

Aarhus Letbane

Måling af skinneruhed og kildestyrke for
togtyperne Tango og Variobahn



Ændringsliste

Ver	Dato	Beskrivelse af ændringen	Revideret	Godkendt af
1.0				
2.0	29-06-2023	Opdatering af værdier i Tabel 3		

Sweco Danmark A/S	48233511
Projekt	Aarhus Letbane - Kildestyrker
Projektnummer	41007801
Kunde	Aarhus Letbane 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_030_23_version_2.docx

1	Indledning	5
2	Aarhus Letbane	5
3	Målemetoder, generelt	6
3.1	Måling af skinneruhed	6
3.2	Kalibrering af måletog	6
3.3	Bestemmelse af kildestyrke	7
4	Måleprogram	7
5	Praktisk gennemførelse af målinger	7
6	Måletværsnit	8
6.1	MP1, Grenåbanen, km 66,6	9
6.2	MP5, Grenåbanen, km 47,8	10
6.3	MP16, Odderbanen, km 13,2	11
6.4	MP18, Odderbanen, km 12,0	12
7	Skinneruhed	13
7.1	S1 – Odderbanen	14
7.2	S2 Indre strækning	14
7.3	S3 – Grenåbanen	15
7.4	S4 - Indre Strækning, Lisbjergskolen	15
7.5	Kommentarer til skinneruheden	17
8	Kildestyrker til Nord2000	17
8.1	Metodik	17
8.1.1	Overføringsfunktioner, Hr	17
8.1.2	Overføringsfunktioner for rilleskinner	18
8.1.3	Overføringsfunktioner i Nord2000	18
8.1.4	Korrektion til referencetværsnit	18
8.1.5	Lydtrykniveau 7,5 meter fra spormidte	19
8.1.6	Bestemmelse af a og b-værdier	19
9	Resultater, kildestyrke	20
9.1	Overføringsfunktioner	20
9.2	Ruhedsspektre til kildestyrke	21
9.3	Fundne kildestyrker	24
9.4	Endelige kildestyrker til Nord2000	26

Indhold

Aarhus Letbane har anmodet SWECO om at udføre måling af skinneruhed på samtlige af letbanens spor og samtidig bestemme kildestyrker for letbanens to togtyper til brug for beregning af nabostøj i henhold til Nord2000.

De to opgaver er løst under ét og denne rapport redegør for opgavernes løsning, de anvendte måle- og analysemetoder og de resultater, der er fundet.

1 Indledning

Aarhus Letbane har anmodet SWECO om at udføre måling af skinneruhed på samtlige af letbanens spor. Anmodningen er forårsaget af at Letbanen har modtaget et antal klager over støjen fra banen, og en indledende besigtigelse af udvalgte tværsnit har givet begrundet mistanke om et uhensigtsmæssigt højt skinneruhedsniveau som værende den primære årsag til klagerne.

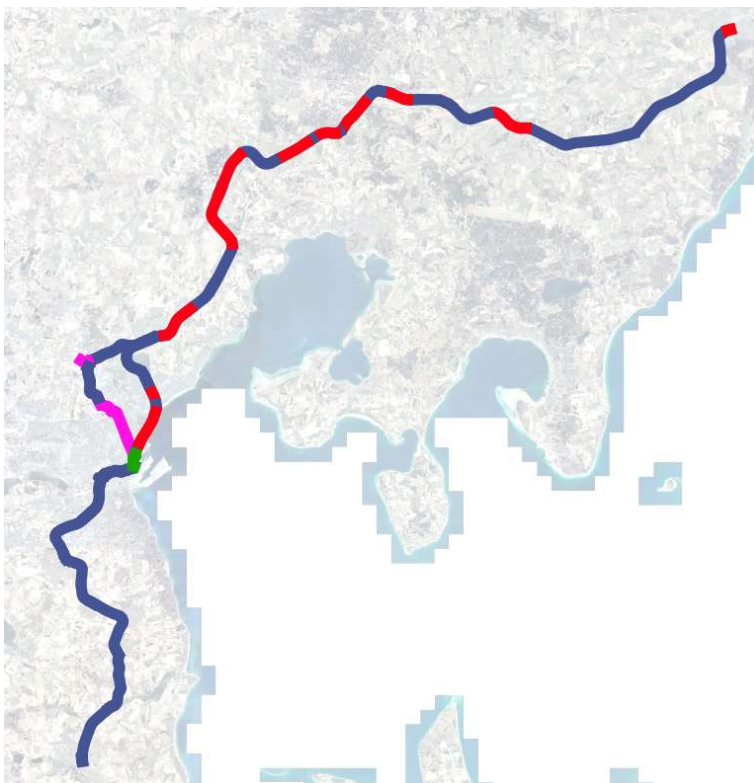
Samtidig er der i forbindelse med en påbudt støjkortlægning behov for en bestemmelse af kildestyrken for de to togtyper, der kører på letbanen. Kildestyrken skal bestemmes i en form, der er direkte anvendelig i forhold til Nord2000-modellen for beregning af jernbanestøj.

2 Aarhus Letbane

Aarhus Letbane består af Odderbanen, Grenåbanen og Indre Strækning, som sammenlagt har en længde på ca. 110 km.

Sporene på Odderbanen er monobloksveller med UIC60-skiner og på Grenåbanen er der ligeledes monobloksveller og strækninger vekslede med skinnetyperne UIC60 og DSB45.

Indre Strækning består både af monobloksveller med UIC60-skiner og rilleskiner, som enten ligger i beton eller med en overflade af grus/græs mellem sporene. Skinnetyperne er vist i Figur 1



Figur 1: Skinnetyper på Aarhus Letbane. Rød: DSB45, mørkeblå, UIC60, grøn: rilleskiner i beton, lyserød: rilleskiner i grus/græs

3 Målemetoder, generelt

3.1 Måling af skinneruhed

SWECO's metode til måling af skinneruhed er baseret på at et udvalgt tog – herefter kaldet "måletog" – bestykses med mikrofoner og accelerometre, som herefter måler støjen og accelerationerne forårsaget af overfladeruheden på skinnerne.

Ud fra disse målinger kan den såkaldte ækvivalente skinneruhed findes, idet der anvendes en overføringsfunktion fra lydtrykniveau hhv. acceleration til skinneruhed, som er specifik for det anvendte måletog. Begrebet ækvivalent skinneruhed dækker over, at metoden ikke måler ruheden i hele skinnens bredde, men i kontaktbåndet mellem måletogs hjul og skinnen. Det er imidlertid også denne del af ruheden, der giver den støj, som banens naboer oplever, og det vil også være i kontaktbåndet, at de fejl, som i sidste instans kan føre til alvorligere skinnfejl, udvikler sig. Derfor er metoden hensigtsmæssig og effektiv i forhold til at stille diagnoser vedrørende skinnens kvalitet og beskaffenhed.

Det skal understreges at niveauet og frekvenssammensætningen af den støj og de accelerationer, der måles, og som danner grundlag for bestemmelse af skinneruheden, afhænger af togets hastighed under målingerne, men at den resulterende skinneruhed IKKE er afhængig af måletogs hastighed grundet den særlige metode, der anvendes til at bestemme skinneruheden.

Med SWECO's metode er det muligt at måle skinneruhed med måletogshastigheder fra 15 km/t og op til 120 km/t. Det vil derfor være meget lidt af banens spor, der ikke kan opmåles.

3.2 Kalibrering af måletog

Som beskrevet i 3.1 findes skinneruheden ved hjælp af en overføringsfunktion, som er specifik for måletoget. Kalibreringsfunktionen findes ved lade måletoget passere et antal på forhånd udvalgte måletværsnit, hvor det samlede ruhedsniveau af måletogs hjul og skinnens overfladeruhed måles samtidigt med at der måles med måletogs mikrofoner og accelerometre.

Skinneruheden i måletværsnittene måles med en metode udviklet af TNO i Holland, som involver følgende transducere:

- Mikrofon placeret 7,5 meter fra spormidte og 1,2 meter over terræn
- Accelerometer monteret under skinnefoden, som måler de lodrette vibrationer i skinnen
- Fotocelle, som detekterer passagen af akslerne på de tog, der passerer

På grundlag af disse signaler bestemmes følgende parametre – alle målt pr. 1/3-oktav over hver togpassage:

- Lydtrykniveauet ved mikrofonen
- Accelerationsniveauet i skinnen
- Det samlede ruhedsniveau af hjul og skinne
- Overføringsfunktionen fra skinneruhed til lydtrykniveau ved mikrofonen

Ved at sammenholde niveauet for støj og accelerationer målt på måletoget ved passage af måletværsnit med det målte ruhedsniveau fra måletogets passage kan overføringsfunktionerne fra skinneruhed til togets mikrofon- hhv. accelerationssignaler bestemmes. I praksis anvendes normalt kun overføringsfunktionerne til mikrofonerne, da denne har vist sig at være bedst bestemt og give de mest reproducerbare resultater.

3.3 Bestemmelse af kildestyrke

Metoden for bestemmelse af kildestyrke er baseret på resultater opnået med den samme målemetode udviklet af TNO, som er beskrevet i 3.2 og hvor overføringsfunktionen mellem skinneruhed og lydtrykniveauet i mikrofonpositionen bestemmes i en række tværsnit og ved forskellige hastigheder for et udvalg af tog.

4 Måleprogram

Alle målinger er udført og afviklet fra mandag den 8. juni til tirsdag den 9. juni.

Der blev målt med PBA-metoden på både måletog og tog i drift i 4 tværsnit, se afsnit 6.

Kørsler med måletoget var planlagt til at sikre alle nødvendige målinger til bestemmelse af skinneruhed, kalibrering af måletog og kildestyrke for Tango ved forskellige hastigheder.

I de to måletværsnit på Odder-banen blev der arrangeret nogle få passager af Variobahn med varierende hastighed i et afgrænset tidsrum for at opnå tilstrækkeligt med målinger til at bestemme kildestyrken korrekt for dette tog.

5 Praktisk gennemførelse af målinger

Ved fastlæggelse af måleprogram var det af afgørende betydning, at programmet skulle sikre alle nødvendige målinger til bestemmelse af skinneruhed, kalibrering af måletog og kildestyrke for Tango ved forskellige hastigheder. Desuden var der behov for at arrangere nedsat hastighed ud for måletværsnit på Odderbanen for Variobahn for at sikre tilstrækkeligt med målinger for denne togtype. Et togsæt med hjul, der var afdrejet en uge før selve målingerne skulle finde sted, blev udtaget af driften og indrettet til måletog ved montage af mikrofoner, accelerometre, tachoprobe og GPS-antenne på taget.

Alle målinger på måletog blev udført aften/nat mandag den 8. juni og tirsdag den 9. juni.

Målingerne med måletoget omfattede:

- Mandag den 8. juni
 - Kørsel med strækningshastighed (100 km/t) fra Aarhus til Grenå
 - Herefter kørsel mellem Grenå og Ryomgård med hastighederne 40, 50, 63, 80 og 100 km/t ud for de to måletværsnit, ellers med strækningshastighed
 - Kørsel med strækningshastighed fra Grenå til Aarhus
- Tirsdag den 9. juni
 - Kørsel med strækningshastighed (80 km/t) fra Aarhus til Odder

- Herefter kørsel mellem Odder og Assendrup med hastighederne 40, 50, 63 ud for de to måletværsnit, ellers med strækningshastighed
- Kørsel med strækningshastighed fra Grenå over Aarhus til Aarhus Universitetshospital (AUH)
- Herefter kørsel mellem AUH og Lystrup med varierende hastighed og en enkelt kørsel mellem AUH og Lisbjergskolen
- Kørsel med strækningshastighed fra AUH til depot

I de fire måletværsnit blev der udover passagerne af måletoget også målt på en del passager af tog i drift, på Grenå-banen Tango og på Odder-banen Variobahn. Til bestemmelse af kildestyrke kræves målinger ved et antal forskellige hastigheder for at sikre en tilfredsstillende regression ved de efterfølgende analyser. For Tango-togets vedkommende var dette sikret med måletoget og for Variobahn blev der arrangeret nogle få passager af de to tværsnit på Odderbanen med varierende hastighed i et afgrænset tidsrum.

6 Måletværsnit

Udvælgelsen af måletværsnit er foretaget ud fra følgende kriterier:

- Terrænet skal være plant og absorberende til begge sider af sporet uden dybe grøfter og genstande, som kunne påvirke lydens udbredelse.
- Sporet skal ligge nogenlunde i niveau med terræn
- Tværsnit skal ligge på ret spor.
- Skinnetyper skal være UIC60 og skinnens overflade skal være homogen, dvs. uden lave svejsninger, lokale fejl i overfladen m.m., over en strækning på 25 meter på begge sider af måletværsnittet
- Der skal være adgang til tværsnittet med en bil indeholdende måleudstyr
- Togets hastighed gennem tværsnittet skal være konstant og tilnærmet maksimal hastighed for hele strækningen
- Der skal være tilstrækkelig udsigtslængde til begge sider, da der skulle monteres måleudstyr på skinnerne.

Det blev indledningsvist undersøgt om det var muligt at finde måletværsnit på Indre Strækning så kildestyrken ved kørsel på rilleskinner kunne bestemmes ved direkte måling. Det viste sig ikke muligt at finde et sted, som opfyldte alle de nødvendige kriterier. Først og fremmest kunne der ikke opnås en tilstrækkelig mikrofonafstand til sporet uden enten at komme i konflikt med trafikken på kørebanen eller med det nærmestliggende spor og for rilleskinner i beton, kunne der ikke monteres et accelerometer under skinnerne til måling af skinneruheden. Det blev derfor besluttet at måle kildestyrken direkte på Odderbanen og Grenåbanen og i stedet estimere kildestyrken ved kørsel på rilleskinner ud fra målingerne på disse baner kombineret med målinger fra måletoget. Dette er beskrevet nærmere i afsnit 8.1.2.

Den 20. og 21. marts blev der foretaget en gennemgang af 17 på forhånd udvalgte mulige måletværsnit. Under gennemgangen viste der sig at være endnu en mulighed, så det samlede antal kom op på 18. Ud af disse 18 viste der sig at være 2 egnede på hver bane, som var tæt på at være ideelle.

De 4 tværsnit, der er udvalgt til måling er:

- MP1, Grenåbanen, km 66,6
- MP5, Grenåbanen, km 47,8
- MP16, Odderbanen, km 13,2
- MP18, Odderbanen, km 12,0

6.1 MP1, Grenåbanen, km 66,6

Indkørsel til målepunktet er ad Ringvejen 6-8 (fra vej nr. 16). Målepunktet på den ene side af sporet var placeret et lille stykke ude på grusvejen, det andet i græs. Terræn er nogenlunde jævnt.



Figur 2: MP1, retning mod Grenå



Figur 3: MP1, retning mod Aarhus

6.2 MP5, Grenåbanen, km 47,8

Terrænet er tilnærmelsesvist plant. Målepunktet på den østlige side af sporet står i kanten af et hegn, men dette vurderes ikke at påvirke målingerne Grenåbanen, km 47,7.



Figur 4: MP5, retning mod Grenå



Figur 5: MP5, retning mod Aarhus

6.3 MP16, Odderbanen, km 13,2

Terræn er plant, dog en smule lavt på den sydlige side af sporet. Det vurderes, at der kan korrigeres for dette ved de efterfølgende analyser.



Figur 6: MP16, retning mod Aarhus



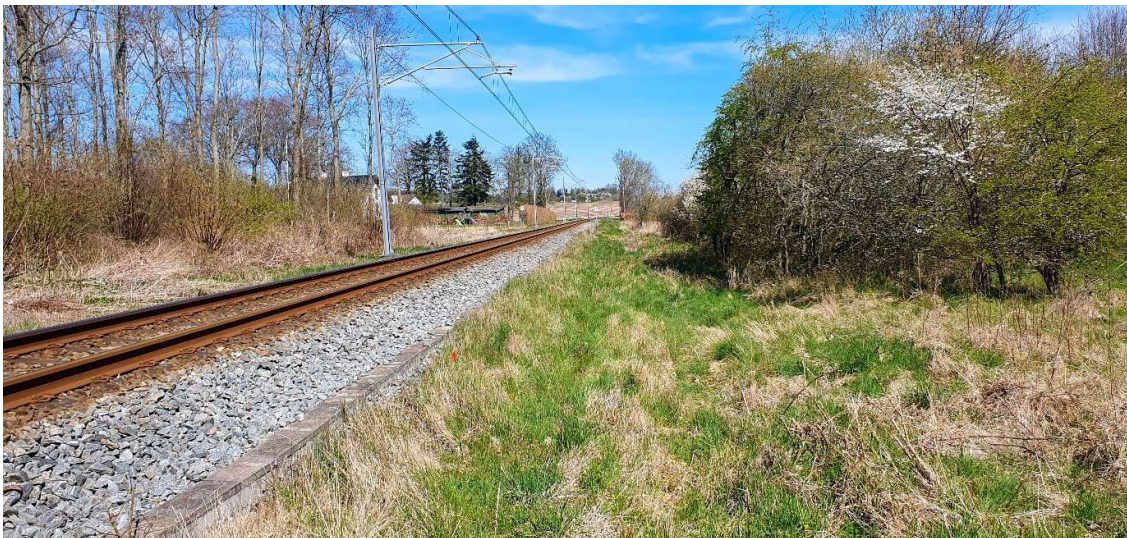
Figur 7: MP16, retning mod Odder

6.4 MP18, Odderbanen, km 12,0

Terrænet er nærmest ideelt i dette tværsnit. Det ligger ca. 25 meter fra en gammel overkørsel, som imidlertid ikke påvirker støjbilledet, når toget passerer tværsnittet.



Figur 8: MP18, retning mod Odder



Figur 9: MP18, retning mod Aarhus

7 Skinneruhed

De udførte målinger har resulteret i værdier for skinneruheden pr. meter spor for alle Letbanens skinner på nær de få steder, hvor hastigheden af måletoget var mindre end 15 km/t.

Alle målinger er udført som spektre for skinneruheden pr. 1 meter spor og kan rekvireres hos SWECO. I denne rapport og i det materiale, der er afleveret til Aarhus Letbane i form af regneark med resultater og KML-filer til illustration af skinnekvaliteten i f.eks. Google Earth, er det parameteren, $L_{ACA,90}$, der er rapporteret.¹

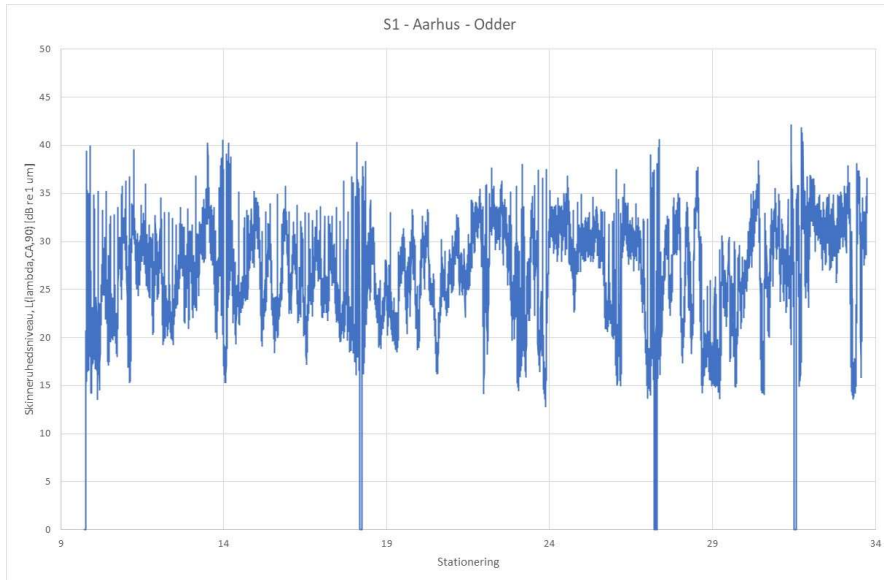
Det skyldes flere forhold:

- $L_{ACA,90}$ udtrykker skinneruheden ved et enkelt tal, som er tilnærmelsesvist proportional med støjen fra sporet. I modsætning hertil kan det være vanskeligt at danne sig et overblik over skinnekvaliteten ud fra spektrene alene.
- $L_{ACA,90}$ er tilnærmelsesvist proportional med støjen og derfor en god parameter, når der skal træffes beslutning om slibning eller fræsning for at nedbringe støjen til banens naboer
- $L_{ACA,90}$ har vist sig at være nyttig til identifikation af begyndende overfladefejl i skinnerne, lave svejsninger m.m.

Som nævnt er alle data overleveret til Letbanen i anden form for videre bearbejdning og planlægning af slibning/fræsning, og denne rapport begrænser sig derfor til en kort oversigtsmæssig præsentation af de målte skinneruheder med kommentering af de mest iøjnefaldende forhold.

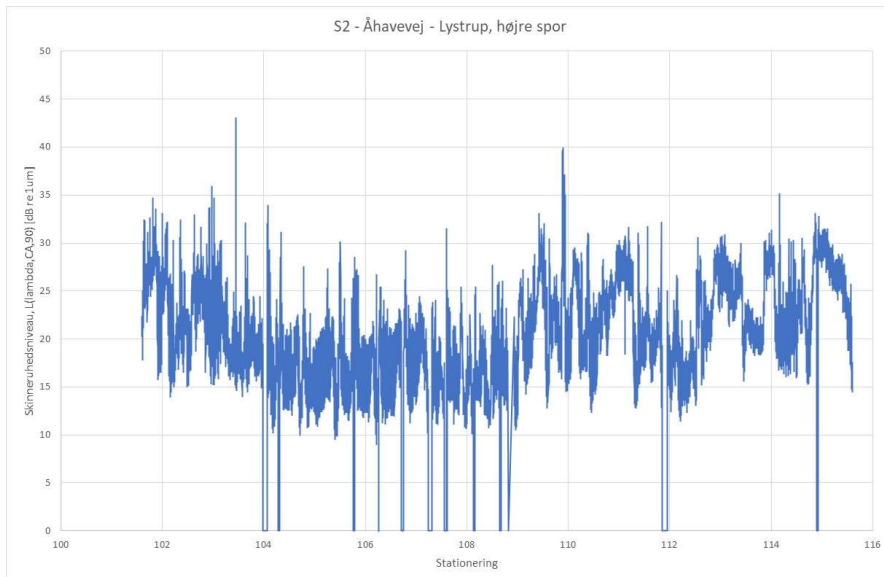
¹ Her angiver "90", at parameteren er beregnet for en hastighed på 90 km/t, hvilket gør, at skinneruheder for hele banen er direkte sammenlignelige. 90 km/t er valgt som en middelværdi for de to strækningshastigheder på Grenå- og Odderbanen. Bemærk at der ved målinger for Banedanmark beregnes ved 120 km/t idet strækningshastighederne på Banedanmarks spor generelt er væsentlig højere end for Letbanen.

7.1 S1 – Odderbanen

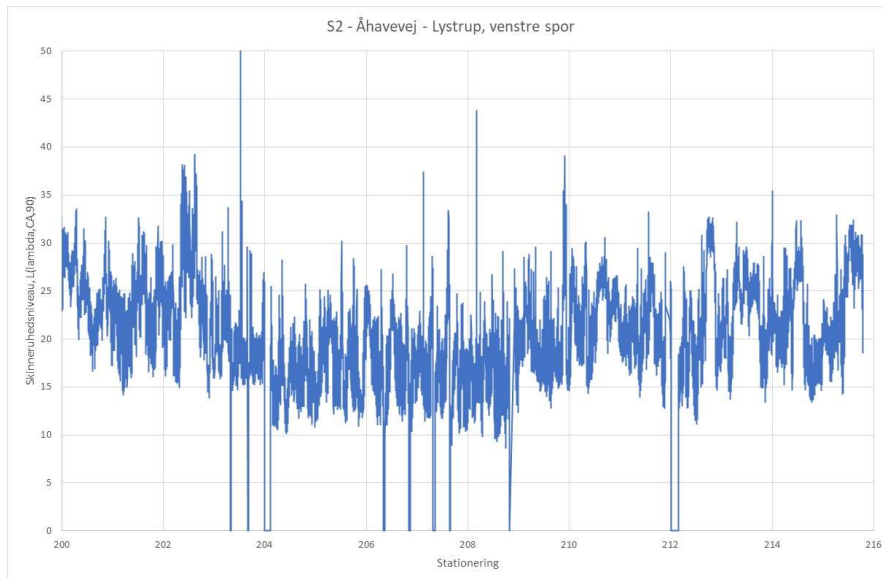


Figur 10: Målte værdier af skinneruhed, $L_{ACA,90}$ på Odderbanen

7.2 S2 Indre strækning

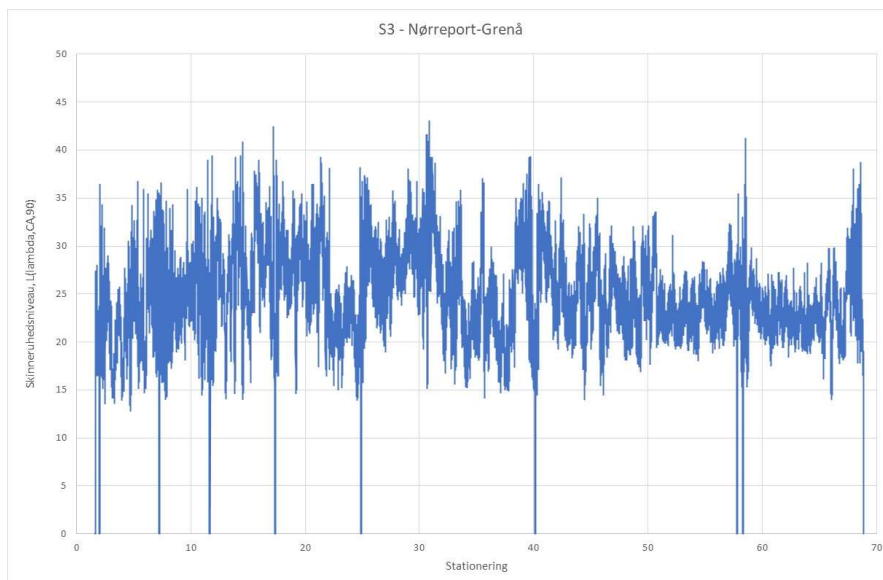


Figur 11: Målte værdier af skinneruhed, $L_{ACA,90}$ på Indre strækning, Aahavevej - Lystrup, "højre" spor



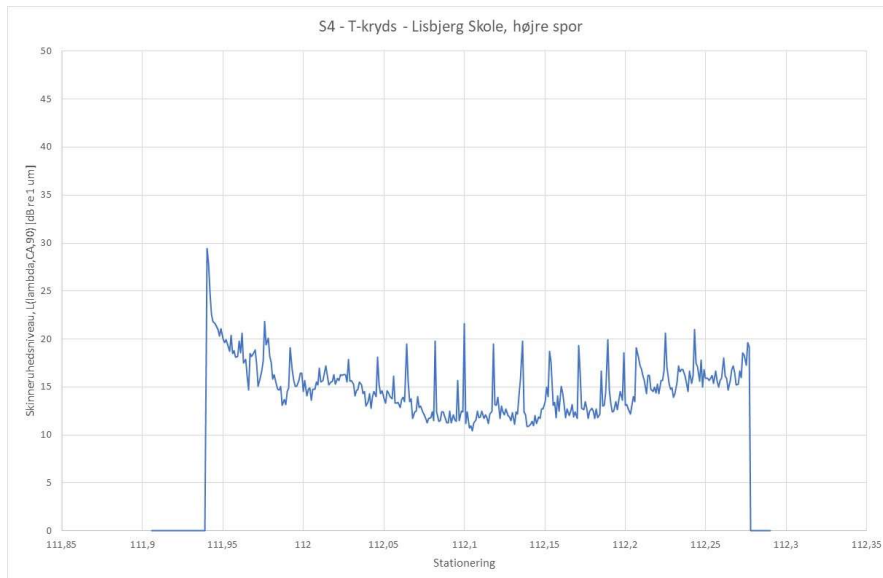
Figur 12: Målte værdier af skinneruhed, $L_{\lambda CA,90}$ på Indre strækning, Aahavevej - Lystrup, "venstre" spor

7.3 S3 – Grenåbanen

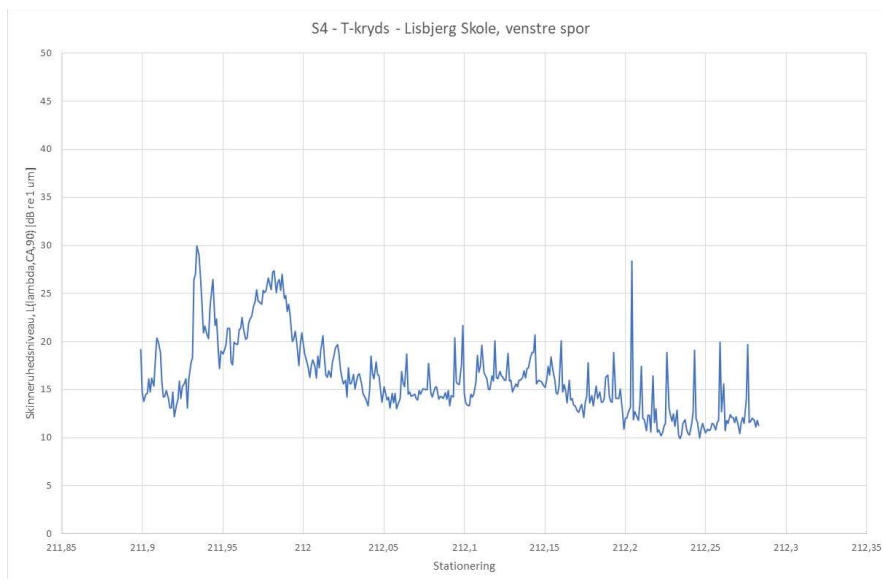


Figur 13: Målte værdier af skinneruhed, $L_{\lambda CA,90}$ på Grenåbanen

7.4 S4 - Indre Strækning, Lisbjergskolen



Figur 14: Målte værdier af skinneruhed, $L_{\lambda CA, 90}$, Indre Strækning, T-kryds til Lisbjergskolen, "højre" spor



Figur 15: Målte værdier af skinneruhed, $L_{\lambda CA, 90}$, Indre Strækning, T-kryds til Lisbjergskolen, "venstre" spor

7.5 Kommentarer til skinneruheden

Graferne i afsnittene 7.1 - 7.4 viser skinneruheden for hver kilometer spor med angivelse af kilometer/stationering. Der er enkelte steder, hvor grafen falder til en værdi på 0 dB. Det er ikke udtryk for at skinneruheden er lav, men skyldes, at der ikke er nogen måling af skinneruheden her på grund af at måletoget kørte for langsomt (junder 15 km/t) til at kunne måle.

På Odderbanen og Grenåbanen ses der store variationer i skinneruheden og på en stor del af strækningerne et endda meget højt skinneruhedsniveau. Dette forklarer at der er naboeer, der klager over støjen fra banen. Den høje skinneruhed medfører samtidigt et unødvendigt højt støjniveau i togene, både i passagerområdet og i førerrum.

På Odderbanen – især på den sydlige del – ses peaks på graferne, som ligger med konstant mellemrum. Dette er efter al sandsynlighed lave svejsninger, som både giver støj og som belaster skinnen hårdt.

På Indre Strækning ses tilsvarende peaks, som igen vurderes at skyldes lave svejsninger.

I afsnit 9.2 diskuteres ruhedsmålingerne yderligere og ovennævnte kommentarer suppleres med statistiske nøgletal og gennemsnitlige ruhedsspektre.

8 Kildestyrker til Nord2000

Til kortlægning af støjen fra letbanen i henhold til Nord2000 kræves det, at kildestyrken fra Letbanens tog bestemmes. I Nord2000 udtrykkes kildestyrken, L_w/m ved formlen

$$L_w = a \log\left(\frac{v}{100}\right) + b \text{ [dB/m]} \quad (1)$$

, hvor v er toghastigheden. Opgaven består dermed i at bestemme konstanterne a og b ved alle 1/3-oktaver i frekvensområdet 50 – 10.000 Hz.

Grundlaget for at bestemme kildestyrkerne er de målinger, der er foretaget i de 4 måleværnsnit.

8.1 Metodik

8.1.1 Overføringsfunktioner, H_r

I hvert måleværnsnit er optagelserne fra de forbikørende tog analyseret med PBA-software udviklet af TNO i Holland. For hver togpassage er der målt over passageperioden, dvs. fra togets forende var ud for målepunktet og til togets bagende havde passeret målepunktet. For hver togpassage har dette resulteret i 1/3-oktav-spektre for ækvivalent lydtrykniveau, L_{eq} , accelerationsniveau på skinne, L_a , totalt ruhedsniveau, dvs. det samlede ruhedsniveau for hjul og skinne, L_r , og endelig overføringsfunktionen, H_r , fra skinneruhedsniveau til lydtrykniveau ved målemikrofonen.

De fundne overføringsfunktioner for henholdsvis Tango og Variobahn er midlet for hvert tværnsnit og på hver side af sporet, resulterende i sammenlagt 8 middelloverføringsfunktioner for Tango og 4 for Variobahn.

8.1.2 Overføringsfunktioner for rilleskinner

Som angivet i 6 har det kun været muligt at anvende PBA-metoden til bestemmelse af kildestyrke på Grenå- og Odderbanen, hvor der ligger normalt ballasteret spor. På den Indre Strækning (S2/S4) ligger rilleskinner som enten er lagt i beton eller afsluttet med en grus/græs-belægning.

Overføringsfunktionerne for rilleskinnerne har derfor måttet bestemmes indirekte ved en anden metode.

Metoden bygger på følgende ræsonnement: Måletoget er bestykket med både mikrofoner og accelerometre, og de accelerationer hhv. den støj, de måler, er for begges vedkommende forårsaget af skinneruheden. Overføringsfunktionen mellem accelerometer og mikrofon er forholdsvis konstant på normalt ballasteret spor, men skifter, når toget kører på rilleskinner, idet støjen påvirkes af ændrede afstrålings- og refleksionsforhold omkring rilleskinnen mens der ikke sker noget tilsvarende for accelerationen, som stadig kun er påvirket af skinneruheden. Det er rimeligt at antage at den ændring, som kan måles i overføringsfunktionen mellem accelerometer og mikrofon, når der skiftes fra ballasteret spor til rilleskinner også vil afspejles i overføringsfunktionen for støjen til omgivelserne. Overføringsfunktionen for støjen, når Variobahn kører på rilleskinner er derfor fundet ved at justere overføringsfunktionen for ballasteret spor med denne forskel.

Da målingerne ikke har vist nævneværdig forskel mellem rilleskinner i grus/græs og i beton, er der anvendt middelværdier fra begge typer spor og der er bestemt en samlet overføringsfunktion for Variobahn på rilleskinner.

8.1.3 Overføringsfunktioner i Nord2000

For at kunne bestemme kildestyrken til brug for Nord2000 er det nødvendigt at beregne de overføringsfunktioner, som Nord2000 finder for udbredelsen fra sporet til mikrofonerne i de 4 måletværsnit.

Terrænkurverne for de 4 måletværsnit, dvs. udbredelsen til begge sider af sporet, er derfor lagt ind i Soundplan, og der er foretaget en beregning af lydtrykniveauet for dagperioden, L_d , for et fiktivt tog med hastigheden 50 km/t og en længde på 10 meter.

Kildestyrkerne pr. 1/3-oktav i Nord2000 er lineær mens de beregnede værdier for L_d er A-vægtede.

Værdierne for L_d korrigeres derfor først for A-vægtning inden de omregnes til et lineært SEL-spektrum for det aktuelle tog (Tango/Variobahn). Omregningen sker ved at addere $10 \cdot \log(12 \cdot 3600)$ til L_d og derefter korrigerer for den aktuelle toglængde i forhold til længden af det fiktive tog ($= 10 \cdot \log(l/10)$), hvor l er længden af det aktuelle tog). Forskellen pr. 1/3-oktav mellem det derved fremkomne SEL-spektrum og indgangskildestyrken udgør dermed den værdi, der skal lægges til de lydtrykniveauer, der er målt for de enkelte togpassager.

8.1.4 Korrektion til referencetværsnit

Da de 8 hhv. 4 middelloverføringsfunktioner er bestemt under lidt varierende terræn- og udbredelsesforhold, er det nødvendigt at korrigere dem alle til samme referencetværsnit inden de kan midles sammen til en gennemsnitlig overføringsfunktion for alle tværsnit.

Der er derfor udvalgt et referencetværsnit (MP16, på den nordvestlige side af sporet), som har tilnærmelsesvist fladt og absorberende terræn i niveau med sporet og uden betydende grøft mellem spor og målepunkt.

Korrektionsværdierne for de øvrige tværsnit er fundet som forskellen mellem de ovenfor fundne 1/3-oktav-værdier for L_d i de enkelte tværsnit og værdierne for L_d i referencetværsnittet.

Efter korrektion til referencetværsnittet er de 8 overføringsfunktioner for Tango og de 4 for Variobahn midlet til en samlet overføringsfunktion.

8.1.5 Lydtrykniveau 7,5 meter fra spormidte

På grundlag af den samlede middelloverføringsfunktion for de to togtyper, er det ækvivalente lydtrykniveau for en togpassage beregnet for hastighedsintervallet 40 – 100 km/t i spring af 10 km/t.

Til beregningerne er anvendt de middeldruhedsspektre, der er beskrevet i 9.2.

Det fundne ækvivalente lydtrykniveau for togpassagen er derefter omregnet til en SEL-værdi ud fra passagetiden, som er bestemt af togets længde og hastighed.

Omregningen fra de målte/beregnete lydtrykniveauer til kildestyrke forudsætter, at der ikke kun måles/beregnes over det tidsrum, hvor toget befinder sig ud for mikrofonen, men at perioden også omfatter det tidsrum før og efter togpassagen, hvor lydtrykniveauet er mindre end 10 dB under niveauet for selve togpassagen. Miljøstyrelsens referencelaboratorium har i forbindelse med tilsvarende bestemmelse af kildestyrker for Banedanmark fundet en korrektionsfaktor til de fundne SEL-værdier, ΔSEL , som er indarbejdet i metoden, og de fundne SEL-værdier er korrigeret med denne.

8.1.6 Bestemmelse af a og b-værdier

Efter at have udført alle beskrevne korrektioner foreligger 7 spektre for SEL ved hastighederne 40, 50, 60, 70, 80, 90 og 100 km/t, som alle kan omregnes til et lydeffektspektrum, $L_{w,1m}$, i frekvensområdet 50 – 10.000 Hz.

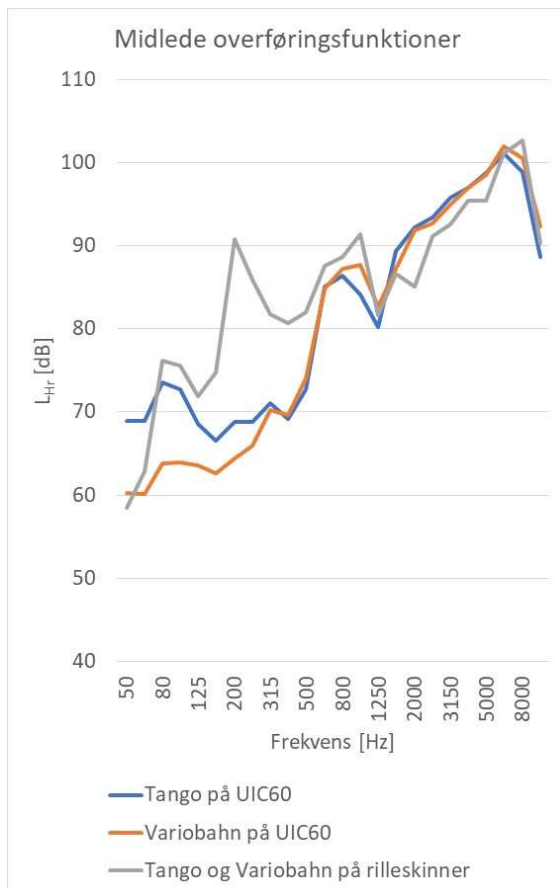
Værdierne for a og b bestemmes herefter pr. 1/3-oktav ved regression over formel (1).

9 Resultater, kildestyrke

9.1 Overføringsfunktioner

Der er i alt fundet 3 overføringsfunktioner:

- Tango på normalt ballasteret spor med skinnetype UIC60
- Variobahn på normalt ballasteret spor med skinnetype UIC60
- Tango og Variobahn på rilleskinner



Figur 16: Gennemsnitlige overføringsfunktioner for Tango og Variobahn

Overføringsfunktionerne er vist i Figur 16. Figuren viser, at der ved frekvenser over ca. 250 Hz ikke er nævneværdig forskel på overføringsfunktionerne for de to togtyper, Tango og Variobahn, når der køres på normalt ballasteret spor. Når der køres på rilleskinner, sker der derimod en mindre forøgelse af støjen ved de lave frekvenser (op til ca. 1000 Hz) og en tilsvarende men mindre dæmpning af støjen fra 1000 Hz og opefter).

9.2 Ruhedsspektre til kildestyrke

Som beskrevet i afsnit 7.5 er der store variationer i skinneruheden på Aarhus Letbane. Der vil derfor også være tilsvarende store variationer i den samlede kildestyrke for toget for så vidt denne er bestemt af rullestøjen, hvilket vil være tilfældet allerede ved lave hastigheder. Det er derfor nødvendigt at tage stilling til, hvilket ruhedsniveau, kildestyrkerne skal repræsentere.

Ved de kildestyrker, der er bestemt for tog på Banedanmarks spor, er man af forskellige årsager nået frem til at skelne mellem ruhedsniveauer, $L_{A,CA,120}$, større eller mindre end 14 dB, hvor spor, hvor $L_{A,CA,120}$ er mindre end 14 dB, anses for vedligeholdts spor og spor, hvor $L_{A,CA,120}$ er større end 14 dB, anses for dårligt vedligeholdts spor.

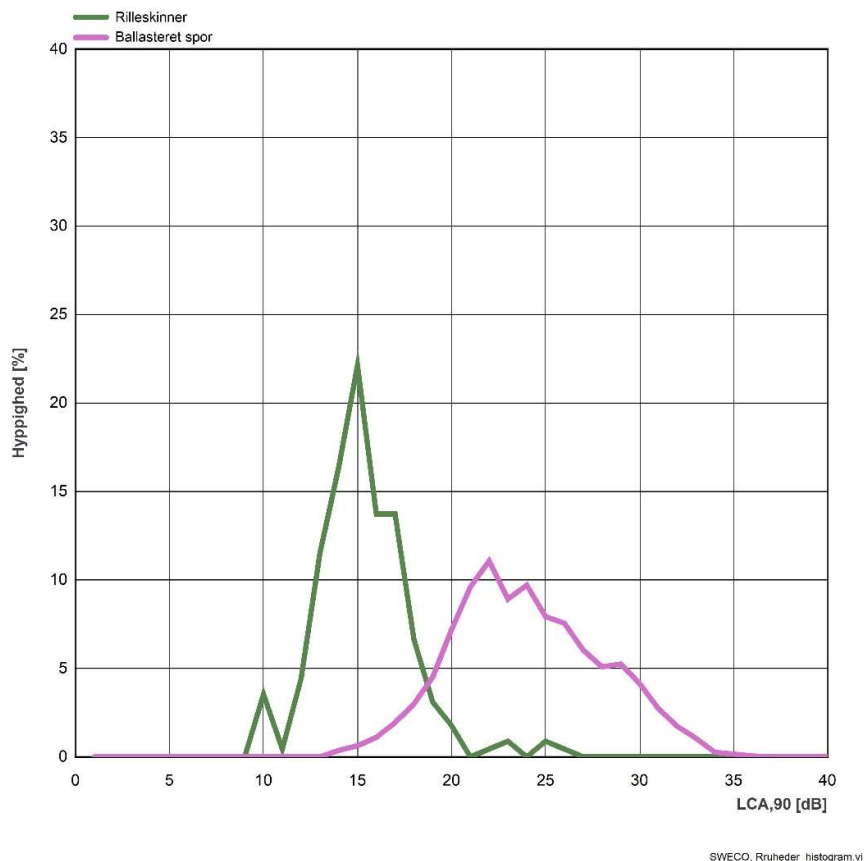
Skillelinjen ved de 14 dB er bestemt ud fra flere års målinger af skinneruhed på Banedanmarks spor og undersøgelser af effekten af slibning hhv. fræsning af skinneoverfladen.

Der foreligger ikke tilsvarende erfaringsmateriale fra Aarhus Letbane og erfaringerne fra Banedanmark kan ikke uden videre overføres til Letbanen. Blandt andet vil Tango-toget, som her er anvendt som måletog, alt andet lige måle højere værdier for $L_{A,CA,120}$ fordi hjuldiameteren på Tango er mindre end hjuldiameteren på det tog, der bruges til at måle ruheden på Banedanmarks spor. Samtidig er den nuværende fordeling af skinneruheder helt anderledes end for Banedanmarks spor, idet både vedligeholdelsesmetoder og -historik samt kørselsmønstre er anderledes.

Det er imidlertid også på Aarhus Letbane nødvendigt at foretage en skelnen mellem kildestyrke for kørsel på skinner med et højt hhv. lavt skinneruhedsniveau, ikke mindst for at kunne vurdere den støjmæssige effekt af at nedbringe skinneruheden.

Den statistiske fordeling af skinneruheden udtrykt ved $L_{A,CA,90}$ er vist i Figur 17 for ballasteret spor og for rilleskiner. Der er stor forskel på skinneruheden for de to typer spor og for det ballasterede spor ser man også et meget stort variationsområde. Begge fordelinger synes at være tilnærmelsesvis symmetriske omkring en middelværdi og det kan på den baggrund antages at den ¼ af skinnerne, som har den laveste skinneruhed, repræsenterer det, der i gennemsnit kan opnås for vel vedligeholdte skinner.

Middelruhedsspektre for disse to grupper af skinner (nederste 25% og øverste 75%) kan derfor antages at repræsentere kørsel på skinner med lav hhv. høj skinneruhed. Det skal her bemærkes, at de kildestyrker, der hermed bestemmes, repræsenterer gennemsnitlige forhold og ikke afspejler den store variation der især er for skinner med høj skinneruhed. Imidlertid er det af praktiske årsager ikke ønskeligt at operere med flere kildestyrker end højst nødvendigt, når disse skal anvendes til støjkortlægning.



Figur 17: Fordeling af skinneruhed udtrykt ved $L_{A,CA,90}$ for rilleskinner og ballasteret spor

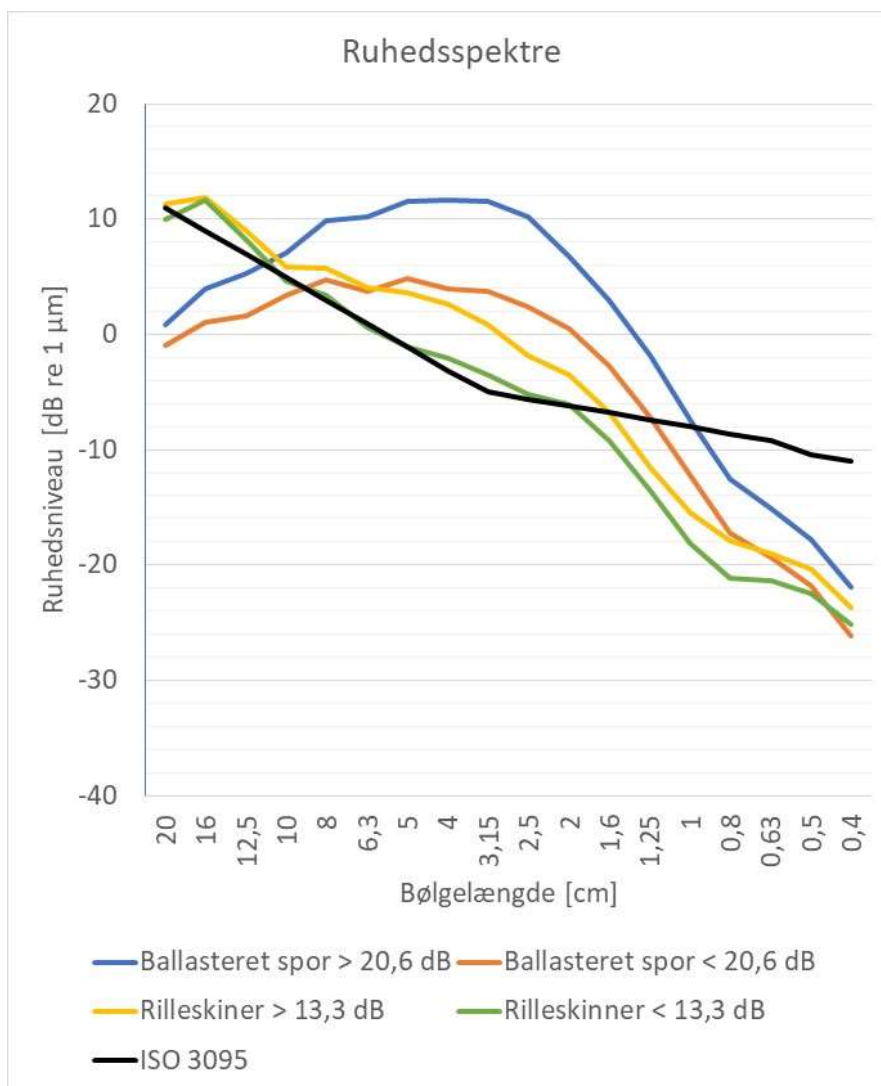
Som det fremgår, er der betydelig forskel på skinneruhedsniveauerne for ballasteret spor og rilleskinner. Det er derfor valgt at betragte disse to grupper af spor separat. Intervaller for de fire 25%-fraktioner er vist i Tabel 1.

Fraktion	Interval for $L_{A,CA,90}$ [dB]	
	S1/S3	S2/S4
0 - 25 %	< 20,6	< 13,3
25 - 50 %	20,6 - 23,1	13,3 - 14,6
50 - 75 %	23,1 - 26,2	14,6 - 16,2
75 - 100 %	> 26,2	> 16,2
Middelværdi [dB]	22,8	15,3

Tabel 1: Intervaller for 25% fraktioner af skinneruhed, $L_{A,CA,90}$

Ud fra værdierne i Tabel 1 er der herefter bestemt 4 middeldugedsspektre, nemlig skinner med høj og lav skinneruhed på ballasteret spor (UIC60) hhv. rilleskinner.

De 4 ruhedsspektre er vist i Figur 18 for den del af ruhedsspektret, som indgår i beregningen af $L_{A,CA,90}$. Figuren viser også kravkurven i ISO 3095, som skal være opfyldt, ved typemålinger på tog, dvs. bestemmelse af togets kildestyrke alene. Spektret for det dårligste ballasterede spor (blå kurve) viser en tydelig top i bølgelængdeområdet 2,5 – 6,3 cm og tendensen er der også for den del af de ballasterede spor, som har den laveste skinneruhed. Det laveste ruhedsspektrum (grøn kurve) findes for skinner med lavt skinneruhedsniveau på S2/S4, og dette spektrum er nogenlunde sammenfaldende med referencespektret i ISO 3095. Dette spektrum kan indtil videre anses for generelt at repræsentere det bedste, der kan opnås på Aarhus Letbane og findes på den del af Indre Strækning, som har rilleskinner.



Figur 18: Ruhedsspektre for skinner med lavt hhv. højt skinneruhedsniveau

Tabel 2 viser værdien af $L_{\lambda CA,90}$ for de 4 midlede ruhedsspektre. For ballasteret spor med lav skinneruhed, står lav i citationstegn, fordi værdien er næsten 3 dB højere end værdien for rilleskinner med høj skinneruhed. Det vurderes derfor, at der er et potentiale for at bringe denne værdi endnu længere ned i fremtiden.

Spor og skinneruhed	$L_{\lambda CA,90}$ [dB]
Ballasteret spor, høj skinneruhed	24,5
Ballasteret spor, "lav" skinneruhed	18,2
Rilleskinner, høj skinneruhed	15,6
Rilleskinner, lav skinneruhed	12,8

Tabel 2: Værdien af $L_{\lambda CA,90}$ for ballasteret spor og rilleskinner, høj og lav skinneruhed

Alle de viste ruhedsspektre er benyttet ved de følgende beregninger af kildestyrken for Letbanens tog.

9.3 Fundne kildestyrker

På grundlag af metoden beskrevet i afsnit 8.1 og datagrundlaget beskrevet i afsnittene 9.1 og 9.2 er kildestyrken bestemt for en række kombinationer af de to togtyper, sportyper og -kvalitet.

Det viser sig, at kildestyrken pr. meter for Tango og Variobahn er så tæt på hinanden, at det giver mening at betragte dem under ét. Derimod giver forskellene i overføringsfunktionerne for ballasteret spor og rilleskinner sig udslag i en forskel i kildestyrken, som ikke kan negligeres. Således er kildestyrken for rilleskinner generelt ca. 4 dB højere end for ballasteret spor for samme kildestyrke.

Forskellen i kildestyrke for rilleskinner med høj og lav skinneruhed er mindre end 2 dB og det anbefales derfor at undlade at skelne og i stedet anvende én værdi for kildestyrken ved kørsel på rilleskinner.

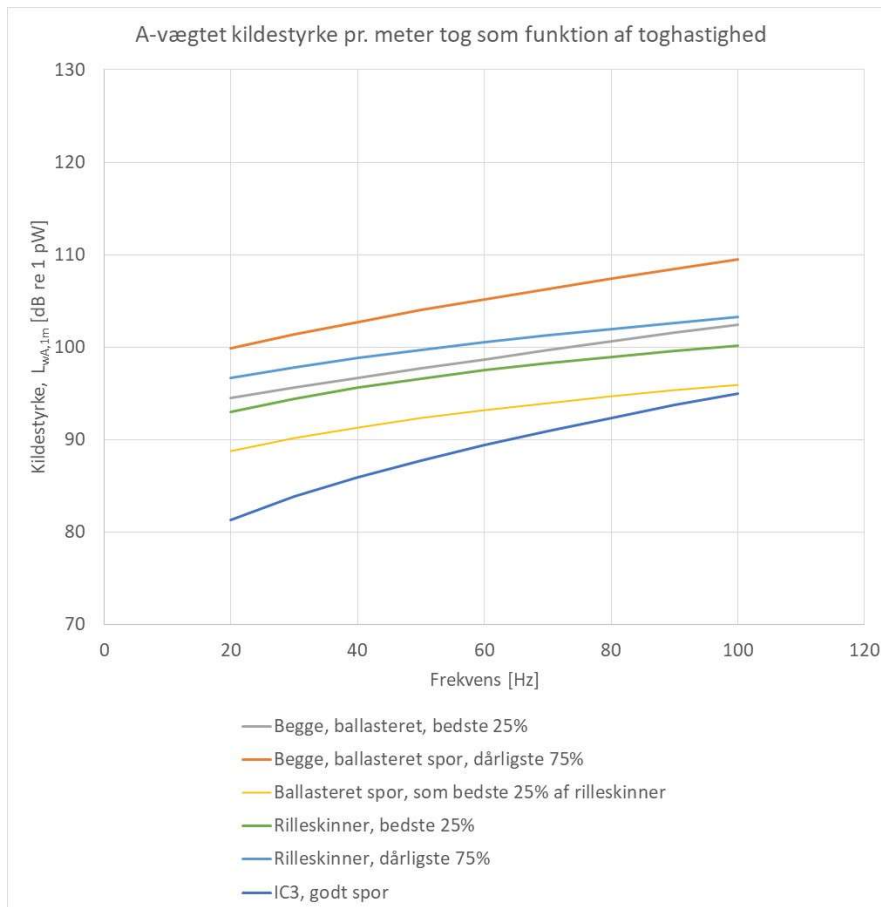
Som nævnt i afsnit 9.2 vurderes der at være et potentiale for at nedbringe kildestyrken for kørsel på ballasteret spor yderligere end svarende til den nuværende skinneruhed for de 25% af skinnerne, som p.t. har det laveste niveau. Dette er belyst ved at beregne kildestyrken ved anvendelse af spektret for rilleskinner med lavt ruhedsniveau. Dette resulterer i en kildestyrke, som ved hastigheder på 80 – 100 km/t er sammenlignelig med IC3, som i mange andre sammenhænge betragtes som en god reference.

De totale A-vægtede kildestyrkeniveauer, $L_{wA,1m}$ er vist som funktion af hastigheden i Figur 19. Til sammenligning er vist kildestyrken for IC3. Det første der bemærkes er, at alle fundne kildestyrker er højere end kildestyrken for IC3, selv for det bedste spor.

Der er flere faktorer, der her spiller ind, først og fremmest hjuldiameteren, som er mindre på Tango og Variobahn og antal hjul pr. meter tog, som er højere på Tango/Variobahn end på IC3. Samspillet mellem sporet og toget spiller også en rolle og her vil de mindre hjul på Tango/Variobahn alt andet lige give en dårligere dæmpning af de kortere bølgelængder med mere støj ved høje

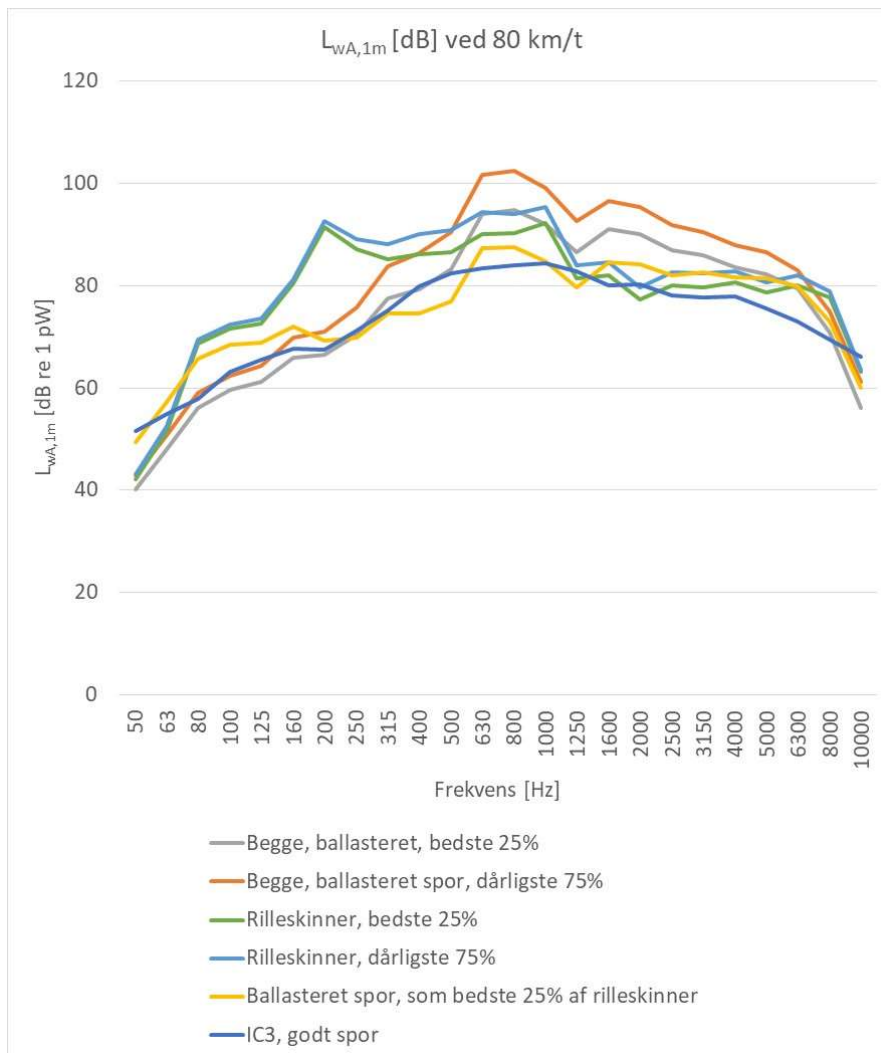
frekvenser på grund af at kontaktpunktet mellem hjul og skinne, som blandt andet er bestemt af hjuldiameteren, er mindre for Tango/Variobahn end for IC3.

Forskellen i dB mellem den højeste og laveste kildestyrke for ballasteret spor på Aarhus Letbane er knap 15 dB og udtrykker det gennemsnitlige potentiale der er for dæmpning af støjen fra de ballasterede spor – selvfølgelig under forudsætning af, at togets hjulruhed ikke overstiger skinneruheden ved de lave skinneruhedsniveauer.



Figur 19: A-vægtet kildestyrke, $L_{wA,1m}$ [dB, for Tango og Variobahn på forskellige sporkvaliteter

Figur 20 viser frekvensspektrene for kildestyrken ved 80 km/t, som er den generelle strækningshastighed for Odderbanen.



Figur 20: Frekvensspektre for kildestyrken ved 80 km/t

9.4 Endelige kildestyrker til Nord2000

Det anbefales, at der i forbindelse med støjkortlægninger efter Nord2000 opereres med 3 forskellige kildestyrker:

- Tango og Variobahn på ballasteret spor med høj skinneruhed, som bruges til at beskrive den nuværende situation eftersom den dækker 75% af sporet og kildestyrken for den nuværende "lave" kildestyrke også er høj set i forhold til det, der vurderes at være det bedst opnåelige på sigt.
- Tango og Variobahn på ballasteret spor med lav skinneruhed, hvor skinneruheden svarer til den bedste del af rilleskinnerne, som de er i dag. Denne kildestyrke kan anvendes til at belyse en fremtidig situation, hvor skinneruheden generelt er bragt så langt ned, som det anses for teknisk og praktisk muligt.

- Tango og Variobahn på rilleskinner. Her skelnes ikke mellem høj og lav skinneruhed eller om sporet ligger i beton eller grus.

Tabel 3 indeholder værdier for konstanterne i formel (1) til bestemmelse af kildestyrken pr. meter tog, L_w i henhold til Nord2000 for de tre ovenfor beskrevne kildestyrker.

Frekvens [Hz]	Ballasteret spor, høj skinneruhed		Ballasteret spor, lav skinneruhed		Rilleskinner	
	a	b	a	b	a	b
50	0,00	73,16	0,00	79,65	0,00	72,90
63	3,81	77,45	0,00	83,53	0,00	78,30
80	0,00	81,40	0,00	88,06	0,00	91,48
100	0,00	81,57	0,00	87,50	0,00	91,17
125	0,00	80,56	3,48	85,47	4,15	89,73
160	0,00	83,03	13,46	86,46	12,44	95,31
200	0,00	81,89	13,24	81,28	10,02	103,83
250	0,00	84,51	9,09	79,33	4,73	97,21
315	0,00	90,39	7,56	81,88	4,00	93,66
400	0,00	91,09	4,31	79,67	3,67	93,29
500	0,00	93,61	2,89	80,46	5,00	92,41
630	6,04	104,04	4,24	89,53	8,10	94,87
800	18,07	104,96	9,20	89,28	13,21	94,17
1000	29,10	101,84	17,58	86,39	20,04	95,76
1250	35,86	95,51	25,93	81,65	26,96	84,72
1600	37,83	99,17	25,36	85,95	25,58	84,78
2000	33,49	97,33	15,81	84,43	16,28	78,91
2500	26,34	92,99	6,60	81,27	8,48	80,85
3150	24,05	91,60	8,32	82,17	11,25	80,93
4000	25,25	89,28	16,99	82,35	19,47	82,65
5000	27,10	88,46	21,88	83,01	22,81	81,29
6300	41,58	87,05	19,31	81,84	25,86	83,73
8000	42,58	80,23	13,49	75,32	11,30	80,54
10000	44,15	67,96	13,14	63,79	10,42	66,95

Tabel 3: Koefficienter, a og b, til bestemmelse af kildestyrken L_w pr. meter tog i henhold til Nord2000