqrt{\sum_i^n \left(\sigma_i \cdot 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \right)^2}}{\sum_i^n 10^{\frac{L_{p,i}}{10}}}$$

Hvor

$L_{p,i}$ er støjkilde nr. i, i [dB]

og

n er antallet af forskellige støjklender i gruppen.

3.3.4 Fastlæggelse af generaliserede kildestyrkespektre

Fastlæggelsen af generaliserede kildespektre er baseret udelukkende på måledata. Dette valg er truffet, fordi de udførte målinger vurderes at give det mest pålidelige grundlag for bestemmelse af støjens frekvensfordeling, og fordi leverandørdata i de fleste tilfælde ikke indeholder oplysninger om frekvensfordelingen. For hver effektkategori er det gennemsnitlige kildestyrkespektrum af de målte støjdata inden for gruppen bestemt. De resulterende kildestyrkespektre er derefter normaliseret til den samlede overordnede kildestyrke for gruppen.

4 Resultater

Resultatafsnittet fokuserer primært på kildestyrker og kildespektre for invertere og kombinerede inverter- og transformatorenheder, idet disse i de fleste tilfælde vil være de dominerende støjklender i solcelleparker, og idet datagrundlaget her er størst.

Elektriske anlægsdele i solcelleparker angives i praksis både ved aktiv effekt (kW) og ved tilsyneladende effekt (kVA), afhængigt af type, leverandør og datatilgængelighed. For små og mellemstore invertere er den nominelle aktive effekt (kW) den mest anvendte og tilgængelige parameter i projektmateriale og datablade. For transformatorer samt for kombinerede inverter- og mellemspændingstransformatorenheder foreligger effektangivelser ofte som tilsyneladende effekt (kVA), og i enkelte tilfælde er dette den eneste tilgængelige effektoplysning. Det bemærkes, at aktiv effekt (kW) og tilsyneladende effekt (kVA) ikke er identiske størrelser, men at forskellen mellem disse størrelser for de betragtede enheder vurderes at være uden betydning for gruppering af støjklender og for den overordnede støjvurdering.

En oversigt over de målte enheder og enheder med leverandør oplyst støjdata er vist i henholdsvis Tabel 2 og Tabel 3.

Tabel 2. Oversigt over målte enheder.

Kildetype	Mærke	Type	Antal målinger	Nominel effekt** [kW/kVA]	Kildestyrke, L_{WA} [dB(A)]	Standardusikkerhed [dB]	Effektgruppe (invertere)
Inverter	Huawei	SUN2000-36KTL	3	36 kW	60,6	2,3	1
Inverter	Huawei	SUN2000-36KTL-M3	3	36 kW	69,1	1,8	1
Inverter	Sungrow	SG 250HX	3	225 kW	89,4	1,3	2
Inverter + transformator (MS)	SMA	MVPS 4000	4	4000 kVA	96,3	2,2	3
Inverter+transformator (MS)	Gamesa Electric	PV 2X series	3	5000 kVA	95,2	2,2	3
Transformator (MS)	Priess	5000 kVA	3	5000 kVA	89,1	2,2	-
Transformator (MS)	Priess	Ikke kendt	2	500 kW	59,1	3,6	-
Transformator (HS)	Retrasib/Følsgaard	Retrasib/Følsgaard	1	Ikke oplyst	86,5	2,0	-
Tracker	Soltigua	SLVE7.2	3	-	57,6*	2,4	-
Tracker	Soltigua	SIVE7.8	1	-	67,1*	2,0	-

*Kildestyrker for trackere er driftidskorrigeret med 17 dB svarende til anslået drift i 6 sekunder hvert 5. minut. **Effektangivelser er angivet som enten aktiv effekt (kW) eller tilsyneladende effekt (kVA), afhængigt af datatilgængelighed. I nærværende undersøgelse skelnes der ikke mellem disse størrelser, idet forskellen vurderes uden betydning for gruppering af støjklender og den overordnede støjvurdering.

Tabel 3. Oversigt over enheder med leverandør oplyst støjdata.

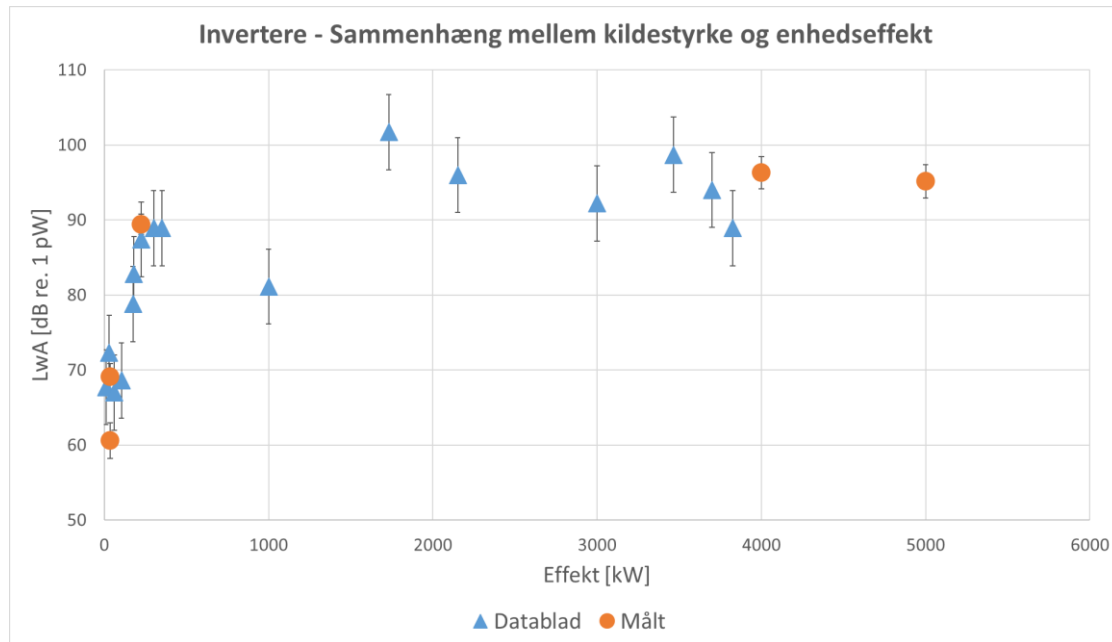
Kildetype	Mærke	Type	Nominel effekt** [kW/kVA]	Kildestyrke, L _{WA} [dB(A)]	Effektgruppe
Inverter	KACO	XP10U H6/H6	10	67,7	1
Inverter	SMA	Sunny Tripower X 30	30	72,3	1
Inverter	Sungrow	SG60UK-M	60	67,0	1
Inverter	Huawei	SUN2000- 105KTL-H1	105	68,6	1
Inverter	Huawei	SUN2000- 185KTL-H1	175	78,8	2
Inverter	SMA	Sunny Highpower SHP 180-21	180	82,8	2
Inverter	Sungrow	SG250HX	225	87,4	2
Inverter	Huawei	SUN2000- 330KTL-H1	300	88,9	2
Inverter	Sungrow	SG320HX	352	88,9	2
Inverter+transformator (MS)	AESS	PSC1000	1000	81,1	3
Inverter+transformator (MS)	FIMER	PVS800- 57B- 1732kW-C	1732	101,7	3
Inverter+transformator (MS)	SUNWAY	TG 1800 - 1500V TE - 690	2152	96,0	3
Inverter+transformator (MS)	Zigor	ZGR Solar CTRh 3300	3000	92,2	3
Inverter+transformator (MS)	Power Electronics S.L.	HEM FS3350M	3465	98,7	3
Inverter+transformator (MS)	Ingecon	SUN 3700TL	3700	94,0	3
Inverter+transformator (MS)	Ingecon	SUN 3825TL	3825	88,9	3

**Effektangivelser er angivet som enten aktiv effekt (kW) eller tilsyneladende effekt (kVA), afhængigt af datatilgængelighed. I nærværende undersøgelse skelnes der ikke mellem disse størrelser, idet forskellen vurderes uden betydning for gruppering af støjkloder og den overordnede støjvurdering.

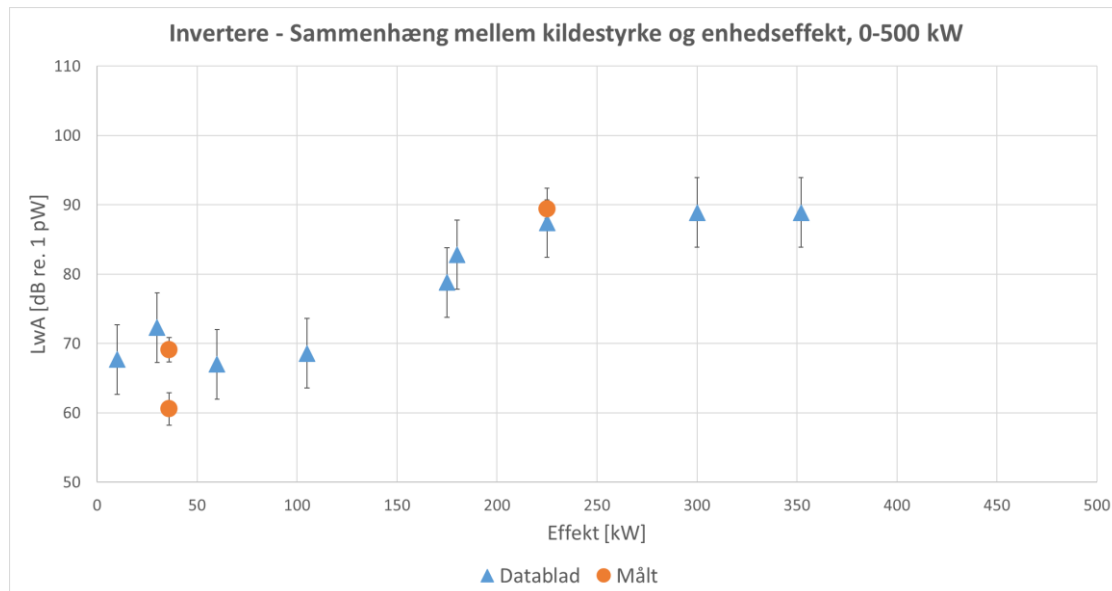
4.1.1 Kildestyrker – målte og beregnede fra datablade

De fastlagte kildestyrker for inverterne som funktion af effekt er angivet i Figur 5 sammen med de individuelle standardusikkerheder, angivet som bjælker. Blå trekantede datapunkter angiver værdier fra datablade og orange runder datapunkter angiver værdier fra målinger. Figur 6 viser et forstørret billede af området fra 0-500 kW for at vise detaljerne af dette område.

Figur 5. Inverter kildestyrker som funktion af effekt. 0-5000 kW.



Figur 6. Inverter kildestyrker som funktion af effekt. 0-500 kW.

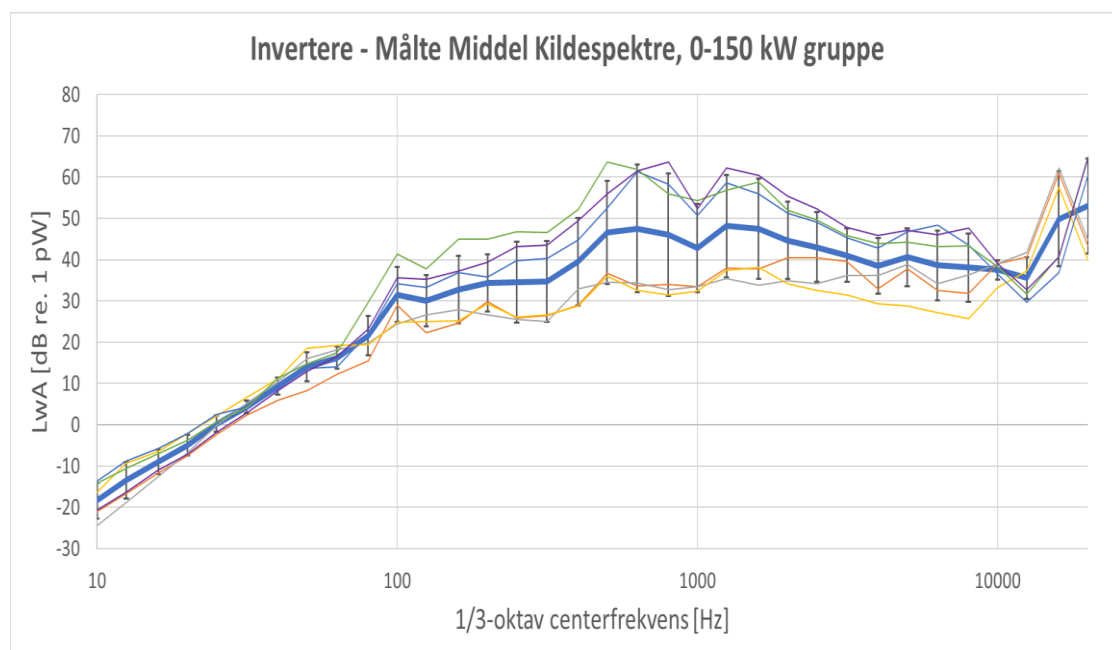


4.1.2 Kildespektre – målte

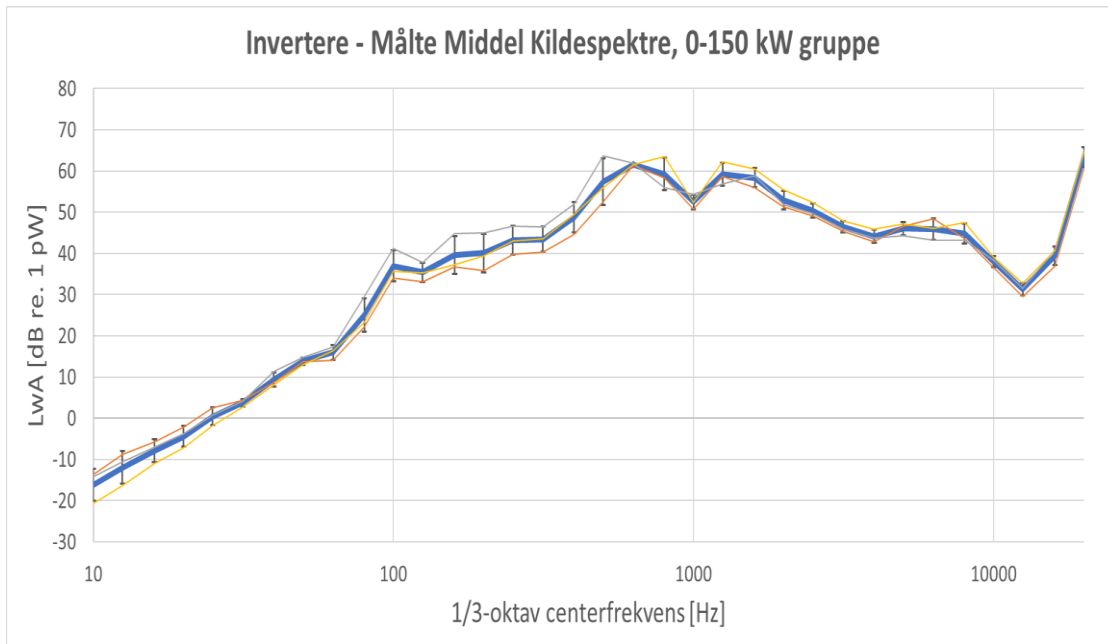
For de invertere i effektområdet 0–150 kW blev der observeret en stor variation i de målte kildestyrkespektre. Resultaterne er vist i Figur 7. Der blev målt på to typer invertere. Den mindst støjende inverter type lå i størrelsesordenen 10 dB lavere end den mest støjende inverter type, og støjen var fra de mindst støjende domineret af højfrekvent indhold. Begge typer af invertere er ifølge de tilknyttede datablade kølet gennem passiv køling, og støjen stammer derfor ikke fra ventilatorstøj.

Da støjudsendelsen fra den mindst støjende målte type inverter ligger meget lavt, og er domineret højfrekvent støj over 10 kHz, som effektivt dæmpes med afstanden i lyddbredelsen mod naboer, vurderes det ikke at være hensigtsmæssigt at benytte disse målte kildestyrkespektre til at repræsentere invertere i effektområdet 0-150 kW. Ved fastlæggelse af et repræsentativt kildestyrkespektrum for denne gruppe er der taget udgangspunkt i den mest støjende type. Dette er valgt for at sikre et konservativt, men realistisk grundlag for støjberegningerne. Det resulterende benyttede middelspektrum er vist i Figur 8. Den overordnede A-vægtede kildestyrke for de mindst støjende invertere indgår dog i fastlæggelsen af den overordnede A-vægtede kildestyrke for effektgruppen.

Figur 7. Målte spektr for invertere med effekt mellem 0-150 kW. Alle målte invertere.

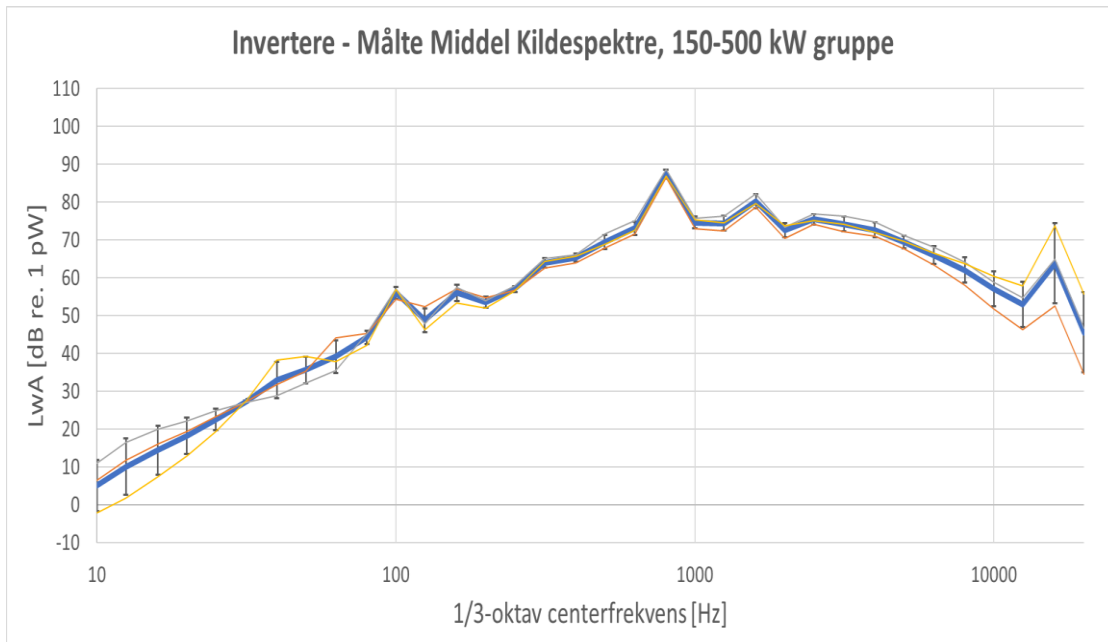


Figur 8. Målte spektre for invertere med effekt mellem 0-150 kW. Kun invertere af den mest støjende type.

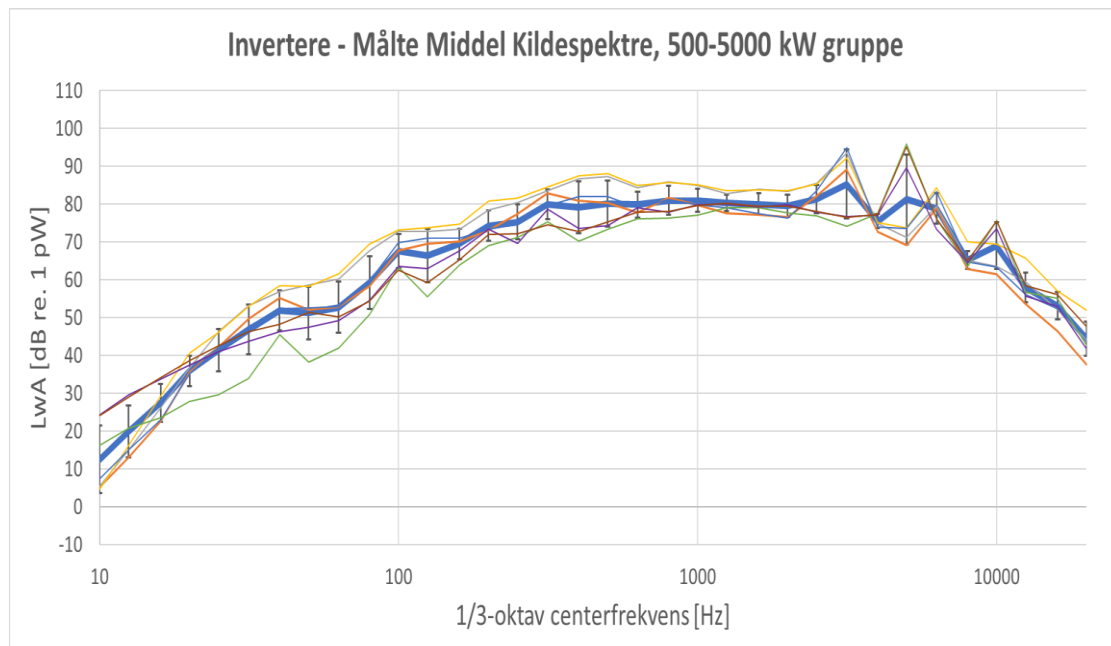


De målte kildestyrkespektre for invertere i effektgruppen 150–500 kW er vist i Figur 9 og for 500-5000 kW i Figur 10.

Figur 9. Målte spektre for invertere med effekt mellem 150-500 kW.



Figur 10. Målte spektre for invertere med effekt mellem 500-5000 kW.



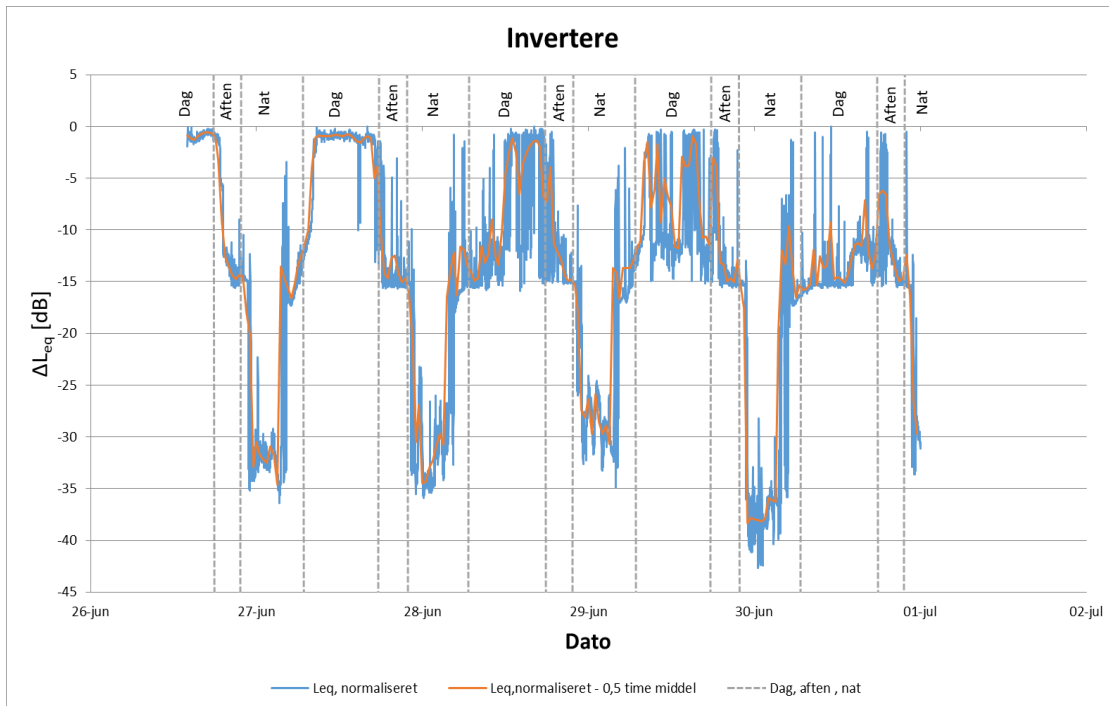
4.1.3 Døgnvarians – målt

Resultaterne af målingerne af støjens døgnvarians for invertere er vist i Figur 11 for en samling af fem invertere og i Figur 12 for en kombineret inverter og mellemspændings transformatoranlæg. Resultaterne er vist som relative (normaliserede) niveauer over henholdsvis fem og seks dage i forhold til den maksimale målte støjudsendelse under fuld produktion. De blå kurver viser 1-min værdier og de orange kurver viser værdier midlet over 0,5 time.

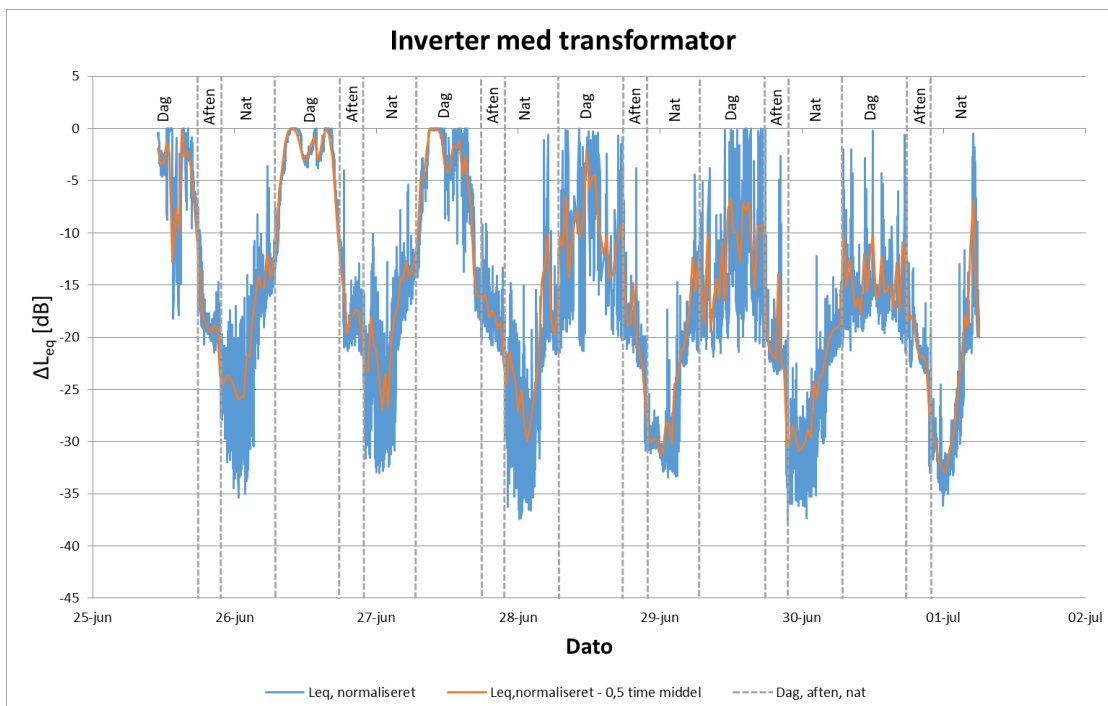
I begge tilfælde observeres reduktioner i de målte niveauer på mere end 30 dB sammenlignet med dagperioder med fuld drift. I aftenperioden ses tilsvarende reduktioner på omkring 15 dB. Niveauændringerne afspejler ændringer i driftsforhold over døgnet. Det vurderes sandsynligt, at den observerede reduktion på 30 dB i dele af natperioden er begrænset af baggrundsstøjen, og at den faktiske reduktion kan have været større.

Det bemærkes dog, at støjen stiger i de tidlige morgentimer inden kl. 7 som er tidspunktet hvor støjgrænserne overgår fra skærpede støjgrænser i nat til dagstøjgrænser. Der er enkelte tidspunkter hvor den 0,5 time middelværdi for støjen kun er reduceret med 10 dB. Det anbefales derfor, at en indregnet reduktion af støjen fra invertere i natperioden (kl. 22-07) begrænses til 10 dB.

Figur 11. Relative målte støjniveauer i forhold til den maksimale målte støj under fuld produktion. Samling af 5 invertere.



Figur 12. Relative målte støjniveauer i forhold til den maksimale målte støj under fuld produktion. Kombineret inverter og mellemspændings transformatoranlæg.



4.1.4 Solpanels indflydelse på lydudbredelsen

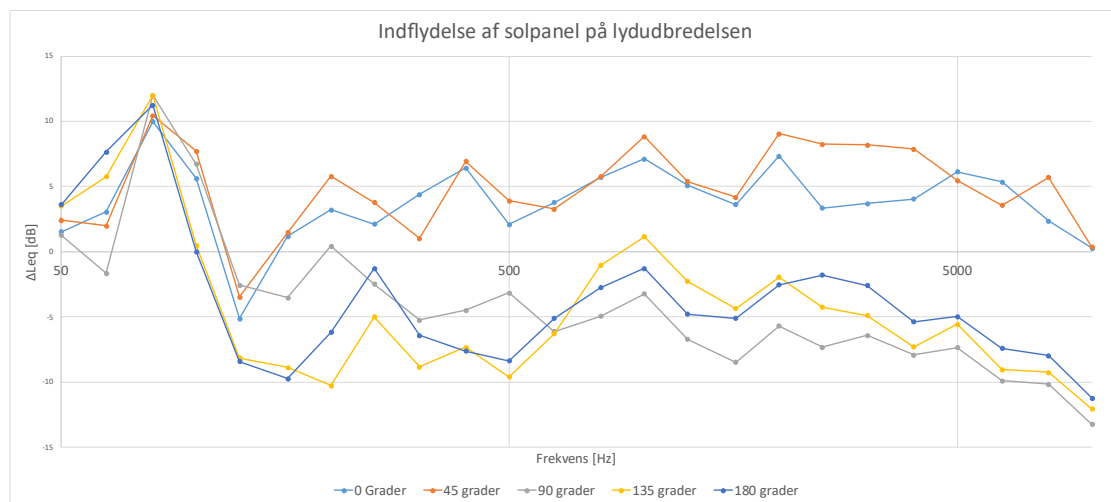
Figur 13 viser resultaterne af undersøgelsen af et solpanels indflydelse på lydudbredelsen fra en støjkilde placeret tæt ved panelet. Resultaterne er vist som niveaudifferensen i forhold til en reference, hvor støjilden er placeret frit og væk fra panelet. Positive værdier angiver, at støjen er forstærket, mens negative værdier angiver, at støjen er reduceret som følge af panelet.

På støjildens side af panelet (0° og 45°) er der målt en støjforstærkning i størrelsesordenen 3–5 dB i frekvensområdet 500–5000 Hz, som falder sammen med det frekvensområde, hvor invertere i effektgruppe 1 og 2 (små og mellemstore invertere) har deres primære støjudsendelse. Invertere i effektgruppe 3 (store kombinerede invertere og transformatorer) forventes derimod ikke at være placeret umiddelbart op af panelerne. Bag panelet (90°–180°) er der observeret en dæmpning af støjen.

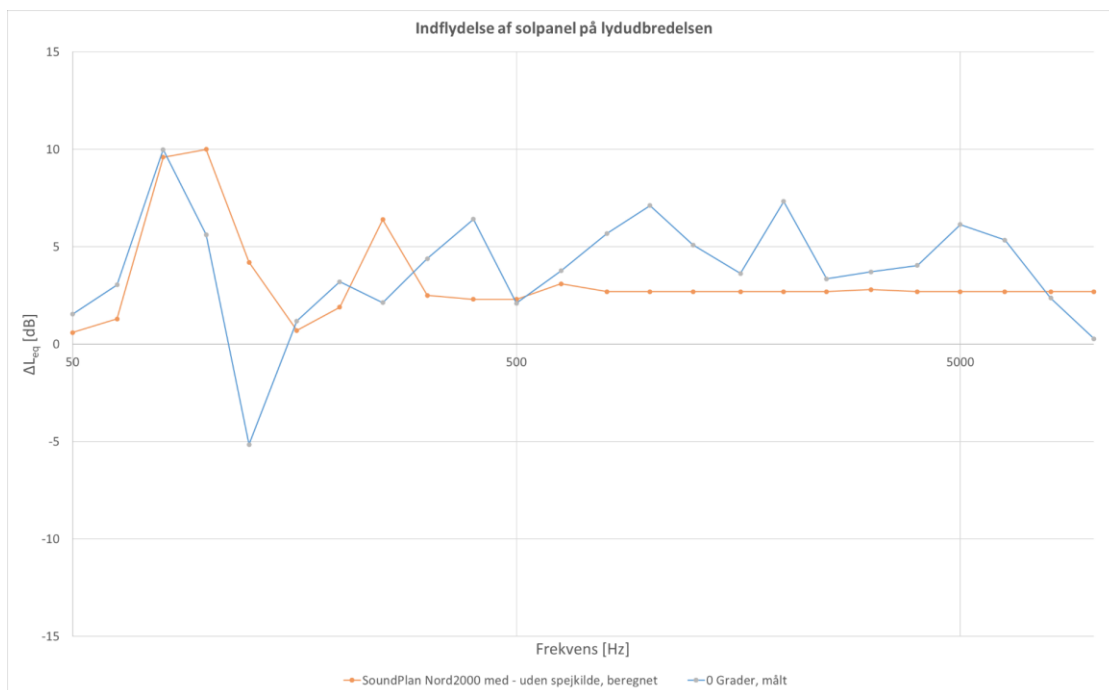
I det lavfrekvente område ses frekvensafhængige variationer, som tilskrives interferens mellem den direkte og reflekterede lyd.

Måleresultaterne er sammenlignet med Nord2000 beregninger udført i SoundPlan version 9.0. Resultaterne er vist i Figur 14, hvor den blå linje viser den målte niveauforskel med og uden panelets effekt, mens den orange linje viser det tilsvarende beregningsresultat for samme geometri. Sammenligningen mellem måleresultaterne og Nord2000-beregningerne viser en god overensstemmelse. Beregningerne understøtter, at de målte niveauforskelle er i overensstemmelse med den forventede effekt af at placere en støjkilde tæt ved en hård, plan flade, hvor refleksioner kan medføre en forøgelse af lydniveauet i størrelsesordenen 3 dB.

Figur 13. Solpanels indflydelse på lydudbredelsen for en støjkilde (højtaler) placeret tæt på panelet.



Figur 14. Sammenligning af målt niveaudifferens og beregnet niveaudifferens i 0 grader.



5 Diskussion

På tværs af de gennemførte målinger fremstår invertere og kombinerede inverter- og transformatorenheder som de dominerende støjklender, hvilket understøttes af de målte kildestyrker og indsamlede leverandørdata. Øvrige anlægsdele, herunder trackere og selvstændige transformatorer, bidrager generelt i mindre grad til det samlede støjniveau. Antallet af selvstændige transformatorer er desuden væsentligt lavere end antallet af invertere, og de målte kildestyrker for transformatorer ligger overvejende på niveau med eller under kildestyrken for mellemstore og store invertere (effektgruppe 2 og 3). Dette udelukker dog ikke, at selvstændige transformatorer i konkrete tilfælde kan have væsentlig betydning for den samlede støjpåvirkning.

Inddelingen af invertere i effektgrupper viser en tydelig sammenhæng mellem enhedernes effektkapacitet og deres kildestyrke. Denne sammenhæng danner grundlag for fastlæggelse af generaliserede støjdata for de enkelte effektgrupper, som kan anvendes i planlægnings- og screeningsfasen, hvor projektspecifikke leverandørdata ofte ikke foreligger. Samtidig viser variationen inden for de enkelte grupper, at der fortsat kan være betydelige forskelle mellem specifikke enheder. De generaliserede støjdata bør derfor anvendes med den angivne usikkerhed og kan ikke erstatte projektspecifik dokumentation i senere faser.

De målte kildespektre for invertere viser, at støjuddannelsen overvejende er koncentreret i det mellem- og højfrekvente område. Samtidig observeres en stigende andel af lav- og mellemfrekvent støj med stigende inverter effekt, hvilket indikerer, at større enheder i højere grad bidrager til støjuddannelsen i de lavere frekvensbånd.

Undersøgelsen af støjens døgnvariation viser, at støjuddannelsen fra invertere varierer over døgnet som følge af variationer i produktionen, der er knyttet til solindstrålingen. Dette indikerer, at støjbidraget fra solcelleparker i vid udstrækning er forudsigeligt og kan håndteres inden for rammerne af eksisterende beregningsmetoder ved at indregne inverter driftens tidsmæssige variation med lavere støjuddannelse i natperioden.

De supplerende undersøgelser af solpanelers indflydelse på lydudbredelsen viser, at paneler lokalt kan medføre både forstærkning og dæmpning af støj afhængigt af den konkrete kilde-modtager-geometri. På støjklendes side af panelet er der målt en forstærkning i størrelsesordenen 3-5 dB, hvilket er i overensstemmelse med kendte refleksionseffekter fra hårde, plane flader. Sammenligning med Nord2000-beregninger viser, at disse effekter er forventelige og kan reproducere i modellen.

De observerede effekter vurderes primært at være relevante for mindre og mellemstore invertere, der placeres i umiddelbar nærhed af panelernes flader. Undersøgelserne er imidlertid gennemført for en specifik og forenklet opstilling, hvor en højttaler repræsenterer en inverter placeret i en tænkt position i forhold til panelet. Effekternes størrelse og retning vurderes i høj grad at være situationsbestemt.

Solpanelernes støjmæssige indflydelse afhænger væsentligt af inverteres placering samt af panelernes geometri, hældning og indbyrdes orientering. I opstillinger, hvor panelrækker er fast monteret og skiftevis orienteret mod øst og vest, således at panelernes toppe mødes og danner en sammenhængende konstruktion svarende til et saddeltag, vil panelerne kunne fungere som en

effektiv skærm, hvor der overvejende må forventes dæmpning af støjen. Omvendt kan opstillinger med enkeltstående panelrækker eller trackere med varierende hældning medføre både forstærkning og dæmpning afhængigt af den aktuelle orientering. På den baggrund anbefales det ikke at anvende en generel korrektion for solpanelers indflydelse på støjdbredelsen. Effekten afhænger væsentligt af inverteres placering i forhold til panelerne samt af panelernes geometri, hældning og udstrækning. I praksis kan visse panelopstillinger medføre overvejende dæmpning, eksempelvis hvor panelrækker danner en sammenhængende skærm, mens opstillinger med trackere kan medføre varierende effekter afhængigt af panelernes aktuelle vinkel. Solpanelers indflydelse på støjdbredelsen bør derfor vurderes konkret for det enkelte projekt

6 Konklusioner

På baggrund af den gennemførte undersøgelse, baseret på målinger og datablade, er der fastlagt foreslåede generaliserede tabelværdier for kildestyrker fra invertere, som kan anvendes ved støjberegning for solcelleparker. Værdierne er angivet i Tabel 4. De angivne LwA-værdier bør primært anvendes i mangel af bedre, projektspecifikke data. Inverterne er opdelt i tre effektgrupper (0-150 kW, 150-500 kW og >500 kW), og 1/3-oktavbåndene er normaliseret til den beregnede middelværdi for det A-vægtede lydeffektniveau, LwA, for den enkelte gruppe.

Ved anvendelse af de angivne LwA-værdier anbefales det, at den udvidede usikkerhed indregnes. Dette kan enten ske ved at tillægge usikkerheden til de angivne LwA-værdier, eller ved at usikkerheden præsenteres i forbindelse med beregningsresultater.

For transformatorer og trackere er datagrundlaget begrænset. Trackerne er kun undersøgt i begrænset omfang, idet de generelt har udvist lave støjudsendelser i forhold til invertere, og derfor ikke er prioriteret undersøgt yderligere. For transformatorer skyldes det begrænsede datagrundlag, at disse i mange tilfælde har været integreret i inverterenheder. Der er derfor ikke foretaget en gruppering eller fastlagt generaliserede data for transformatorer, selv om disse i konkrete tilfælde kan have væsentlig betydning for den samlede støjpåvirkning; i stedet er der præsenteret de tilgængelige LwA-værdier fra målinger og datablade.

Undersøgelsen understøtter, at der ved støjberegninger med rimelighed kan antages en reduktion af støjen fra invertere på 10 dB i natperioden (kl. 22-07). Denne antagelse er i overensstemmelse med de observerede døgnvariationer i undersøgelsen.

Delundersøgelsen af solpanelernes indflydelse på støjbredelsen viser, at paneler kan have en retningsafhængig effekt på lydudbredelsen. Der blev observeret en dæmpning på den side, der vendte væk fra panelerne, samt en forstærkning som følge af refleksion på den side, hvor inverterne er placeret i forhold til panelerne. Effekten vurderes at være stærkt situationsafhængig og relateret til inverteres placering relativt til panelerne, og det anbefales derfor ikke at indregne en fast korrektion for effekten af panelerne i støjberegninger. Solpanelers indflydelse på støjbredelsen bør i stedet vurderes konkret for det enkelte projekt på baggrund af den faktiske panelopstilling og placering af invertere.

Tabel 4. Foreslåede generaliserede støjdata for invertere.

Gruppe	1		2		3	
Effekt	0-150 kW		150-500 kW		>500 kW	
LwA	67,5		85,0		93,8	
Udvidet Usikkerhed	3,8		3,6		3,7	
Frekvens	1/3-oktav	1/1-oktav	1/3-oktav	1/1-oktav	1/3-oktav	1/1-oktav
10	-17,3		0,7		13,9	
12,5	-13,1		5,7		21,3	
16	-9,0		10,1		28,9	
20	-5,5		13,7		37,3	
25	-0,7		18,1		42,8	
31,5	2,6		22,9		48,2	
40	8,3		28,5		53,3	
50	12,7		31,2		52,6	
63	14,8	24,7	34,7	41,5	54,1	62,0
80	23,9		39,9		60,6	
100	35,9		51,6		69,0	
125	34,3	41,4	44,4	55,0	67,8	74,1
160	38,5		51,6		70,9	
200	38,9		49,1		75,7	
250	42,1	46,1	52,6	60,7	76,7	83,4
315	42,3		59,5		81,3	
400	47,6		60,9		80,5	
500	56,3	62,0	65,0	70,7	81,5	85,9
630	60,5		68,7		81,3	
800	58,2		83,0		82,3	
1000	51,4	61,6	70,2	83,4	82,3	86,9
1250	58,1		70,0		81,8	
1600	57,3		75,8		81,4	
2000	51,7	58,8	68,1	77,6	80,9	86,5
2500	49,2		71,0		82,7	
3150	45,3		69,8		86,7	
4000	43,0	49,3	68,2	72,9	76,9	88,4
5000	44,9		65,1		82,6	
6300	44,8		61,6		80,2	
8000	43,7	47,6	57,6	63,5	66,6	80,8
10000	36,9		52,6		70,4	
12500	30,2		48,5		59,3	
16000	38,4	62,2	59,4	59,8	54,5	60,7
20000	62,2		41,2		45,9	