Metroselskabet

Kildestyrke for metrotog til beregning efter Nord2000 og CNOSSOS

T2.038.23

SWECO

Ændringsliste

Ver	Dato	Beskrivelse af ændringen	Revideret	Godkendt af
1.0		Oprindelig version		
1.1	08.12.23	Indsætning af manglende frekvenser i tabel 3	Stig Junge	Thomas H. Olsen

Sweco Danmark A/S	48233511
Projekt	Metroselskabet - kildestyrke
Projektnummer	41009224
Kunde	Metroselskabet I/S
Udfærdiget af	Stig Junge
Kontrolleret af	Thomas H. Olsen
Godkendt af	Thomas H. Olsen
Dato	2023-06-12
Dokumentnr.	T2.030.23
Dokumentnavn:	T2_038_23.docx

Indholdsfortegnelse

1 Indledning 5
2 Metode og begreber 5
3 Måletværsnit og målepunkter 6
3.1 Tværsnit 1: Islands Brygge – Sundby 7
3.2 Tværsnit 2: Sundby – DR Byen (Uni) 8
3.3 Tværsnit 3: Bella Center – Ørestad 8
3.4 Tværsnit 4: Flintholm – Lindevang 9
3.5 Toghastigheder 10

4 Analysemetoder 10
4.1 Normalisering til referencetværsnit 10
4.2 Metode for kildestyrke til Nord2000 11
4.3 Kildestyrke bestemt ved måling tæt på spor 11
4.4 Analyse af hjul-/skinneruhed 13

5 Resultater 14
5.1 Ruhedsniveau 14
5.2 Gennemsnitligt ruhedsspektrum 19
5.3 Baggrundsstøj 20
5.4 Kildestyrker til Nord2000 23
5.4.1 Beregnede niveauer sammenlignet med målte 25
5.5 Kildestyrke til CNOSSOS 27
5.6 Sammenligning med tidligere kildestyrker 28

6 Konklusion 30

Appendix A 32
Indgangsdata til SoundPLAN – Nord2000 model 32

Appendix B 33
Indgangsdata til SoundPLAN, CNOSSOS-model 33

Resumé

Metroselskabet har anmodet SWECO om at udføre målinger til bestemmelse af kildestyrker for metrotoget til brug for beregning af nabostøj i henhold til Nord2000 og CNOSSOS i SoundPlan.

Baggrunden er, at de hidtidige kildestyrker for Nord2000 og CNOSSOS har givet meget forskellige resultater i støjniveau og dermed også i det beregnede antal støjbelastede boliger. Her er det CNOSSOS, som har givet de højeste støjniveauer, ca. 15 dB højere end Nord2000.

Der har derfor været behov for en afklaring af, hvilke kildestyrker, der er de rigtige at anvende ved fremtidige støjkortlægninger.

SWECO har efter aftale med Metroselskabet udført et stort antal målinger på metrotoget i fire tværsnit med forskellige typer sporopbygning og i alt 8 forskellige sportværsnit.

Resultatet er, at de nye Nord2000-kildestyrker er betydeligt højere end de tidligere anvendte og de vil derfor give både højere støjniveauer og flere støjbelastede boliger i fremtidige støjkortlægninger.

Resultaterne viser også, at de fundne kildestyrker ligger forholdsvis tæt på kildestyrkerne i den gamle CNOSSOS-model.

Støjen fra Metrotoget kan trods forskelle i sporopbygning beskrives med ét sæt data, som anvendes generelt på alle sportyper, dog under den væsentlige forudsætning, at spor på slap track modelleres med fuldt reflekterende underlag, se Appendiks A og B, som angiver alle indgangsdata og beskriver, hvordan SoundPLAN sættes op for at give korrekte beregningsresultater.

Den forskel der ses mellem de gamle og de nye kildestyrker for Nord2000 er meget markant og på grund af konsekvenserne for fremtidige støjkortlægninger har den givet anledning til en grundig granskning af de udførte analyser og beregningsmetoder, og dette har blot bekræftet resultaterne. I rapportens konklusion diskuteres dette mere detaljeret.

1 Indledning

Metroselskabet har indgået aftale med SWECO om at bestemme kildestyrken for de tog, der kører på Københavns metro-linjer. Kildestyrken skal anvendes til kortlægning af støjemissionen langs metrolinjerne. Kildestyrken angives på to forskellige måder, der kan anvendes til støjkortlægning i henhold til metoderne Nord2000 og CNOSSOS.

2 Metode og begreber

Som grundlag for kildestyrken er der sammen med Metroselskabet udvalgt fire forskellige typer tværsnit, hvor der er udført måling af støjen fra de forbipasserende tog.

De fire tværsnit dækker følgende sportyper:

- Slap track
- Ballasteret spor på dæmning
- Ballasteret spor på viadukt
- Ballasteret spor i terræn

For at kunne vurdere gyldigheden af de fundne kildestyrker er det vigtigt at have kendskab til den samlede hjul-/skinneruhed. I alle tværsnit er der derfor – foruden måling af støjen – også foretaget indirekte måling af hjul-/skinneruhed ved hjælp af accelerometre monteret under skinnerne.

Hjul-/skinneruheden er bestemt ved hjælp af softwaren PBA, som er udviklet af TNO i Holland. Ved analyser af mikrofon- og accelerationssignalerne bestemmer PBA følgende parametre, som enten indgår i bestemmelsen af kildestyrken eller anvendes til en vurdering af de enkelte målingers kvalitet:

- Det gennemsnitlige lydtryksniveau, L_{eq}, pr. 1/3-oktav for hver togpassage (50 Hz – 10 kHz).
- Det gennemsnitlige accelerationsniveau, L_a, pr. 1/3-oktav for hver togpassage (50 Hz – 10 kHz).
- Det samlede hjul-/skinneruhedsniveau, L_r, pr. 1/3-oktav for hver togpassage, hvor intervallet for bølgelængde afhænger af hastigheden for det forbipasserende tog.
- Den samlede overføringsfunktion for tog og spor, L_{Hr}, pr. 1/3-oktav for hver togpassage (50 Hz – 10 kHz).

L_{eq} og L_a bestemmes over passagetiden for det enkelte tog.

Til vurdering af det samlede hjul-/skinneruhedsniveau anvendes parameteren $L_{\lambda CA,v}$, som fremkommer ved en summation af ruhedsniveauet efter at ruhedsspektret er vægtet på to måder: 1) Vægtning med en idealiseret overføringsfunktion, som repræsenterer omsætningen af ruhedsniveauet til udstrålet støj og 2) A-vægtning, som vægter spektrets 1/3-oktaver i forhold til ørets følsomhed. Omsætningen fra bølgelængde til frekvens afhænger af hastigheden og parameteren, v, angiver derfor den hastighed, som $L_{\lambda CA,v}$ er bestemt ved.

3 Måletværsnit og målepunkter

I dette afsnit gennemgås de enkelte måletværsnit. Generelt er der anvendt identiske betegnelser for målepunkter og samme måleopstilling i de 4 tværsnit:

De to spor er benævnt hhv. A og B. I hvert spor er der 3 målepunkter: 1 målepunkt på hver skinne, hvor der måles acceleration benævnt P1 og P2 og 1 målepunkt, hvor der måles støj, P3.

De seks målepunkter i hvert tværsnit er således benævnt P1A, P2A, P3A, P1B, P2B og P3B. Målepunkterne P3A og P3B er så vidt muligt placeret 7,5 meter fra spormidte og 1,2 meter over skinneoverkant.

Den generelle måleopstilling bliver dermed som skitseret i Figur 1.

Figur 1: Generel måleopstilling og nummerering af målepunkter. Tegningen er ikke målfast.

Måleudstyret er i alle tværsnit monteret i en sporspærring i natperioden. Alle transducere blev kalibreret før alle signalkabler blev ført ud af sporet, så der kunne måles den følgende dag mens der kørte tog. Dette havde den konsekvens at eventuelle fejl på målekabler eller andet, som viste sig under selve målingerne, ikke kunne rettes.

Måletværsnittenes geografiske placering er vist i Figur 2.

Figur 2: Oversigt over måletværsnittenes geografiske placering.

I det følgende gennemgås de enkelte måletværsnit.

3.1 Tværsnit 1: Islands Brygge – Sundby

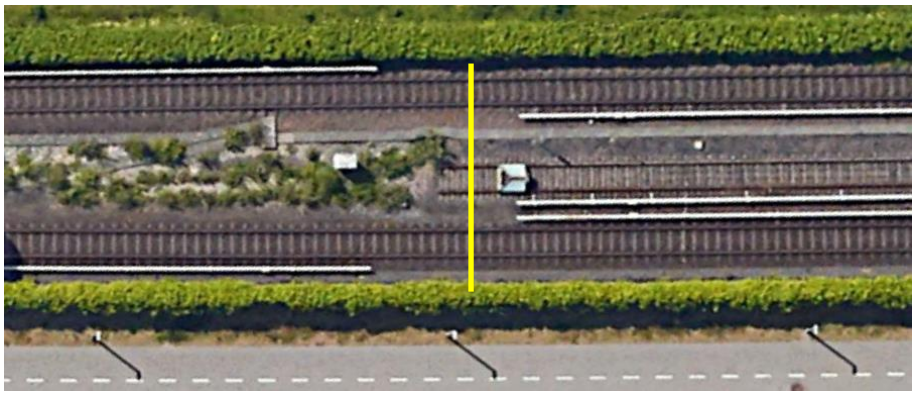
Tværsnittet ligger på rampen, der fører op fra Islands Brygge Station og repræsenterer spor, der ligger på slap track. Tværsnittet er ikke helt ideelt, hverken i forhold til toghastigheder eller refleksionsforhold. Det ligger ikke på ret spor men i en svag kurve, men ud af de få valgmuligheder, der findes på de nuværende metrolinjer, var det det bedst egnede. Måletværsnittet er lagt så langt som muligt fra de to sporskifter ved Islands Brygge Station, der ses på Figur 3 for at undgå disses indflydelse på støjen og for at få størst mulig hastighed på togene. Figur 4 viser placeringen af de to mikrofoner, P3A og P3B.

Figur 3: Måletværsnit mellem Islands Brygge og Sundby. Måletværsnit er markeret med en gul linje

Figur 4: Mikrofonerne, P3A (længst væk) og P3B (nærmest)

3.2 Tværsnit 2: Sundby – DR Byen (Uni)

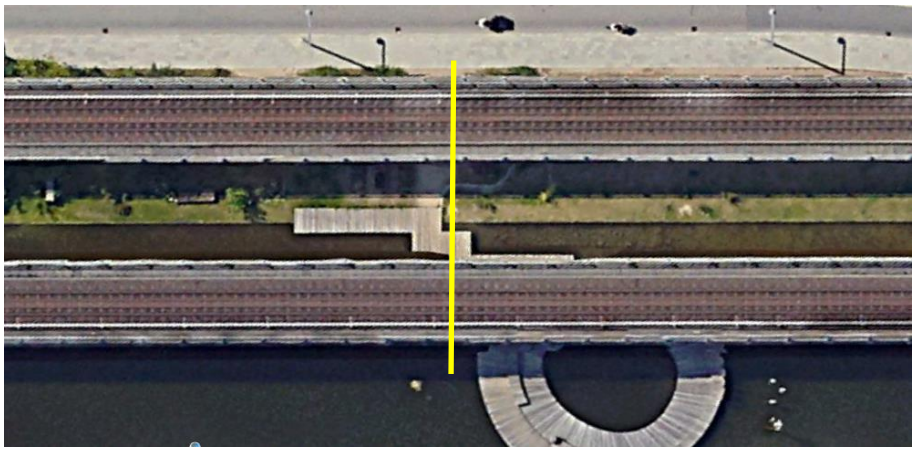
Tværsnittet repræsenterer ballasteret spor på dæmning og er markeret på Figur 5. Tværsnittet er meget velegnet til målingerne da sporet er ret, togene kører med maksimal hastighed og der er god plads til mikrofonerne.



Figur 5: Måletværsnit mellem Sundby og DR Byen (Uni). Måletværsnittet er markeret med en gul linje

3.3 Tværsnit 3: Bella Center – Ørestad

Tværsnittet repræsenterer ballasteret spor på viadukt, se Figur 6. Tværsnittet er meget velegnet til målingerne idet toget kører med maksimal og konstant hastighed. Mikrofonerne i P3A og P3B er placeret mellem sporene på høje master. Den korrekte placering af mikrofonerne er opnået ved hjælp af en strop, der er udspændt mellem sporene i en kendt højde og hvorpå der er markeringer for hver halve meter, se Figur 7.

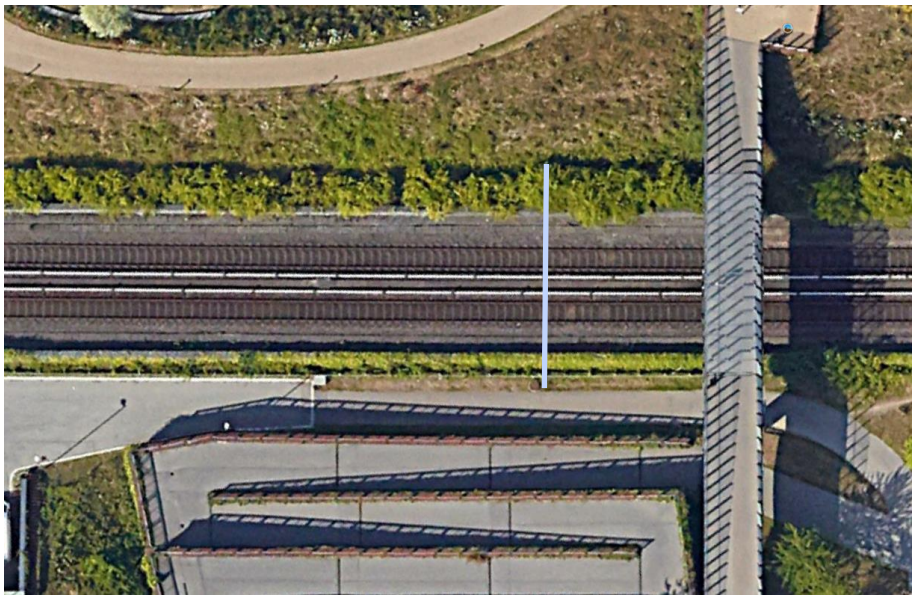


Figur 6: Måletværsnit mellem Bella Center og Ørestad. Måletværsnittet er markeret med en gul streg.

Figur 7: Placering af mikrofoner, P3A og P3B.

3.4 Tværsnit 4: Flintholm – Lindevang

Der er kun få muligheder for at finde en strækning med spor i terræn, hvor det samtidigt er muligt at placere mikrofoner i en fornuftig afstand. Det bedst egnede tværsnit er på strækningen mellem Flintholm og Lindevang ud for Flintholm Svømmehal, hvor togets hastighed er konstant, Figur 8.



Figur 8: Måletværsnit mellem Flintholm og Lindevang. Måletværsnittet er markeret med en gul streg.

Afstanden mellem sporene er dog ikke stor nok til at mikrofonerne kunne placeres mellem sporene. I dette tværsnit blev de derfor monteret øverst på gabionsvæggene.

3.5 Toghastigheder

Metrotogene kører normalt efter et indkodet hastighedsprofil, som ville medføre, at hvert tog, der passerede målepunkterne, kørte med en fast hastighed. For at kunne bestemme kildestyrken er det imidlertid nødvendigt at måle ved flere forskellige hastigheder. Der blev derfor i en kortere periode ud for hvert tværsnit arrangeret passage med to hastigheder der var lavere end den maksimale strækningshastighed, typisk omkring 30 og 50 km/t.

Sammenlagt er der målt på 212 togpassager fordelt således på de enkelte tværsnit:

- Islands Brygge – Sundby (slap track): 45 togpassager
- Sundby – DR Byen (ballasteret spor på dæmning): 47 togpassager
- Bella Center – Ørestad (ballasteret spor på viadukt): 46 togpassager
- Flintholm – Lindevang: 74 togpassager

4 Analysemetoder

I dette afsnit gennemgås de metoder, der er anvendt til bestemmelse af kildestyrkerne. Desuden redegøres der for de korrektioner, der er foretaget for at få det mest retvisende resultat.

4.1 Normalisering til referencetværsnit

For at forenkle den endelige bestemmelse af kildestyrken for metrotoget, er alle målte lydtrykspektre normaliseret til et referencetværsnit. Som referencetværsnit er der anvendt tværsnittet mellem Bella Center og Ørestad, hvor toget kører på viadukt. Det skal bemærkes, at det er uden betydning for

det endelige resultat, hvilket tværsnit, der normaliseres til. Normaliseringen sker udelukkende for at forenkle de endelige beregninger.

Normaliseringen er foretaget ved bestemmelse af overføringsfunktionen mellem de to målemikrofoner og de to spor. Dette resulterer i totalt 4 overføringsfunktioner for et enkelt tværsnit. I tværsnit 1 – 3 er det udelukkende mikrofonerne 7,5 meter fra spormidte, der er anvendt til bestemmelse af kildestyrken. I tværsnittet 4, hvor kun en af mikrofonerne var virksomme, er den anvendt til kildestyrkebestemmelse i begge spor. Alle overføringsfunktioner er bestemt ved en hastighed på 80 km/t.

4.2 Metode for kildestyrke til Nord2000

Kildestyrken er bestemt ved at omregne alle de målte lydspektre for de enkelte togpassager til SEL-værdier, dvs. til den støjdosis, som mikrofonerne har målt, når toget passerede. Ved analyse af togpassagerne er støjniveauet bestemt pr. 1/3-oktav over togets længde på 38 meter. I henhold til ISO 3095, ”Akustik – Jernbaner – Måling af støj fra skinnekøretøjer”, 2. udgave skal Leq-værdien bestemmes fra tidspunktet, hvor støjen er 10 dB under støjniveauet under selve togpassagen til tidspunktet, hvor toget har passeret og støjniveauet igen er 10 dB under. I forbindelse med bestemmelsen af kildestyrkerne for Banedanmarks tog, blev der bestemt en korrektion til den beregnede SEL-værdi, så den kommer til at svare til kravet i ISO 3095.

Korrektionen beregnes i henhold til

$$\Delta SEL(i_t) = \frac{9{,}7}{i_t} = 9{,}7\,\frac{d_R}{l_t}$$

, hvor d_R er afstanden fra mikrofonen til spormidte og l_t er længden af toget.

Referenceoverføringsfunktionen er beregnet ved 80 km/t for et tog med en længde på 38 meter. For at kunne bruge overføringsfunktionen til at omregne alle målte og korrigerede SEL-værdier til lydeffektniveau og foretage en regression til bestemmelse af de a- og b-værdier, som kræves i Nord2000 til beregning af togets lydeffektniveau, skal der korrigeres for at togets passagetid ikke er konstant. Alle SEL-værdier er derfor normeret i forhold til passagetiden ved 80 km/t):

$$\Delta SEL(v) = 10\log\left(\frac{v}{80}\right)$$

Efter at SEL-værdierne er konverteret til L_w, er der udført en lineær regression over udtrykket

$$L_w = a \cdot \log\left(\frac{v}{100}\right) + b$$

til bestemmelse af konstanterne *a* og *b*.

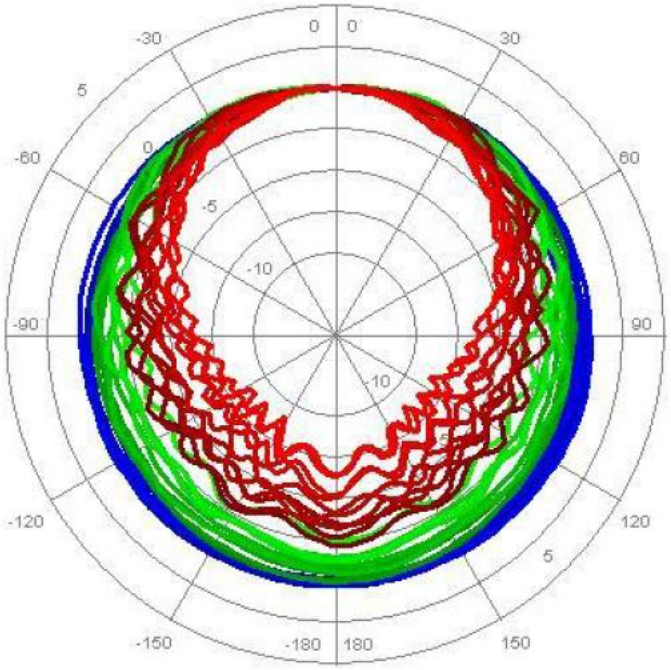
4.3 Kildestyrke bestemt ved måling tæt på spor

I tværsnit 4, Flintholm-Lindevang fejlede den ene mikrofon. Det har derfor været nødvendigt at anvende den ene mikrofon, der virkede, til bestemmelsen af kildestyrken i begge spor. Afstanden til nærmeste spormidte for denne mikrofon er 3,35 meter, hvilket er betydeligt mindre end den nominelle afstand på 7,5 meter.

For at undersøge, om det er acceptabelt at bruge denne korte afstand, er det for hver togpassage i disse tværsnit undersøgt, hvordan det A-vægtede lydtrykniveau fra de to mikrofoner forholder sig til hinanden, når begges udbredelsesveje korrigeres til referencetværsnittet.

Ud over at der skal korrigeres for forskellen i udbredelsesgeometri, skal der også korrigeres for, at den mikrofon, der er nærmest sporet, er vendt mod det modsatte spor, og at lydindfaldet derfor sker bagfra i en vinkel på ca. 150°, når toget er ud for målepunktet. Ved lave frekvenser, har dette ingen betydning, men ved højere frekvenser får det en vis betydning. Data for forskellen mellem lydindfald ved 0 og 150° er taget fra manual til SVANTEK-lydmåler type 979 og for den situation, hvor lydtrykmålerens mikrofon anvendes med forlængerkabel svarende til anvendelsen ved de aktuelle målinger.

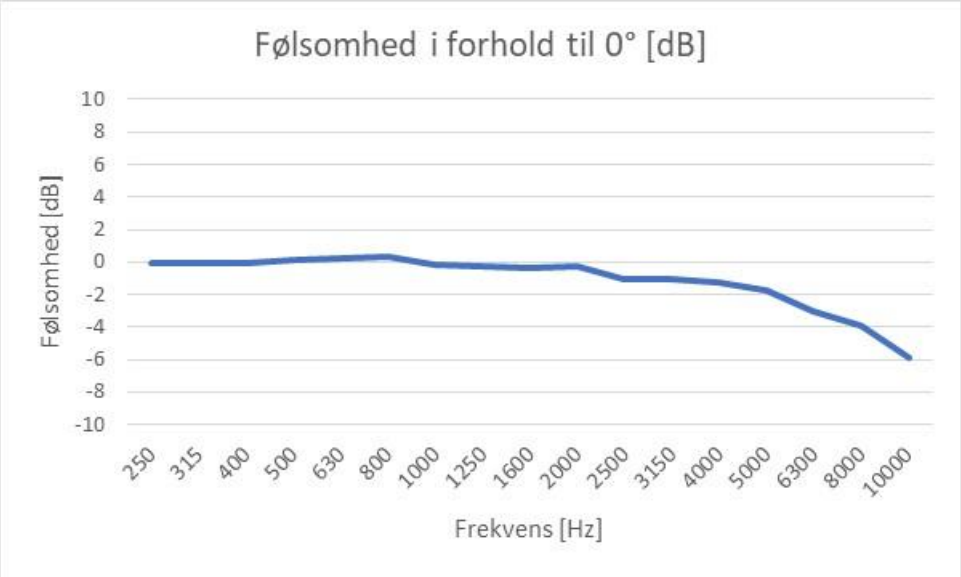
Manualen indeholder vist i Figur 9 for retningskarakteristikken som funktion af frekvensen.



Directional characteristics of SVAN 979 with extension cable SC 93 and preamplifier holder SA 08 mounted on the tripod

Figur 9: Retningskarakteristik for en ½”-mikrofon (figuren er fra manualen til SVANTEK-måler type 979)

For 150° lydindfald aflæses korrektionerne vist i nedenstående figur. Som det ses, er korrektionen ikke helt ubetydelig ved høje frekvenser:



Der er fundet følgende gennemsnitlige forskelle mellem de resulterende A-vægtede lydtryksniveau fra de to mikrofoner i tværsnit 1-3:

Tværsnit 1, Islands Brygge – Universitetet: -1,4 dB

Tværsnit 2, DR Byen – Sundby: 0,3 dB

Tværsnit 3, Bella Center – Ørestad: 1,4 dB

Forskellene er små taget i betragtning at hjul og skinner ikke nødvendigvis har samme ruhedsniveau på begge sider af toget.

De små forskelle viser, at det er acceptabelt at bestemme kildestyrken ud fra den nærmeste mikrofon i tværsnit 4 i det spor, hvor mikrofonen 7,5 meter fra spormidte fejlede.

4.4 Analyse af hjul-/skinneruhed

Det samlede ruhedsniveau af hjul og skinner er bestemt på grundlag af accelerationsmålingerne under skinnefoden ved hjælp af metoderne beskrevet i EU-projektet STAIRRS, som blandt andet beskriver målemetoder ved hjælp af hvilke man kan beskrive og karakterisere tog og spor separat. En af målemetoderne omhandler indirekte måling af det samlede ruhedsniveau for hjul og skinner og er anvendt i dette projekt til at måle ruhedsniveauet i de fire måletværsnit. Resultatet af en ruhedsanalyse er et ruhedsspektrum pr. 1/3-oktav, som for hver bølgelængde angiver det tilsvarende ruhedsniveau. Ruheden opgives i [dB] i forhold til en referencestørrelse på 1 µm. Ved 0 dB er størrelsen af ujævnhederne i hjulenes og skinnens overflade derfor 1 µm. Ved positive og negative dB-værdier er ujævnhederne større hhv. mindre end 1 µm.

Ruhedsniveauet bestemmes ved hjælp af accelerometeret monteret under skinnen i sammenhæng med fotocellen, der angiver det præcise tidspunkt for de enkelte akslers passage af accelerometeret.

I analysefasen viste det sig at disse signaler i alle fire måletværsnit var kraftigt påvirket af elektrisk støj, som manifesterede sig som 50 Hz + ulige harmoniske i hele det målte frekvensområde, dvs. op til 20 kHz. Støjen er formentlig induceret støj fra køreskinnesystemet.

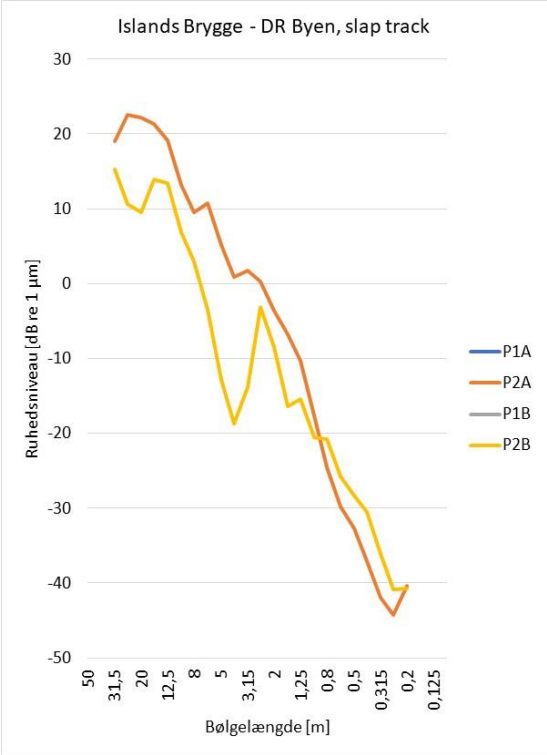
Dette var især markant ved togpassager med lav hastighed, hvor accelerationsniveauet ved togpassage ikke var så kraftigt. Ved passager med hastigheder over 60 km/t var det kun i de øverste frekvensbånd (over 4000 Hz), at signalet var påvirket af den elektriske støj.

Det var dog stadig ønskeligt at undersøge, om det var muligt at fjerne indflydelsen fra den elektriske støj. Detailanalyser af støjen viste, at hver frekvenskomponent var så afgrænset i et smalbåndsspektrum (FFT), at den kunne dæmpes ved at fjerne den spektrale komponent med tilhørende sidefrekvenser, og derefter erstatte de fjernede frekvenskomponenter med værdier, som var interpoleret (splined) ud fra de nærmest liggende tilbageværende frekvenskomponenter. Ved togpassager med hastigheder over 60 km/t virkede denne metode efter hensigten. Ved togpassager med lavere hastigheder viste det sig efterfølgende, at der var spidser i accelerationsspektret, som var sammenfaldende med frekvenserne for den elektriske støj og som derfor blev fjernet. Af denne årsag er ruhedsspektre og ruhedsniveauer kun bestemt for togpassager med hastigheder over 60 km/t (i tværsnittet mellem Islands Brygge og DR Byen var det dog nødvendigt at gå ned til 55 km/t på grund af togenes lavere hastighed i dette tværsnit).

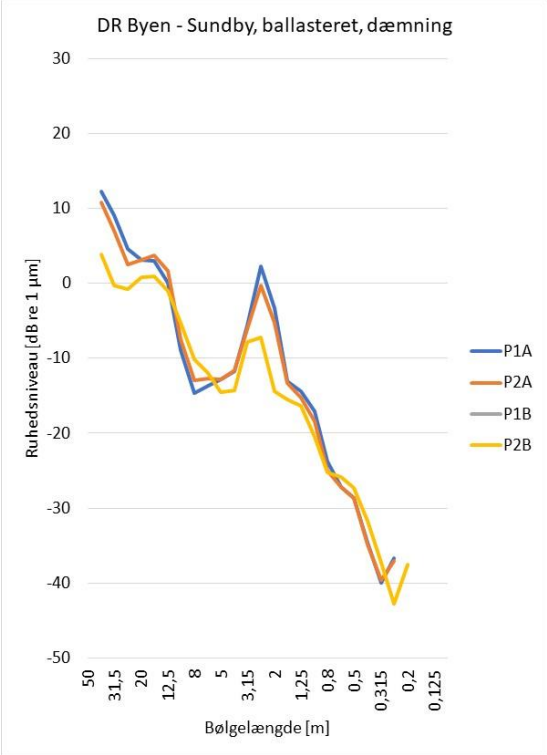
5 Resultater

5.1 Ruhedsniveau

Gennemsnitlige ruhedsspektre for de 4 tværsnit er vist i Figur 10 til Figur 13. På grund af manglende signal fra nogle af accelerometrene har det kun været muligt at bestemme ruhedsspektrene for 11 af de i alt 16 skinner, der i alt er målt på.

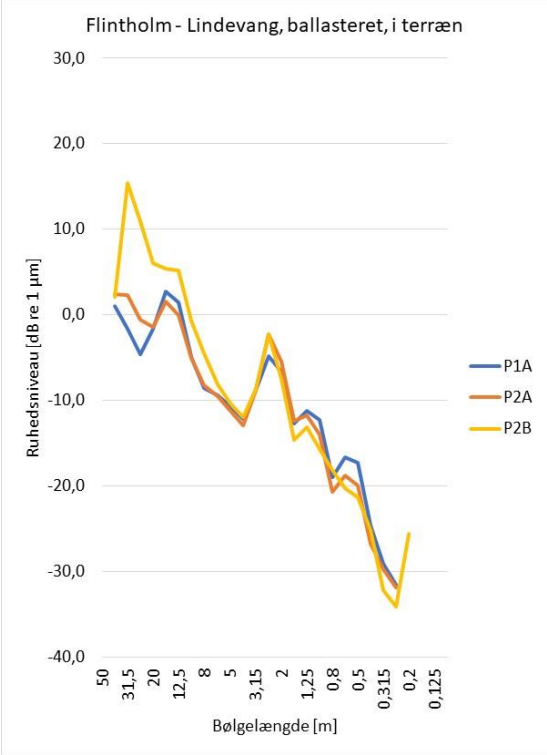


Figur 10: Gennemsnitlige ruhedsspektre for måletværsnit mellem Islands Brygge og DR Byen. Skinnerne er nummereret fra vest til øst i rækkefølgen P1A, P2A, P1B, P2B.



Figur 11: Gennemsnitlige ruhedsspektre for måletværsnit mellem DR Byen og Sundby. Skinnerne er nummereret fra vest til øst i rækkefølgen P1A, P2A, P1B, P2B.

Figur 12: Gennemsnitlige ruhedsspektre for måletværsnit mellem Bella Center og Ørestad. Skinnerne er nummereret fra vest til øst i rækkefølgen P1A, P2A, P1B, P2B.



Figur 13: Gennemsnitlige ruhedsspektre for måletværsnit mellem Flintholm og Lindevang. Skinnerne er nummereret fra syd til nord i rækkefølgen P1A, P2A, P1B, P2B.

Det mest iøjnefaldende ved de målte spektre er den spids, der optræder på mange af spektrene ved en bølgelængde på 2,5 cm. Denne spids er markant på 7 af de målte ruhedsspektre, og er også i mindre grad til stede på 3 af de resterende spektre. Der er således kun 1 af de målte spektre, der ikke har denne spids, nemlig spektret fra P2A i tværsnittet mellem Islands Brygge og DR Byen. Dette spektrum har til gengæld generelt højere ruhedsniveauer end de øvrige spektre, antageligt på grund af at toget accelererer op ad bakke her ved udkørslen fra Islands Brygge station og at der derfor optræder større vandrette kræfter mellem hjul og skinne end i de øvrige tværsnit.

På de steder, hvor spidsen er markant, vil den opleves som en tone, som ligger oveni den generelle støj fra toget. Ved en hastighed på 40 km/t vil tonen ligge ved 444 Hz og ved 80 km/t ved 889 Hz. Der er erfaring for, at dårligt udført skinneslibning kan efterlade slibemærker, som resulterer i spidser i ruhedsspektret som den beskrevne. Det kan dog ikke på det foreliggende grundlag afgøres, om dette er tilfældet her, eller om spidserne er et resultat af slid fra den daglige drift.

I forhold til at vurdere ruhedens betydning for den udstrålede rullestøj fra jernbaner er det efterhånden blevet praksis at benytte parameteren $L_{\lambda CA,v}$. Her angiver "v" den hastighed, som værdien af $L_{\lambda CA}$ beregnes for. Banedanmark benytter f.eks. hastigheden 120 km/t som beregningshastighed til at karakterisere sporkvaliteten. De kildestyrkemålinger, der er udført for Banedanmark, har vist, at det giver mening at skelne mellem spor med lav hhv. høj skinneruhed ved en værdi af $L_{\lambda CA,120}$ på 14 dB. I forhold til hastighederne på Metroen giver det mest mening af beregne værdien af $L_{\lambda CA}$ ved 80 km/t, men for at kunne sammenligne med erfaringstal fra Banedanmark er værdien også beregnet ved 120 km/t.

Ved beregningen af $L_{\lambda CA}$ indgår flere vægtninger, herunder en vægtning, der tager højde for at ikke alle frekvenser udstråles lige godt fra hjul og skinner. Der indgår også en A-vægtning, der tager højde for at det menneskelige øre ikke er lige følsomt overfor alle frekvenser.

Konsekvensen af den måde $L_{\lambda CA}$ beregnes på er, at den beregnede værdi bliver proportional med (men ikke lig med!) niveauet af den støj, der udstråles til det eksterne miljø.

Værdierne af $L_{\lambda CA}$ for den samlede hjul-/skinneruhed og beregnet ved hhv. 80 og 120 km/t er vist i

	Målepunkt	Middel, total [dB]		Estimat, skinne [dB]	
		$L_{\lambda CA,80}$	$L_{\lambda CA,120}$	$L_{\lambda CA,80}$	$L_{\lambda CA,120}$
Islands Brygge - DR Byen	P1A				
	P2A	14,8	16,0	12,3	13,6
	P1B				
	P2B	9,8	10,4	5,9	6,3
DR Byen - Sundby	P1A				
	P2A	13,0	13,7	7,9	8,6
	P1B	11,3	11,9	6,9	7,5
	P2B	7,8	8,0	5,2	5,3
	P1A	16,3	17,3	14,1	15,1
	P2A	10,7	11,4	8,4	9,1

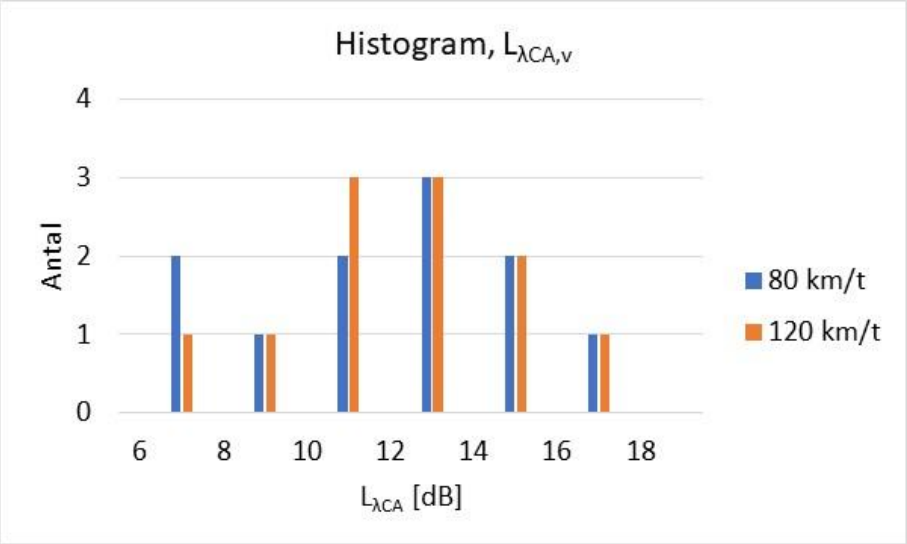
Bella Center - Ørestad	P1B				
	P2B	8,0	8,4	5,3	5,6
Flintholm - Lindevang	P1A	14,6	14,3	9,8	9,5
	P2A	13,6	14,0	9,6	9,6
	P1B				
	P2B	12,8	12,8	9,3	9,2

og den statistiske fordeling er vist i Figur 14. Det fremgår af tabel og figur, at 8 af de målte ruheder har en værdi for $L_{\lambda CA,120}$ mindre end eller lig med 14 dB og at de resterende værdier ligger over 14 dB. Sidstnævnte skyldes de ovenfor beskrevne spidser i ruhedsspektrene. Uden disse spidser, ville alle værdierne ligge under 14 dB.

De ruhedsspektre, der er målt for hver enkelt togpassage og som resulterer i det gennemsnitlige samlede ruhedsniveau for hver skinne, er summen af hjulenes og skinnernes ruheder. Disse spektre udviser en vis spredning fordi de tog, der passerer tværsnittet ikke har samme hjulruhed. Det er muligt at estimere ruheden for skinnerne alene ved for hver 1/3-oktav bølgelængde at udvælge den laveste værdi fra alle de målte ruhedsspektre. Den laveste værdi antages nemlig at være fremkommet ved at der har passeret et tog, hvor hjulruheden var så lav, at den målte ruhed alene kommer fra skinnerne. På den måde fremkommer et estimeret skinneruhedsspektrum for hver af de skinner, der er målt på. Værdierne af $L_{\lambda CA,80}$ og $L_{\lambda CA,120}$ er vist i Tabel 1 i kolonnerne benævnt ”Estimat, skinne [dB]”. Det fremgår at kun én af de målte skinner har et ruhedsniveau, der er højere end 14 dB. Skinnerne i de målte tværsnit må på det grundlag i gennemsnit beskrives som godt vedligeholdte.

Tabel 1: Gennemsnitlige værdier af $L_{\lambda CA,v}$ beregnet ved 80 hhv. 120 km/t

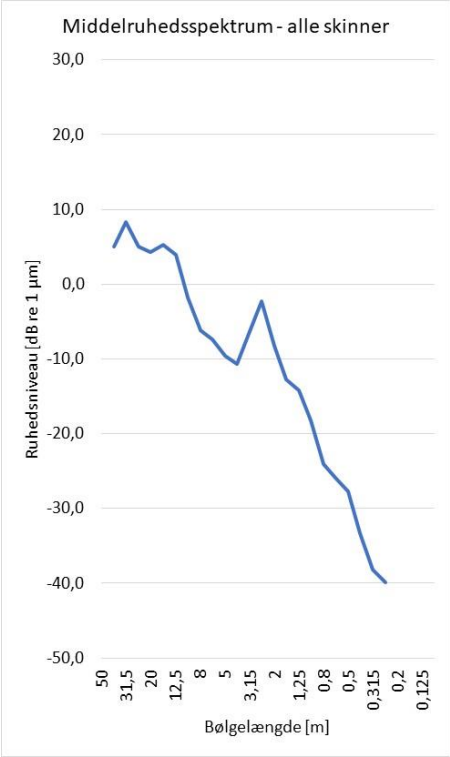
	Målepunkt	Middel, total [dB]		Estimat, skinne [dB]	
		$L_{\lambda CA,80}$	$L_{\lambda CA,120}$	$L_{\lambda CA,80}$	$L_{\lambda CA,120}$
Islands Brygge - DR Byen	P1A				
	P2A	14,8	16,0	12,3	13,6
	P1B				
	P2B	9,8	10,4	5,9	6,3
DR Byen - Sundby	P1A				
	P2A	13,0	13,7	7,9	8,6
	P1B	11,3	11,9	6,9	7,5
	P2B	7,8	8,0	5,2	5,3
Bella Center - Ørestad	P1A	16,3	17,3	14,1	15,1
	P2A	10,7	11,4	8,4	9,1
	P1B				
	P2B	8,0	8,4	5,3	5,6
Flintholm - Lindevang	P1A	14,6	14,3	9,8	9,5
	P2A	13,6	14,0	9,6	9,6
	P1B				
	P2B	12,8	12,8	9,3	9,2



Figur 14: Fordeling af $L_{\lambda CA}$ for den samlede hjul-/skinneruhed beregnet ved 80 hhv. 120 km/t

5.2 Gennemsnitligt ruhedsspektrum

Der er beregnet et gennemsnitligt ruhedsspektrum for alle de målte skinner. Dette spektrum er vist i Figur 15 og værdierne af $L_{\lambda CA,80}$ og $L_{\lambda CA,120}$ er 10,5 dB hhv. 11,0 dB. Hvis den tidligere omtalte spids ved bølgelængden 2,5 cm ikke havde optrådt i ruhedsspektret, havde værdierne – og dermed også støjen til banens omgivelser – været endnu lavere.



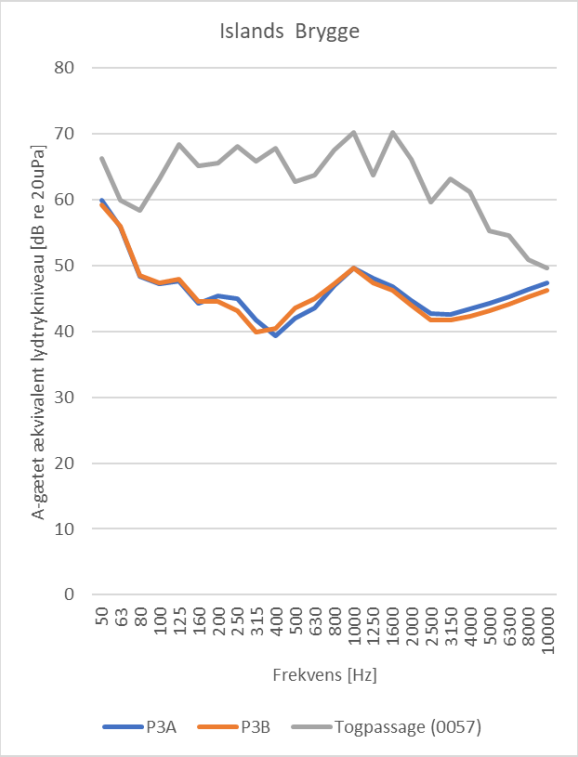
Figur 15: Gennemsnitligt ruhedsspektrum

5.3 Baggrundsstøj

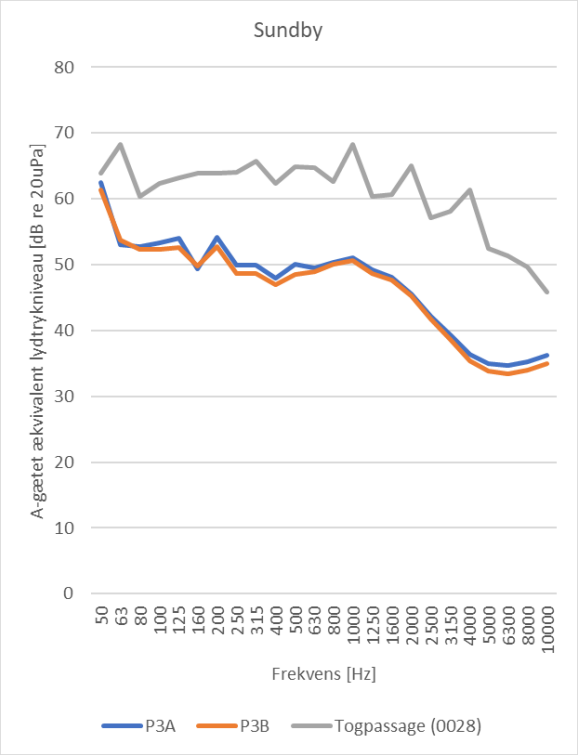
Den baggrundsstøj, der var i de fire måletværsnit, skyldes generelt trafikstøj fra de omliggende veje. Af denne grund har baggrundsstøjniveauet varieret under målingerne. Til belysning af baggrundsstøjens indflydelse på måleresultaterne er baggrundsstøjen i de enkelte mikrofonpositioner er bestemt ved analyse over en periode, hvor der ikke var nogen togpassage.

Figur 16 til Figur 19 viser spektrene for baggrundsstøjen i de to mikrofonpositioner sammenlignet med spektret målt 7,5 meter fra spormidte under togpassage ved den laveste hastighed, ca. 30 km/t.

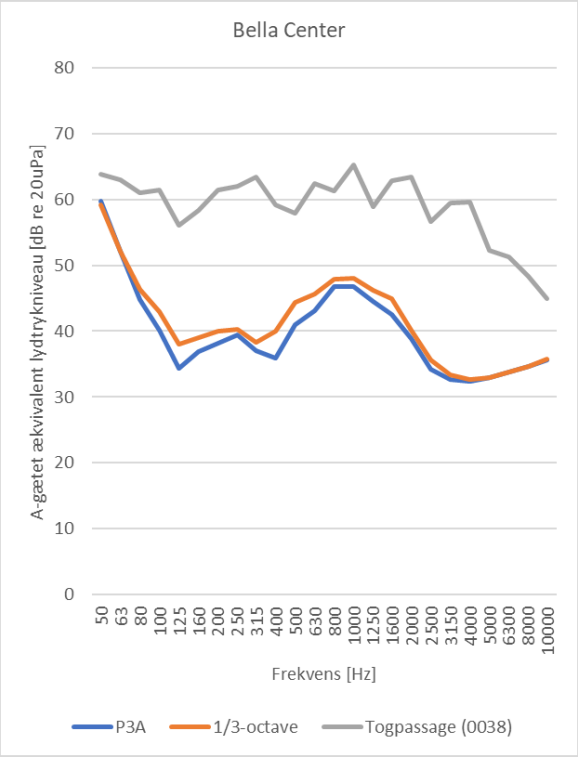
Som det ses, ligger støjen ved togpassage generelt mere end 10 dB over baggrundsstøjen bortset fra de laveste og de højeste frekvensbånd. Alle målte spektre er i henhold til ISO 3095 korrigeret logaritmisk for baggrundsstøjen, hvis forskellen mellem totalstøj og baggrundsstøj er større end 3 dB. Hvis forskellen er mindre end 3 dB er totalstøjen korrigeret med 3 dB.



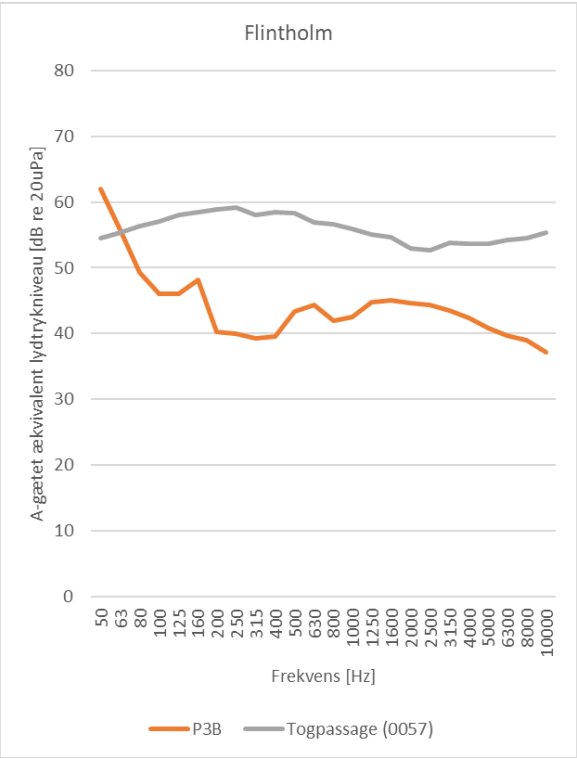
Figur 16: Baggrundsstøj ved Islands Brygge i P3A og P3B sammenlignet med støjniveauet under togpassage ved ca. 30 km/t



Figur 17: Baggrundsstøj ved Sundby i P3A og P3B sammenlignet med støjniveauet under togpassage ved ca. 30 km/t



Figur 18: Baggrundsstøj ved Bella Center i P3A og P3B sammenlignet med støjniveauet under togpassage ved ca. 30 km/t



Figur 19: Baggrundsstøj ved Flintholm i P3B sammenlignet med støjniveauet under togpassage ved ca. 30 km/t

5.4 Kildestyrker til Nord2000

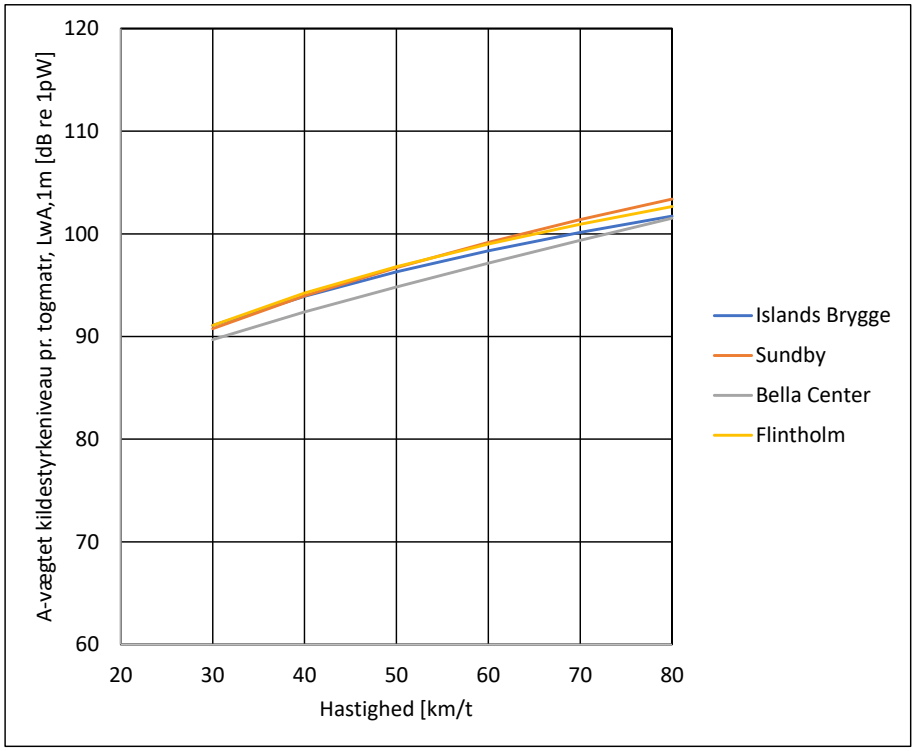
Til brug for støjberegning i henhold til Nord2000 skal kildestyrken angives pr. 1/3-oktav i form af et sæt konstanter, a og b, ud fra hvilke det lineære kildestyrkeniveau pr. togmeter, $L_{w,1m}$, kan beregnes. Da et af formålene med at måle i fire forskellige typer tværsnit har været at undersøge, om der er forskel i kildestyrken mellem de forskellige typer spor, er kildestyrken i første omgang bestemt separat for hvert af de fire måletværsnit.

På grundlag af de fundne a- og b-værdier er det A-vægtede lydeffektniveau pr. togmeter, $L_{wA,1m}$, bestemt for hastighedsområdet 30 – 80 km/t og vist i Figur 20. Figuren viser, at $L_{wA,1m}$ ligger indenfor 0,8 dB ved 30 km/t stigende til 1,7 dB ved 80 km/t. Disse forskelle er så små sammenlignet med de variationer, der kan forekomme i hjul- og skinneruhed, at det er fuldt forsvarligt at regne med samme kildestyrke uanset sporopbygningen. Her skal man dog være opmærksom på, at når kildestyrken anvendes til støjberegning skal modelleringen foretages på samme måde som det er gjort her ved beregning af overføringsfunktionerne. Det vil sige, at for ballasteret spor modelleres ballastunderlaget som absorberende og for slap track modelleres underlaget som fuldt reflekterende (Type H).

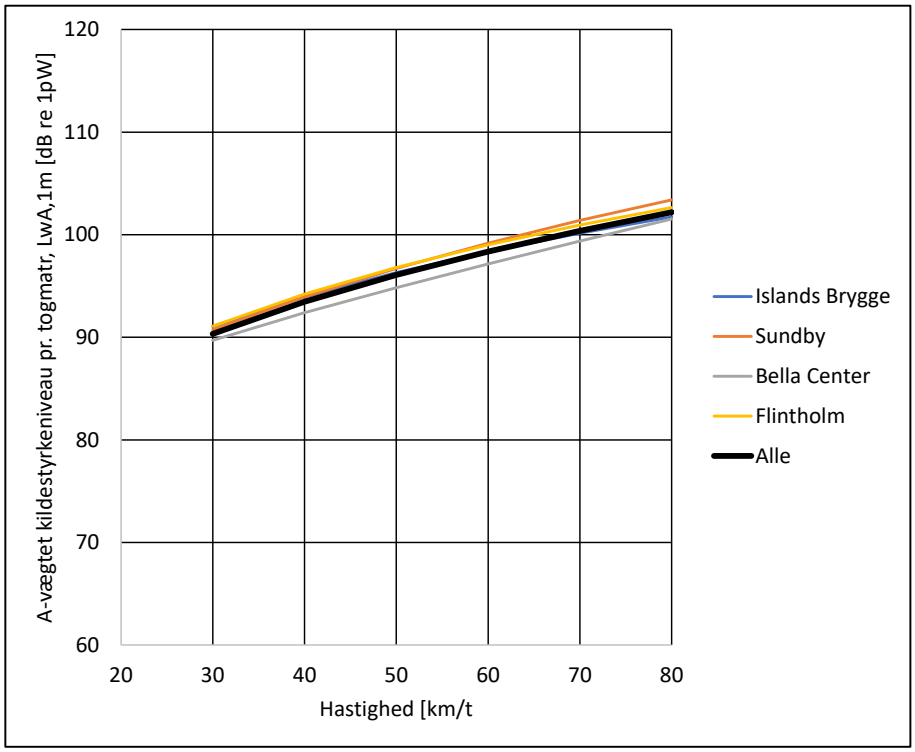
Figur 21 viser det A-vægtede kildestyrkeniveau beregnet på grundlag af a- og b-værdier bestemt ud fra samtlige målinger i de fire tværsnit.

Figur 22 viser tilsvarende de A-vægtede lydeffektspektre pr. 1/3-oktav ved hastigheder fra 30 til 80 km/t i spring af 10 km/t.

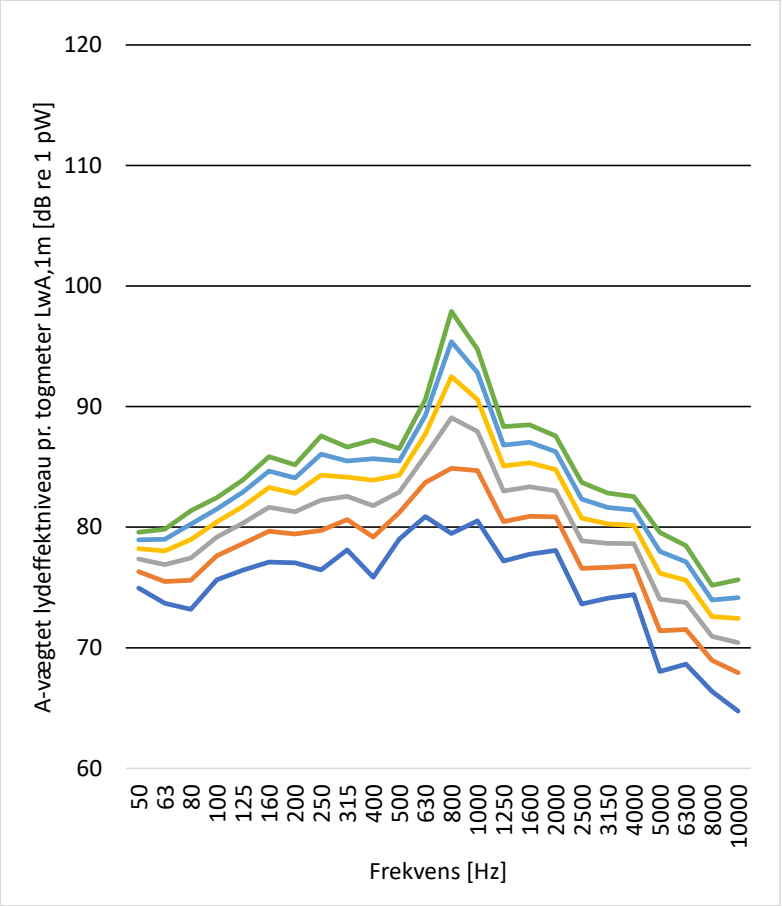
Værdierne for a og b er angivet pr. 1/3-oktav i Appendix A sammen med en præcisering af, hvordan sporet modelleres i SoundPLAN.



Figur 20: Beregnet A-vægtet kildestyrke pr. togmeter, $L_{wA,1m}$ i de fire måletværsnit



Figur 21: Gennemsnitlig A-vægtet kildestyrke pr. togmeter, $L_{wA,1m}$, sammenlignet med værdierne for de fire måletværsnit

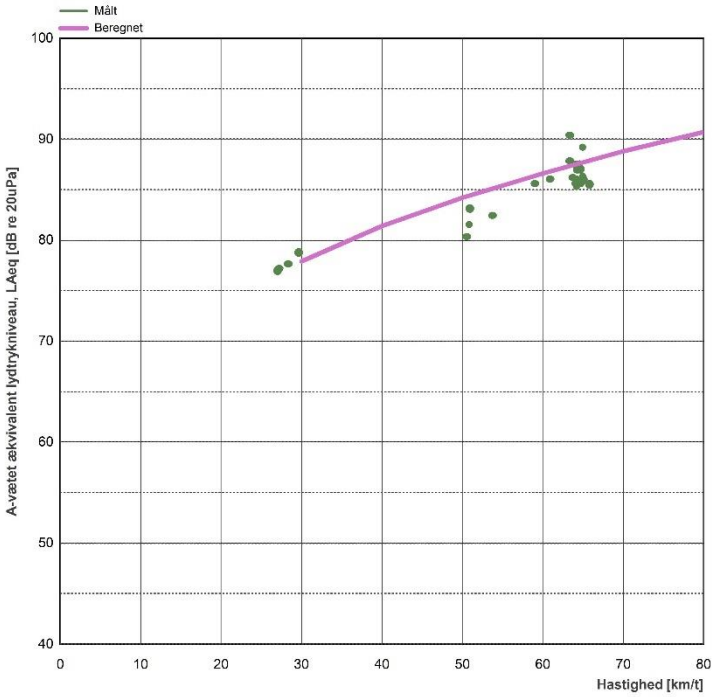


Figur 22: Spektre for A-vægtet lydeffektniveau pr. togmeter, $L_{wA,1m}$, for hastighederne 30 km/t (nederste kurve) til 80 m/t (øverste kurve) i spring af 10 km/t

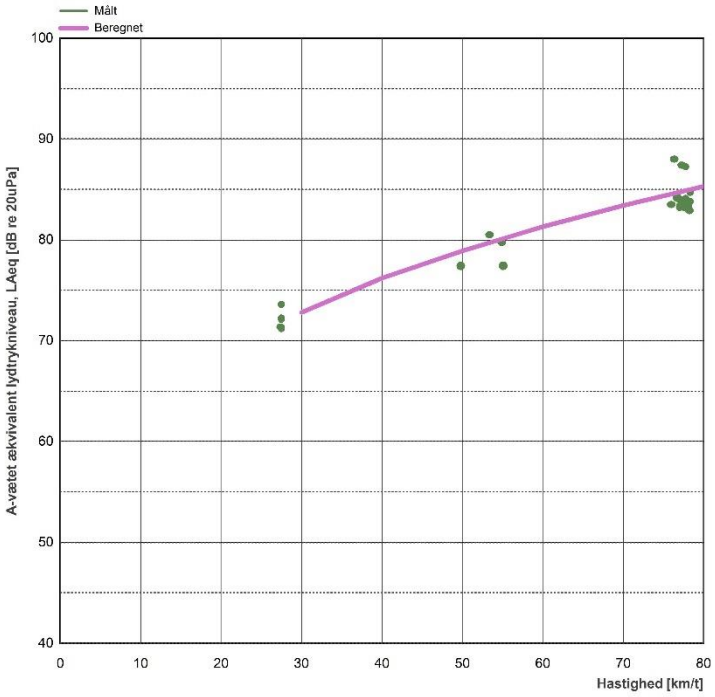
5.4.1 Beregnede niveauer sammenlignet med målte

For at kontrollere bestemmelsen af a- og b-værdierne er der i tre af de fire tværsnit lavet en kontrolberegning af det forventede A-vægtede lydtryksniveau under en togpassage i spor A, som er sammenlignet med de målte værdier (i tværsnittet ved Flintholm er der ikke beregnet, da mikrofonen til spor A ikke virkede).

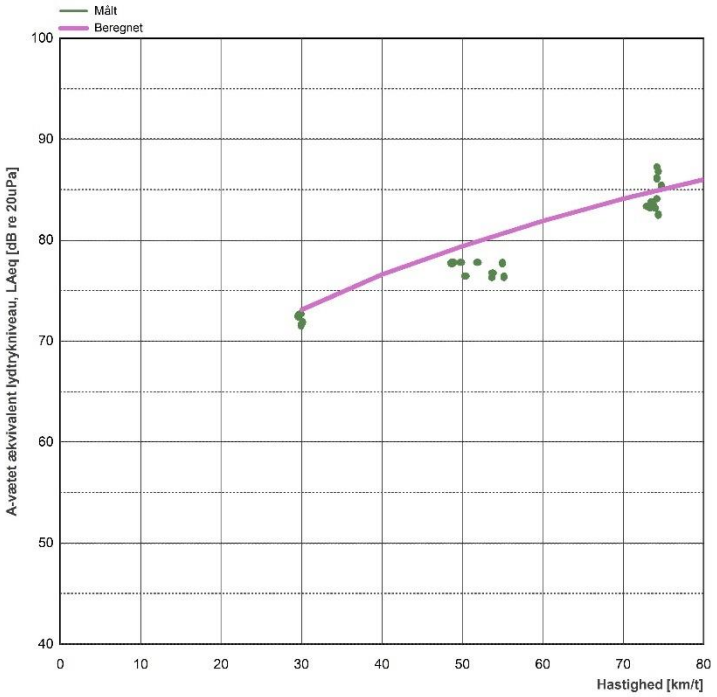
Resultaterne er vist i Figur 23 til Figur 25, hvor de beregnede værdier er repræsenteret ved den fuldt optrukne kurve og de målte værdier ved prikker. Når man tager i betragtning, at de målte værdier viser den spredning, der i virkeligheden er på støjen fra de enkelte togpassager, er der generelt god overensstemmelse mellem de beregnede og de målte værdier.



Figur 23: Islands Brygge – Sundby: Beregnede støjniveauer for togpassage sammenlignet med målte værdier.



Figur 24: Sundby – DR-Byen: Beregnede støjniveauer for togpassage sammenlignet med målte værdier.



Figur 25: Bella Center - Ørestad: Beregnede støjniveauer for togpassage sammenlignet med målte værdier.

5.5 Kildestyrke til CNOSSOS

CNOSSOS implementerer en helt anden model for kildestyrke end Nord2000. Hvor kildestyrkerne til Nord2000 skal findes ved regression pr. 1/3-oktav over et hastighedsinterval tager CNOSSOS direkte udgangspunkt i målte ruhedsspektre for hjul og skinne sammen med de tilhørende overføringsfunktioner mellem ruhed og støjniveau. Metoden bygger med andre ord på den samme metodik, som ligger til grund for den tidligere omtalte PBA-metode, som blev anvendt ved bestemmelsen af hjul-/skinneruhedsniveauet.

I praksis betyder det en hel del for et fænomen som den spidsværdi ved 2,5 cm bølgelængde, der blev omtalt i afsnit 5. Den vil nemlig blive omsat til forskellige frekvenser afhængig af togets hastighed. Den vil med andre ord flytte sig mellem frekvensbåndene og i det enkelte frekvensbånd kun optræde som en spids ved nogle få hastigheder i det samlede interval. Ved regressionen i Nord2000 vil den derfor mere eller mindre blive midlet ud, mens den vil blive korrekt repræsenteret i CNOSSOS.

De to metoder har også forskellige modeller for støjudbredelsen, hvilket i sig selv vil medføre forskellige niveauer.

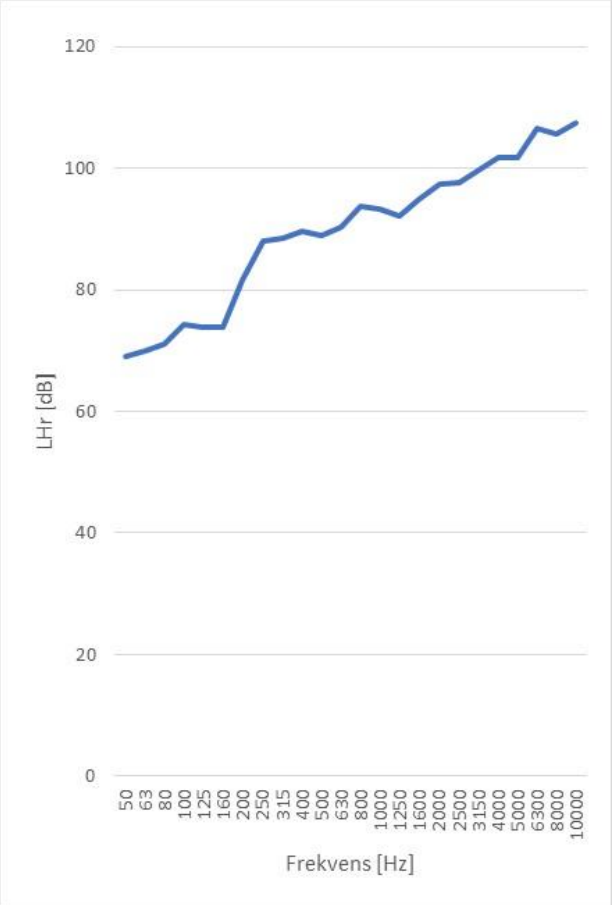
Det kan derfor ikke forventes, at de støjniveauer, som beregnes med CNOSSOS og Nord200 vil være identiske.

Ved den praktiske implementering af CNOSSOS i Danmark er der foretaget en forenkling af den oprindelige model Forenklingen går groft sagt ud på, at der ikke skelnes mellem hjulruhed og skinneruhed og i stedet regnes der med den

samlede ruhed, som tilskrives skinnen mens hjulruheden sættes lavt. Der er derfor også kun behov for én overføringsfunktion, nemlig den for skinnen, mens overføringsfunktionerne for hjul og bogie sættes ud af kraft.

Det samlede hjul-/skinneruhedsspektrum blev bestemt i afsnit 5 og der står derfor tilbage at bestemme overføringsfunktionen for skinnen.

Denne er bestemt så en beregning efter CNOSSOS giver samme spektrale fordeling af støjen som Nord2000 ved 80 km/t og så det samlede støjniveau beregnet ved 55 og 80 km/t ligger mindre end 1 dB fra de tilsvarende støjniveauer beregnet efter Nord2000.



Figur 26: Overføringsfunktion for metrotog, L_{Hr}.

I Appendix B er angivet spektre for hjul- og skinneruhed samt overføringsfunktionen for sporet. Desuden er beskrevet, hvordan SoundPLAN skal sættes op for at give korrekte resultater.

5.6 Sammenligning med tidligere kildestyrker

De nye kildestyrker afviger fra de kildestyrker, der tidligere er anvendt til kortlægning af støjen fra metroen – især for Nord2000. Konsekvenserne af forskellene er belyst gennem et simpelt regneeksempel, hvor støjniveauet i form af L_d er bestemt. I eksemplet er der regnet med et enkelt tog på 38 meter, som

kører med 80 km/t på en strækning med en længde på 1 km. Beregningspunktet ligger i en afstand til spor på 20 meter og der er absorberende terræn mellem sporet og beregningspunktet.

Resultaterne fremgår af Tabel 2, som viser, at resultaterne beregnet med Nord2000 bliver næsten 15 dB højere med de nye kildestyrker i forhold til tidligere. Med CNOSSOS bliver støjniveauet 2 dB højere. Med de nye kildestyrker er forskellen mellem beregninger i Nord2000 og CNOSSOS omkring 1 dB i beregningseksemplet. Dette kan forklares ud fra forskelle i udbredelsesmodellerne for de to metoder, idet modellerne er kalibreret til at give samme støjniveau og -spektrum 7,5 meter fra sporet.

Tabel 2: Beregnet Ld for et enkelt tog ved 80 km7t med nye kildestyrker sammenlignet med tidligere anvendte

Metode	Gammel kildestyrke L_d [dBA]	Ny kildestyrke L_d [dBA]	Ændring [dBA]
CNOSSOS	35,1	37,1	+ 2,0
Nord 2000	21,1	35,8	+14,7

6 Konklusion

SWECO har efter aftale med Metroselskabet udført et stort antal målinger på metrotoget i fire tværsnit med forskellige typer sporopbygning og i alt 8 forskellige sportværsnit.

Resultatet er, at de nye Nord2000-kildestyrker er betydeligt højere end de tidligere anvendte og de vil derfor give både højere støjniveauer og flere støjbelastede boliger i fremtidige støjkortlægninger.

Resultaterne viser også, at de fundne kildestyrker ligger forholdsvis tæt på kildestyrkerne i den gamle CNOSSOS-model.

Støjen fra Metrotoget kan trods forskelle i sporopbygning beskrives med ét sæt data, som anvendes generelt på alle sportyper, dog under den væsentlige forudsætning, at spor på slap track modelleres med fuldt reflekterende underlag, se Appendiks A og B, som angiver alle indgangsdata og beskriver, hvordan SoundPLAN sættes op for at give korrekte beregningsresultater.

Et beregningseksempel, hvor støjniveauet, L_d, fra en enkelt togpassage ved 80 km/t beregnes 20 meter fra sporet med de gamle henholdsvis de nye kildestyrker viser, at resultaterne beregnet med Nord2000 bliver mere end 15 dB højere med de nye kildestyrker i forhold til tidligere. Med CNOSSOS bliver støjniveauet godt 1 dB højere.

Med de nye kildestyrker er forskellen mellem beregninger i Nord2000 og CNOSSOS mindre end 1 dB i beregningseksemplet. Dette kan forklares ud fra forskelle i udbredelsesmodellerne for de to metoder.

Metode	Støjniveau med gammel kildestyrke, L_d [dBA]	Støjniveau med ny kildestyrke, L_d [dBA]	Ændring [dBA]
CNOSSOS	35,1	37,1	+ 2,0
Nord 2000	21,1	35,8	+14,7

Den forskel der ses mellem de gamle og de nye kildestyrker for Nord2000 er meget markant og på grund af konsekvenserne for fremtidige støjkortlægninger har den givet anledning til en grundig granskning af de udførte analyser og beregningsmetoder, og dette har blot bekræftet resultaterne. Der er flere forhold at hæfte sig ved, når de nye og de gamle kildestyrker sammenlignes:

1. For det første er der foretaget adskillige kontrolberegninger, som viser at det niveau, der beregnes ud fra kildestyrkerne i de anvendte mikrofonpositioner svarer ret præcist til det, mikrofonerne har målt
2. De gamle kildestyrker for metrotoget er betydeligt lavere, ca. 6 dB, end de nye kildestyrkedata, der er bestemt for IC3 på vel vedligeholdt spor. Kildestyrken er for 1 meter tog og den samlede kildestyrke for hele toget findes ved at korrigere med toglængden. Når man gør dette, bliver det A-vægtede kildestyrkeniveau ved 80 km/t 112,8 dB for IC3 og 115,7 dB for metrotoget. Da begge tog har 8 aksler, skulle hjulene på IC3 altså støje 7,3 dB mere end metrotogets hjul. Dette virker ikke

sandsynligt, og det tyder på at de oprindelige kildestyrker for metrotoget ikke har været korrekt bestemt.

3. Ruhedsspektret for de målte skinner har en spids ved en bølgelængde på 2,5 cm, og denne spids findes i de fleste af de målte tværsnit. Denne spids slår også igennem på kildestyrken, som ville have været lavere, hvis denne spids ikke var til stede. En del af forskellen mellem de gamle og de nye kildestyrker kan derfor muligvis tilskrives forskelle i ruhedsspektrene for hjul og skinne. Da hjul-/skinneruheden ikke blev målt ved de gamle målinger, er det derfor ikke muligt at belyse dette yderligere.

Appendix A

Indgangsdata til SoundPLAN – Nord2000 model

Tabel 3 viser de fundne værdier for a og b, som skal anvendes til beregning af kildestyrken pr. meter tog, $L_{w,1m}$, ved støjberegninger i henhold til Nord2000.

Kildestyrken anvendes generelt uanset sporopbygningen, dog er det afgørende for et korrekt resultat, at selve sporunderlaget modelleres som angivet her for SoundPlan:

- Ballasteret spor: Ballasten modeleres med ground absorption: "D: Normal uncompacted ground, Σ=200 kNs/m^4"
- Slap track: Sporunderlaget modeleres med ground absorption: "H: Very hard and dense surface, Σ=200.000 kNs/m^4"99

Tabel 3: Konstanter a og b til bestemmels af kildestyrken $L_{w,1m}$

Frekvens [Hz]	a	b
25	0	0
31,5	0	0
40	0	0
50	10,9	80,6
63	14,4	81,2
80	19,2	83,2
100	16,0	84,0
125	17,6	85,6
160	20,5	87,8
200	19,1	87,0
250	26,1	90,1
315	20,0	88,6
400	26,7	89,8
500	17,6	88,2
630	22,8	92,8
800	43,2	102,1
1000	33,4	98,0
1250	26,2	90,9
1600	25,2	90,9
2000	22,3	89,7
2500	23,7	86,0
3150	20,5	84,8
4000	19,1	84,4
5000	27,0	82,2
6300	23,1	80,7
8000	20,7	77,2
10000	25,6	78,1

Appendix B

Indgangsdata til SoundPLAN, CNOSSOS-model

Indgangsdata til SoundPLAN består i CNOSSOS-modellen af følgende parametre:

- Toglængde (=38 meter)
- Antal aksler (8 stk.)
- Totalt ruhedsspektrum pr. 1/3-oktav (indtastes under ”Track roughness”, for ”Wheel roughness” indtastes et spektrum, som ligger 10 dB lavere end spektret for ”Track roughness”)
- Overføringsfunktion mellem ruhed og udstrålet støj
- ”Traction noise”, ”Aerodynamic noise” og ”Structure transfer” sættes til 0[1]

Nedenfor angives de omtalte spektre og indtastningen af alle værdierne i SoundPlan gennemgås detaljeret.

Terrænet, herunder sporunderlaget, modelleres så det svarer til det, der er beskrevet for Nord2000 i Appendix A, dvs. hårdt terræn under spor, når der regnes på slap track, og absorberende terræn under spor, når der regnes på ballasteret spor.

[1] Se ”CNOSSOS-beregningsguide for skinnekøretøjer”, Sagsnr.: 121-23162, Hørsholm, 29. september 2021 udfærdiget af Per Finne

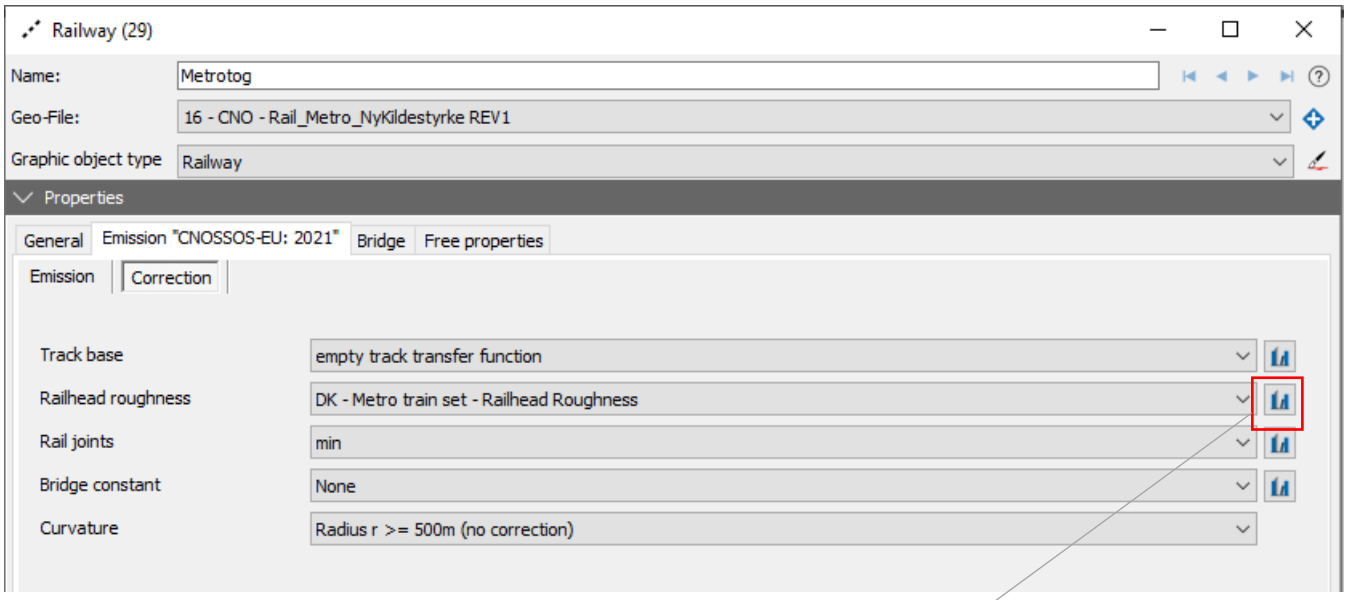
Tabel 4: Overføringsfunktion for skinne (track). Værdier under 50 Hz er sat til 0 dB

Frekvens [Hz]	L_{Hr} [dB]
25	0
31,5	0
40	0
50	88,3
63	86,3
80	87,4
100	89,0
125	88,2
160	88,3
200	96,4
250	102,6
315	102,7
400	103,3
500	103,3
630	106,3
800	110,5
1000	108,9
1250	107,6
1600	111,0
2000	112,7
2500	115,2
3150	117,3
4000	118,2
5000	118,9
6300	123,8
8000	122,6
10000	124,7

Tabel 5: Ruhedsspektre for skinner (Railhead) og hjul (Wheel)

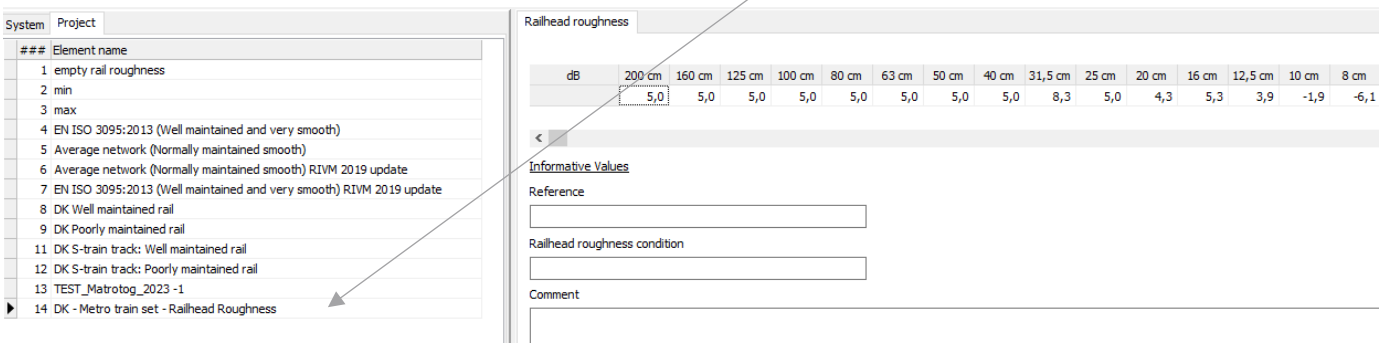
Bølgelængde, λ [m]	Skinneruhedsniveau [dB]	Hjulruhedsniveau [dB]
2	5	-5
1,6	5	-5
1,25	5	-5
1	5	-5
0,8	5	-5
0,63	5	-5
0,5	5	-5
0,4	5	-5,0
0,315	8,3	-1,7
0,25	5	-5,0
0,2	4,3	-5,7
0,16	5,3	-4,7
0,125	3,9	-6,1
0,1	-1,9	-11,9
0,08	-6,1	-16,1
0,063	-7,4	-17,4
0,05	-9,6	-19,6
0,04	-10,7	-20,7
0,0315	-6,3	-16,3
0,025	-2,2	-12,2
0,02	-8,2	-18,2
0,016	-12,7	-22,7
0,0125	-14,2	-24,2
0,01	-18,2	-28,2
0,008	-24,1	-34,1
0,0063	-25,9	-35,9
0,005	-27,8	-37,8
0,004	-33,3	-43,3
0,00315	-38,1	-48,1
0,0025	-40	-50,0
0,002	-42	-52
0,0016	-43	-53
0,00125	-44	-54
0,001	-45	-55
0,0008	-46	-56

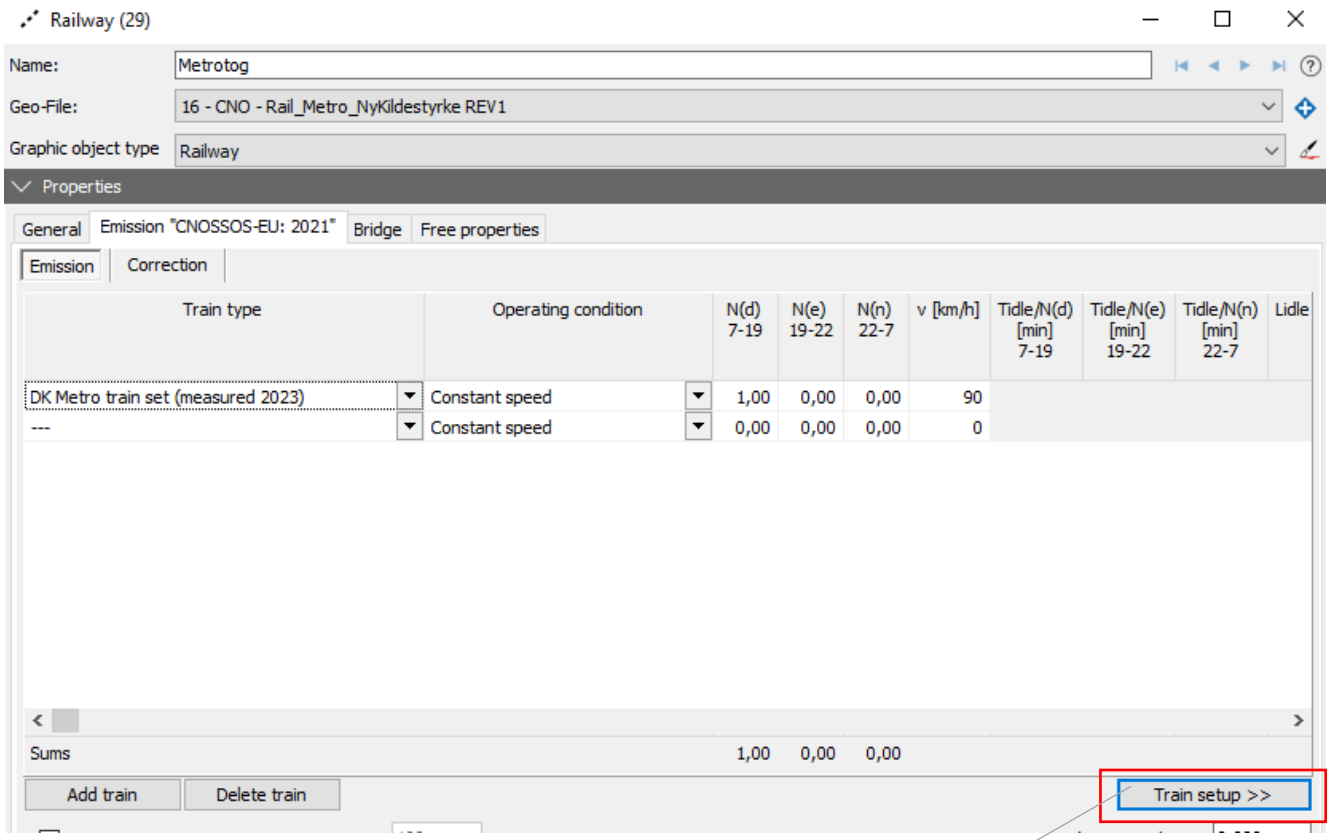
Screendump fra SoundPlan 9.0 (CNOSSOS)



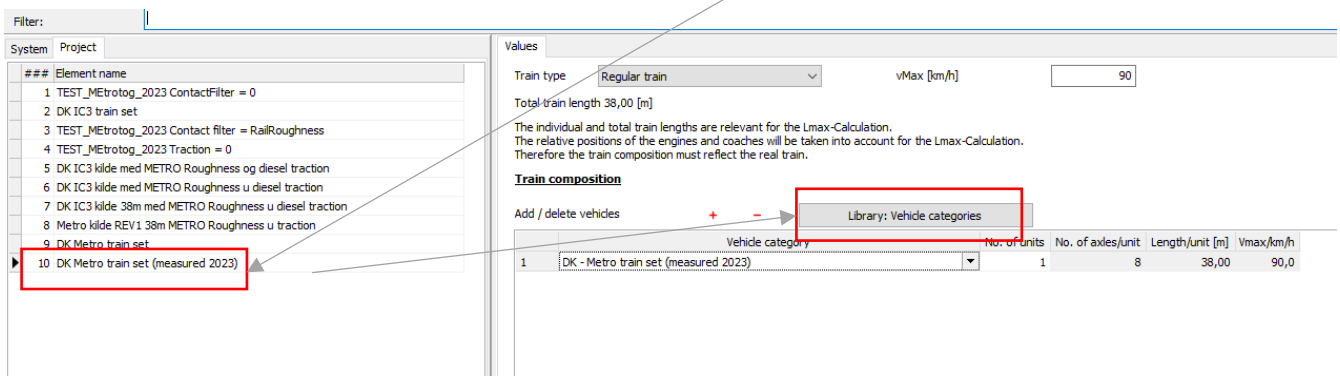
Track base vælges direkte fra listen til ”empty track transfer function

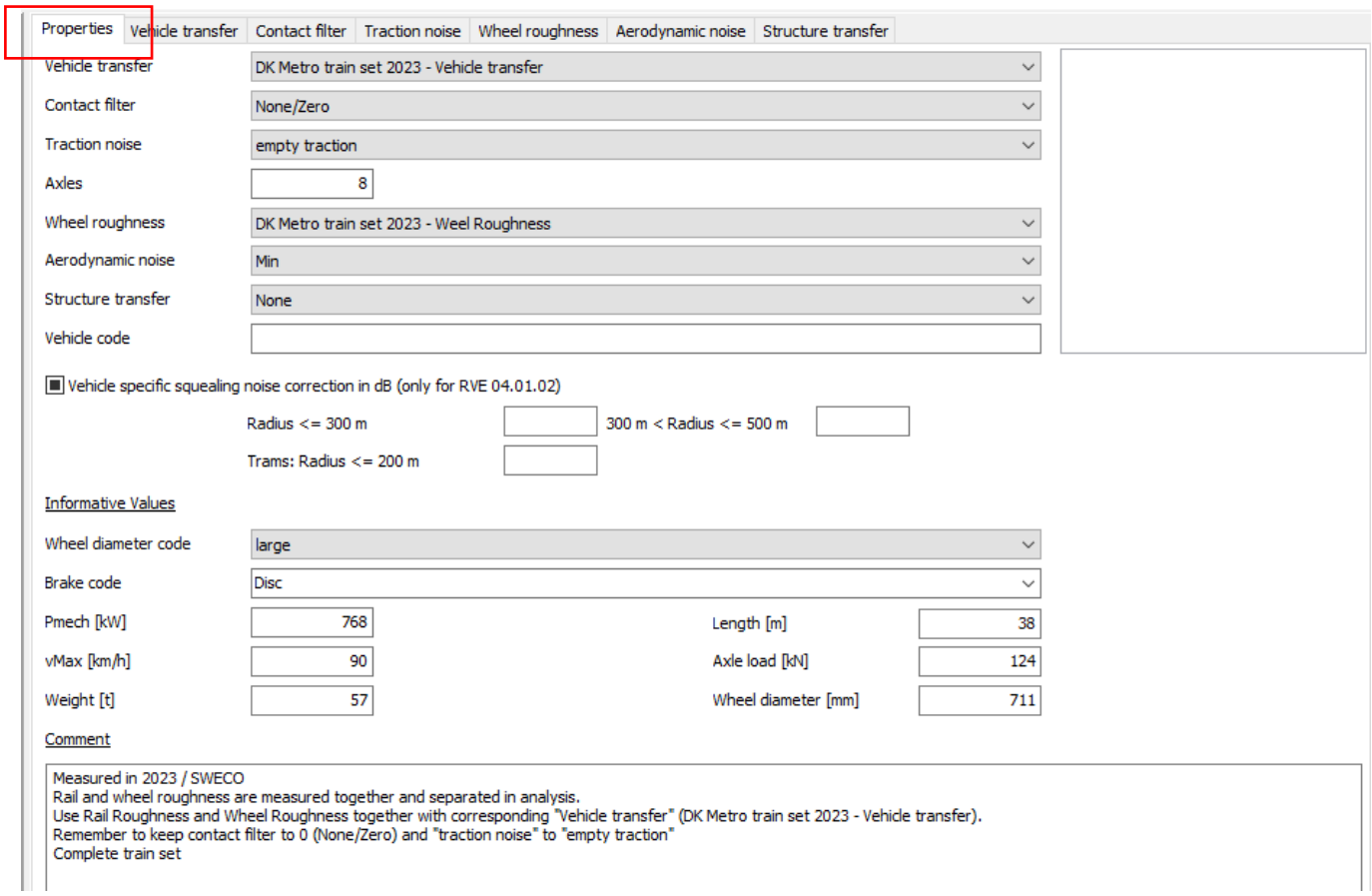
Nyt element for Railhead roughness skal oprettes i biblioteket med værdierne listet i tabel 5 kolonne ”Skinneruhedsniveau”



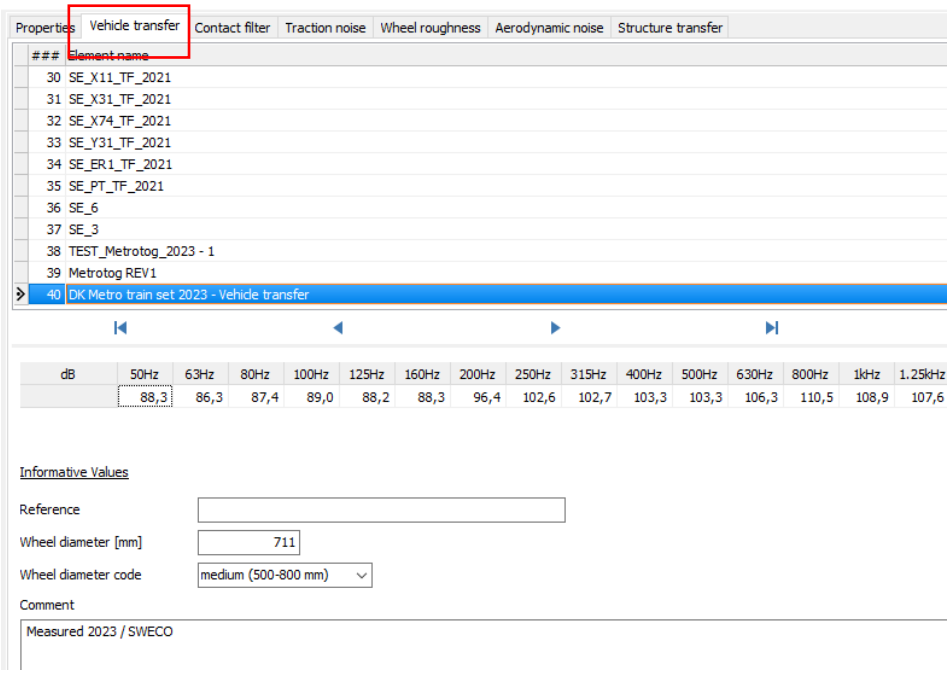


Under Train Setup oprettes ny togtype med ny hjulruhed (Tabel 5) og togets overføringsfunktion (Tabel 4)

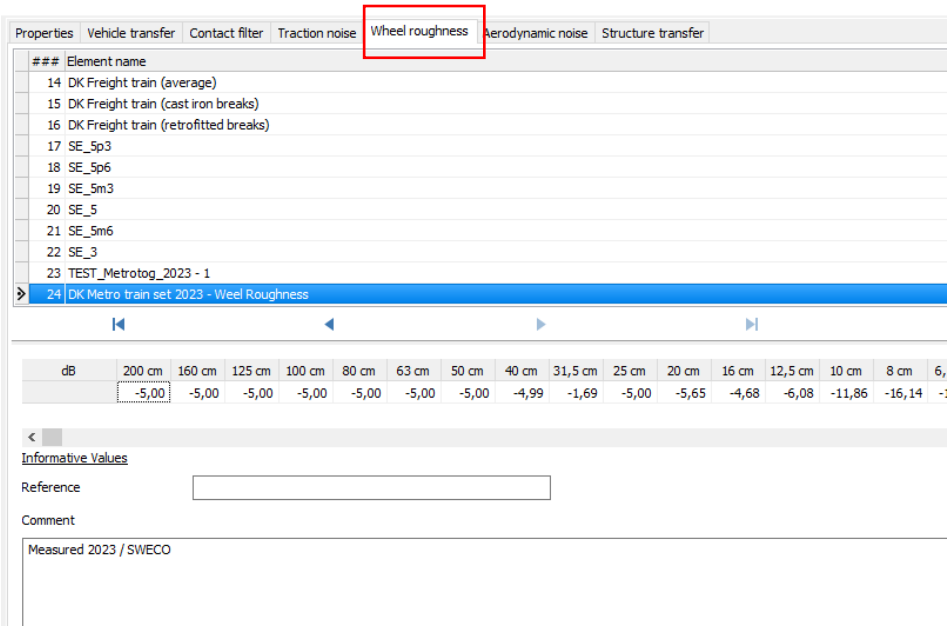
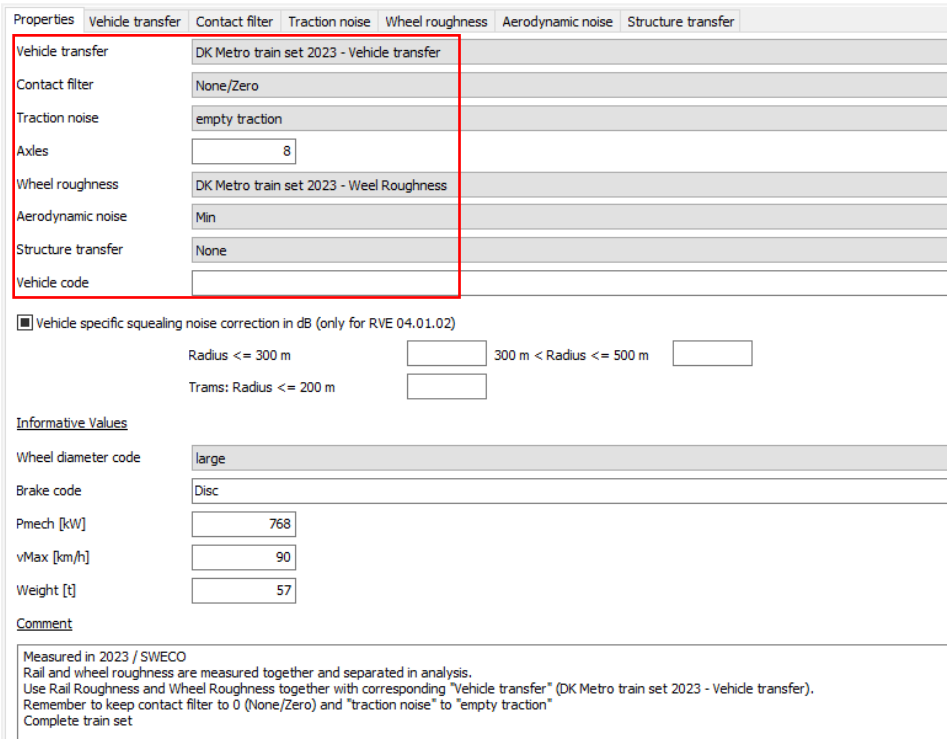




Togets overføringsfunktion (Tabel 4) indtastes for nyt element under fanen ”Vehicle transfer” førend det kan vælges fra drop down listen.



Under fanen Wheel Roughness oprettes nyt element og der indtastes målt hjulruhed jf. Table 5.



Kontroller nedenstående værdier og gem det nye datasæt for metrotoget