

Guillaume Dutilleux

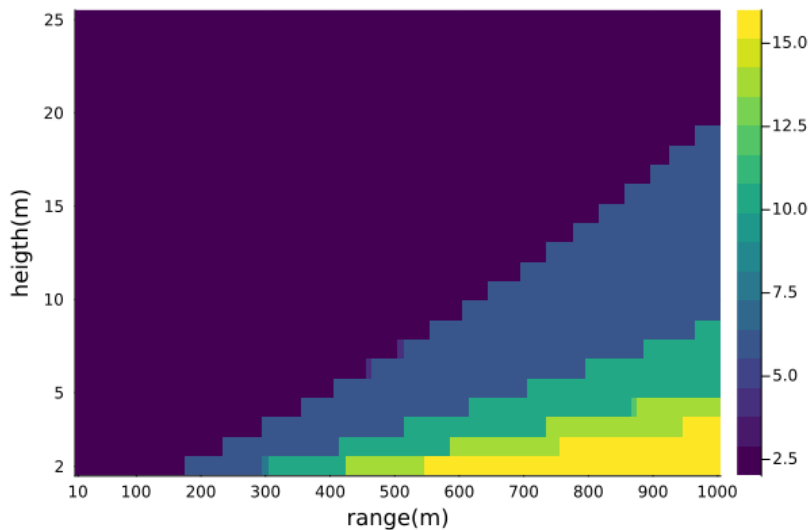
Beregning av veitrafikkstøy

Parametrisk studie av antall lydbaner til mottakeren

Trondheim 11.01.2024

Rapport

NTNU
Norges
teknisk-naturvitenskapelige
universitet
Fakultet for Informasjons-
teknologi og Elektroteknikk
Institutt for Elektroniske Systemer
Akustikk



Rapport

Beregning av veitrafikkstøy

Parametrisk studie av antall lydbaner til mottakeren

VERSJON

3

DATO

11.01.2024

FORFATTER(E)

Guillaume Dutilleux

PROSJEKTNUMMER

100444100

PROSJEKTLEDER

Regine Benz
Divisjon Transport og samfunn
Avdeling Samfunnsutvikling og klima,
Klima- og miljøseksjon
Statens Vegvesen

ANTALL SIDER OG VEDLEGG

20

SAMMENDRAG

Generelt avhenger antallet lydbaner fra en kilde til en mottaker av værforhold. Med fokus på veitrafikkstøy er målet med denne studien å beregne antallet lydbaner under lydutbredelsen over en flat bakke, som funksjon av (kilde, mottaker)-geometrien og værforhold, ved bruk av simulering. En nylig utviklet analytisk strålesporingskode er brukt til simuleringene. Koden er først sammenlignet med referanseverktøy. Under den parametriske studien blir det brukt 25 standardiserte værforhold som definert i ISO 1996-2. For en punktkilde 0.05~m over bakken, blir antallet lydbaner beregnet for hver enkelt mottaker på et mottakernet fra 10 til 1000 m avstand fra kilden og 2 til 25 m over bakken. Resultatene viser at antallet lydbaner varierer mellom 0 (skyggesone) til 15 i det minste. I tillegg øker antallet lydbaner når mottakerens høyde minker. Allikevel tar denne studien bare høyde for de geometriske aspektene. Videre arbeid er nødvendig til å vurdere hva er bidraget til lydnivået av de ulike lydbanene som funksjon av antallet bakkerefleksjoner.

UTARBEIDET AV

Guillaume Dutilleux

SIGNATUR

Historikk

VERSJON	DATO
1	30.11.2023

VERSJONSBEKRIVELSE

Rapporten uten NTNU mal

VERSJON	DATO
2	15.12.2023

VERSJONSBEKRIVELSE

- Sammendrag både på norsk og engelsk.
- Presiseringer om lydkilden
- Presiseringer om mulig videre arbeid
- NTNU mal

VERSJON	DATO
3	11.01.2024

VERSJONSBEKRIVELSE

- Språkvask
- Informasjon om prosjektlederen hos Statens vegvesen

Abstract

In general, the number of propagation paths from a sound source to a receiver depends on the weather conditions. In the context of the prediction of road traffic noise, the purpose of this study was to evaluate this so-called number of eigenrays - during propagation above a flat ground as a function of the (source, receiver) geometry and meteorological conditions. A recently developed analytical ray-tracing code is used for the simulations. A short validation of this code against reference calculations is presented. For the parametric study 25 standard meteorological conditions are considered according to ISO 1996-2. For a point source at 0.05 m above ground, the number of eigenrays is computed for a grid of receivers ranging from 10 to 1000 m distance from the source and 2 to 25 m above the ground. The results are first that the number of eigenrays varies from 0 (shadow zone) to at least 15. Second, the number of eigenrays increases as the receiver is closer to the ground. However, only geometrical aspects are considered in this study. Further investigations are needed to evaluate the actual contributions of these eigenrays as a function of the number of ground reflections.

Sammendrag

Generelt avhenger antallet lydbaner fra en kilde til en mottaker av værforhold. Med fokus på veitrafikkstøy er målet med denne studien å beregne antallet lydbaner under lydutbredelsen over en flat bakke, som funksjon av (kilde, mottaker)-geometrien og værforhold, ved bruk av simulering. En nylig utviklet analytisk strålesporingskode er brukt til simuleringene. Koden er først sammenlignet med referanseverktøy. Under den parametriske studien blir det brukt 25 standardiserte værforhold som definert i ISO 1996-2. For en punktkilde 0.05 m over bakken, blir antallet lydbaner beregnet for hver enkelt mottaker på et mottakernet fra 10 til 1000 m avstand fra kilden og 2 til 25 m over bakken. Resultatene viser at antallet lydbaner varierer mellom 0 (skyggesone) til 15 i det minste. I tillegg øker antallet lydbaner når mottakerens høyde minker. Allikevel tar denne studien bare høyde for de geometriske aspektene. Videre arbeid er nødvendig til å vurdere hva er bidraget til lydnivået av de ulike lydbanene som funksjon av antallet bakkerefleksjoner.

Innhold

1	Introduksjon	3
2	Metoder	5
2.1	Beregningsmetode	5
2.2	Parametrisk studie	5
3	Resultater	7
3.1	Sammenlikning med referanseberegninger	7
3.2	Antall lydbaner	7
4	Konklusjon	15
4.1	Oppnådde resultater	15
4.2	Veien videre	15

Figurer

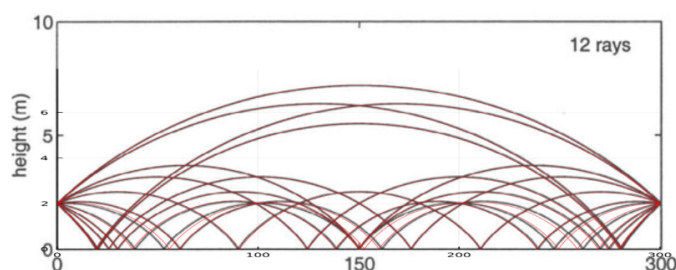
1.1	Lydbaner mellom to punkter under gunstige værforhold simulert av en logaritmisk lydhastighetsprofil [1, Section 4.4, Figure 4.7]. Referanse i svart [1], ny kode i rød.	3
2.1	Parametrisk studie - én punktkilde plassert på 0.05 m over bakken og 2400 mottakere fra 10 til 1000 m avstand fra kilden horisontalt og fra 2 til 25 m over bakken.	6
3.1	Sammenlikning med referanseberegninger for lange avstander [2, Section 5.1.1]. Referanse i svart [1], ny kode i rød.	7
3.2	Sammenlikning med referanseberegninger for en punktkilde plassert på 2 m over bakken under gunstige værforhold [1, Section 4.4, Figure 4.6]. Referanse i svart [1], ny kode i rød.	8
3.3	W1S1 forhold.	8
3.4	W1S2 forhold.	9
3.5	W1S3 forhold.	9
3.6	W1S4 forhold.	9
3.7	W1S5 forhold.	9
3.8	W2S1 forhold.	10
3.9	W2S2 forhold.	10
3.10	W2S3 forhold.	10
3.11	W2S4 forhold.	10
3.12	W2S5 forhold.	11
3.13	W3S1 forhold.	11
3.14	W3S2 forhold.	11
3.15	W3S3 forhold.	11
3.16	W3S4 forhold.	12
3.17	W3S5 forhold.	12
3.18	W4S1 forhold.	12
3.19	W4S2 forhold.	12
3.20	W4S3 forhold.	13
3.21	W4S4 forhold.	13
3.22	W4S5 forhold.	13
3.23	W5S1 forhold.	13
3.24	W5S2 forhold.	14
3.25	W5S3 forhold.	14
3.26	W5S4 forhold.	14
3.27	W5S5 forhold.	14

Kapittel 1

Introduksjon

Siden støymålinger er krevende å gjennomføre, er hovedregelen å bruke støyberegninger for å vurdere støy fra vegtrafikk. Mellom kilde og mottaker vil støyen dempes som følge av en rekke faktorer, som avstand, bakke, meteorologi og hvorvidt det er objekter som bryter linjen for lydutbredelsen (topografi, bygninger eller andre konstruksjoner).

Hvis det ikke blåser, hvis lufttemperaturen er uavhengig av posisjon, og hvis man følger en geometrisk tilnærming, er det bare to mulige lydbaner mellom en kilde og en mottaker som står over en uendelig flat bakke: den *direkte* og den *reflekterte veien*. Gunstige værforhold (medvind eller positiv vertikal temperaturgradient) medfører at lydbaner bøyes mot bakken slik at det blir mulig å få flere enn 2 lydbaner mellom lydkilden og mottakeren på grunn av refleksjoner på bakken. Et eksempel med 12 lydbaner presenteres i figur 1.1. De lydbanene som kommer i tillegg når mottakeren etter muligens flere refleksjoner på bakken. I prinsippet kan flere lydbaner påvirke den globale lydempingen.



Figur 1.1: Lydbaner mellom to punkter under gunstige værforhold simulert av en logaritmisk lydshastighetsprofil [1, Section 4.4, Figure 4.7]. Referanse i svart [1], ny kode i rød.

Dagens metoder (Nord96, CNOSSOS, ISO9613-2, Nord2000, Harmonoise) for beregning av veitrafikkstøy er forenklet i forhold til fysikkens lover. Et eksempel på forenkling er blant annet at det bare tas hensyn til én bakkerefleksjon mellom støykilden og mottakeren. Dette har blitt påpekt for CNOSSOS [3] og Harmonoise [4]. Det er faktisk ikke helt riktig for CNOSSOS, for antallet lydbaner tas hensyn til i likningen som beskriver hvordan bakkedemping beregnes [5], men allikevel på en forenklet måte som sannsynligvis ikke kan ta høyde for alle mulige værforhold og geometriske konfigurasjoner. Spørsmålet som kommer er hvor mye variasjon kan egentlig forventes når det gjelder antallet lydbaner?

Målet med denne rapporten er akkurat å undersøke hvordan antall lydbaner varierer mellom en lydkilde og en mottaker som funksjon av avstanden fra kilden, av høyden over bakken og som funksjon av standardiserte værforhold. Siden fokuset her er veitrafikkstøy blir undersøkelsen gjennomført for en lydkilde som ligger nær bakken. Undersøkelsen gjennomføres ved bruk av et nylig utviklet ray-tracing kode. Siden fokuset er på geometrien, blir lydempingen ikke diskutert.

Denne studien bygger på en kode som ble utviklet av Louise Berthier [6] under Guillaume Dutilleuxs veiledning i løpet av et studentprosjekt.

Rapporten har følgende struktur. Avsnitt 2 beskriver metoder. Det inkluderer simulering og identifisering av lydbaner mellom kilde og mottaker med ray-tracing og de viktigste inngangsparametrene i den parametriske studien. Avsnitt 3 presenter først en sammenligning av ray-tracing koden med referanseberegninger og deretter resultatene fra den parametriske studien om antall lydbaner. Resultatene drøftes også i avsnitt 3. Avsnitt 4 konkluderer rapporten.

Kapittel 2

Metoder

2.1 Beregningsmetode

Vanlig software for beregning av utendørs trafikkstøy som Cadna/A eller Soundplan kan ikke brukes her. For den typen studie der geometri er enkel og todimensjonal, og der antall beregninger er relativt stort er det kanskje ikke så naturlig å tenke på Bellhop [7]. Bellhop er et veletablert program for simulering av lydutbredelse under vann. Den høyfrekventtilnærmingen som brukes under vann gjelder også i luft. Den såkalte *Atmospheric Bellhop* er en nylig publisert tilpasning av Bellhop til simulering i luft [8]. Dette verktøyet ble brukt i en omfattende parametrisk studie der antall lydbaner ble undersøkt. Men det viste seg at det antallet varierer som funksjon av hvordan lydastighetsprofilen er beskrevet. For eksempel, i tilfelle lydastigheten øker proporsjonelt med høyden leverer Bellhop ulike resultater hvis man beskriver den vertikale lydastighetsprofilen med to punkter eller med tre. Dette gir ikke mening.

Ettersom det ikke lot seg gjøre å fikse problemet direkte i fortran-koden til Bellhop var det nødvendig med et annet verktøy. Mo *et al.* har foreslått en ny metode til å simulere lydbaner med ray-tracing [2] som bruker en analytisk tilnærming istedenfor numeriske metoder som i Bellhop for å beregne lydbanen. Mos metode ble implementert i programmeringsspråket Julia [9] i løpet av sommeren 2023 til å bli brukt i denne studien om antall lydbaner ¹

2.2 Parametrisk studie

Den omnidireksjonale kilden som er simulert i studien er plassert 0.05 m over bakken, som spesifisert i det europeiske direktivet om miljøstøy når det gjelder beregning av veitrafikkstøy [10]. Det ble ikke simulert noen linjekilde. Selv om linjekilden er den vanlige måten å beskrive lydemisjon fra veitrafikk på, blir linjekilden brutt ned i en rekke punktkilder i praksis. I tillegg er antallet lydbaner noe som varierer med avstanden mellom kilde og mottaker. Med andre ord kan en slik parametrisk studie om antallet lydbaner ikke direkte gjennomføres på en linjekilde.

Mottakerne ble satt på ulike avstander fra kilden, mellom 10 og 1000 m, og ulike høyder over bakken, mellom 2 og 25 m. Det virker fornuftig med tanke på hvor langt trafikkstøy kan bære og ulike typer bygninger.

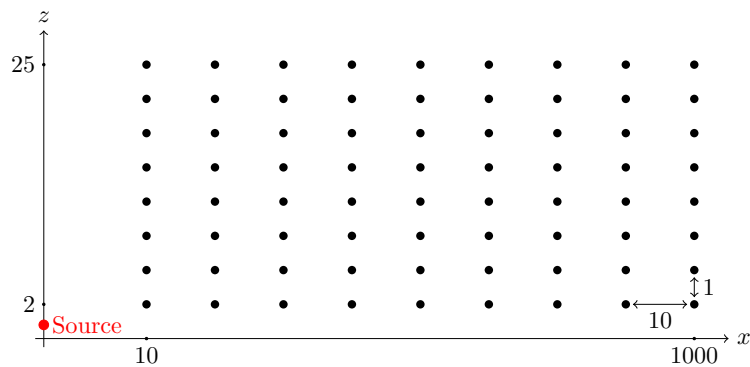
Det finnes uendelig mange mulige værforhold, men standardisering i akustikk hjelper å velge mellom dem. Følgende presenterer resultater for 25 standardiserte lydastighetsprofiler som er basert på 5 vindklasser fra W_1 til W_5 og 5 stabilitetsklasser fra S_1 til S_5 [11]. Vindhastigheten øker fra W_1 til W_5 . S_1 til S_3 gjelder for dagtid, S_4 og S_5 for nattid.

¹.

Skydekket øker fra $S1$ til $S3$ og minker mellom $S4$ og $S5$. Disse standardiserte lydprofilene er basert på en parametriske log-linprofil, med andre ord en funksjon som er summen av en komponent som varierer proporsjonelt med høyden, og en annen komponent som varierer logaritmisk med høyden. I tillegg er det antatt her at beregningene gjennomføres under medvind. Slike log-lin profiler avhenger av et parameter som kalles for ruhetslengde z_0 . Det ble brukt $z_0 = 0.1$ m i denne studien. Denne ruhetslengden tilsvarer lav vegetasjon på flat bakke.

Problemet med log-lin profiler er at de viser stor variasjon nær bakken. Dette medfører lange beregningstider. For å løse problemet ble det valgt å lineærisere lydshastighetsprofilen for hver enkelt mottaker. Lineæriseringen ble basert på prosedyren som ble innført tidlig i utviklingen av Nord2000 [12]. I og med at analytiske log-lin lydshastighetsprofiler ble brukt, er det mulig å etablere analytiske formler til beregning av ekvivalente lineære lydshastighetsprofiler [6]². Denne justeringen var nødvendig for gjennomførbarheten av studien, men den er ikke helt nøytral. Den medfører sannsynligvis at antall lydbaner blir undervurdert.

Alle simuleringer ble gjennomført på flat reflekterende bakke. Absorpsjon på bakken spiller ingen rolle her, for studien fokuserer på de geometriske aspektene av lydutbredelsen, og lydemping ble ikke beregnet. Figur 2.1 gir oversikt over konfigurasjonen som ble simulert i løpet av studien. For hver enkelt standardisert lydshastighetsprofil og hver enkelt mottaker ble antall lydbaner mellom kilde og mottaker beregnet. Det betyr $25 \times$ forhold \times 100 avstander \times 24 høyder = 60000 beregninger.



Figur 2.1: Parametriske studie - én punktkilde plassert på 0.05 m over bakken og 2400 mottakere fra 10 til 1000 m avstand fra kilden horisontalt og fra 2 til 25 m over bakken.

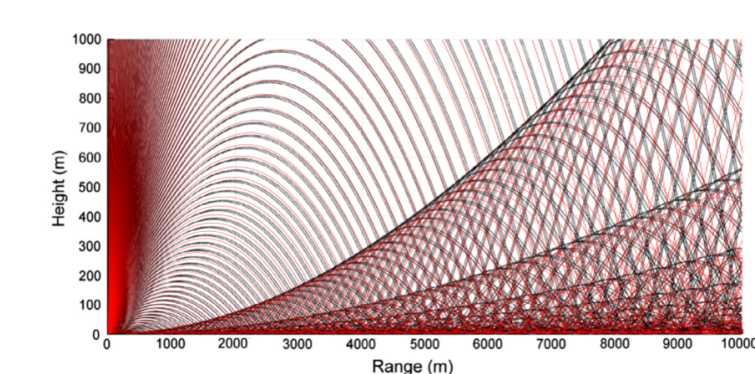
²Det ble oppdaget i etterkant at analytiske formler allerede var tilgjengelige [13, Appendix F].

Kapittel 3

Resultater

3.1 Sammenlikning med referanseberegninger

Det var først nødvendig å sjekke om metoden var riktig programmert, for koden var nylig utviklet. Figur 1.1 som ble presentert i introduksjonen, figur 3.1 og figur 3.2 viser sammenlikninger med beregninger som ble publisert i litteratur. Overenstemmelsen mellom Julia-implementeringen og referanseberegningene er veldig god.



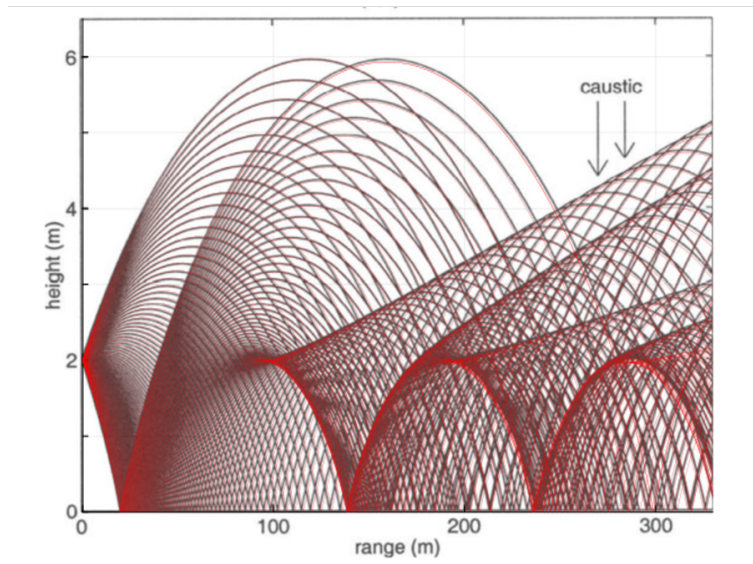
Figur 3.1: Sammenlikning med referanseberegninger for lange avstander [2, Section 5.1.1]. Referanse i svart [1], ny kode i rød.

3.2 Antall lydbaner

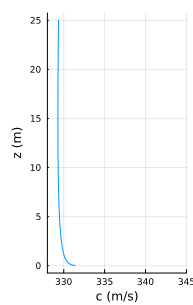
Resultatene er framstilt for hver enkelt ISO-standardisert lydshastighetsprofil i figur 3.3 til figur 3.27. Den typiske beregningstiden på en vanlig laptop var cirka 15 timer per figur.

Selv om alle beregningene ble gjennomført under medvind tilsvarer noen få standardiserte lydshastighetsprofiler til ugunstige værforhold (W1S1, W1S2 og W1S3 der lydshastigheten minker når høyden øker). Når vinden er svak, er det stabilitet som dominerer. I figurene 3.3, 3.4, 3.5 kan man se at såkalte skyggesoner utvikler seg. I skyggesonen er antallet lydbaner lik 0. Skyggesoner oppstår på kortere avstand fra kilden når mottakeren går ned.

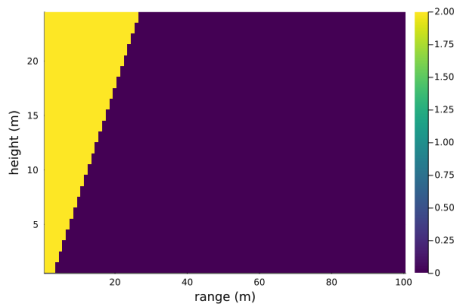
De andre standardiserte lydshastighetsprofilene kan betraktes som gunstige forhold. Figurene 3.6 til 3.27 viser at antall lydbaner kan variere mellom 2 og 15. Det er et generelt mønster her. For det første øker antall lydbaner med avstanden mellom kilde og mottaker. For det andre minker antallet lydbaner når høyden øker. For det tredje øker antall lydbaner når vinden blir sterkere fra W1 til W5.



Figur 3.2: Sammenlikning med referanseberegninger for en punktkilde plassert på 2 m over bakken under gunstige værforhold [1, Section 4.4, Figure 4.6]. Referanse i svart [1], ny kode i rød.



(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

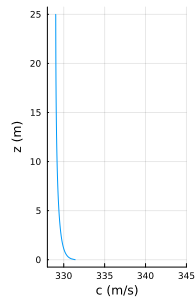


(b) Antall lydbaner.

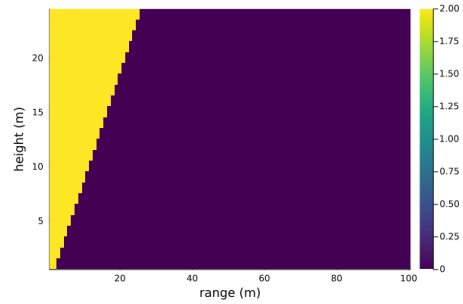
Figur 3.3: W1S1 forhold.

På avstander som er over 500 m og for de laveste mottakerne ser det ut som antall lydbaner minker. Men det kan hende at koden sliter med å beregne antall lydbaner riktig på såpass lange avstander når antallet refleksjoner på bakken er såpass høyt.

Det er også lite forskjell mellom figurer 3.23 3.24 3.25, 3.26 and 3.27 for W5 vindklasse. W5 tilsvarer sterk medvind. I dette tilfellet er vinden dominerende, og stabiliteten spiller nesten ingen rolle.

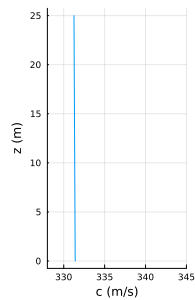


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

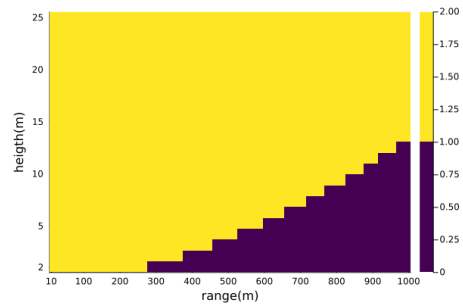


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.4: W1S2 forhold.

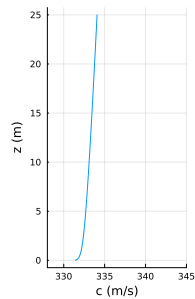


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

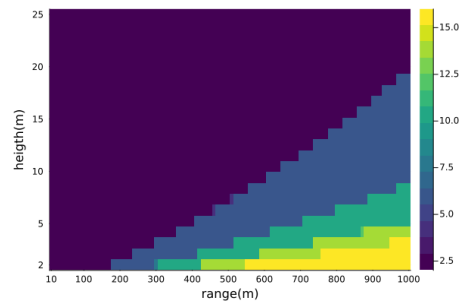


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.5: W1S3 forhold.

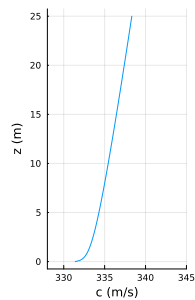


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

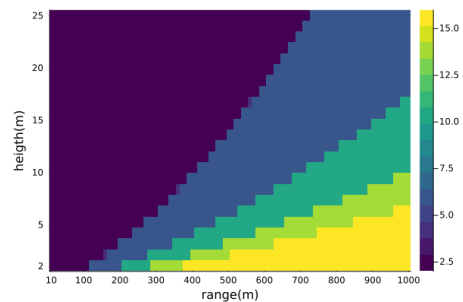


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.6: W1S4 forhold.

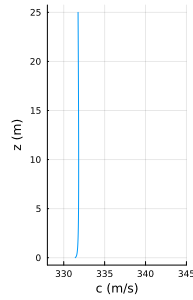


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

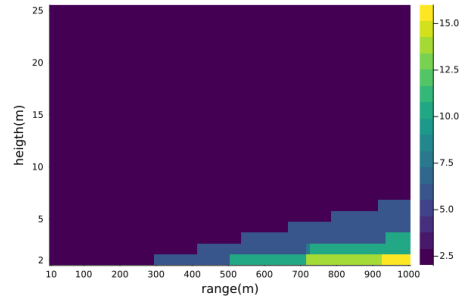


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.7: W1S5 forhold.

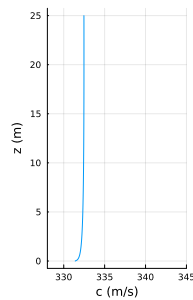


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

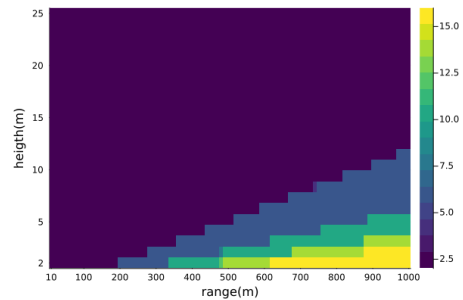


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.8: W2S1 forhold.

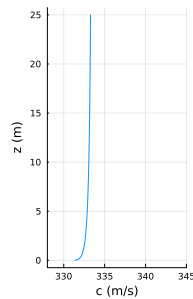


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

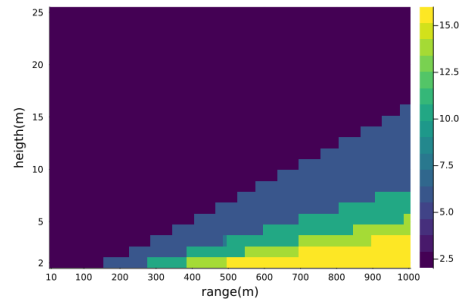


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.9: W2S2 forhold.

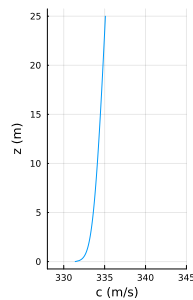


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

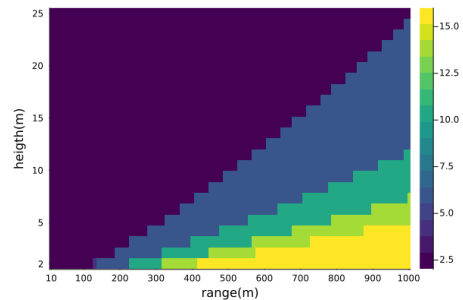


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.10: W2S3 forhold.

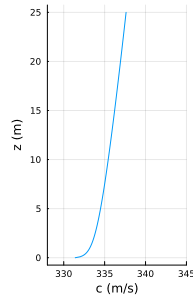


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

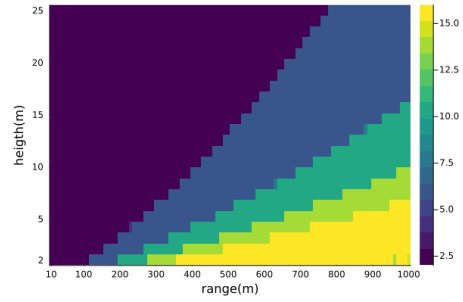


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.11: W2S4 forhold.

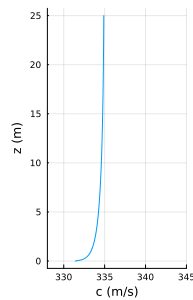


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

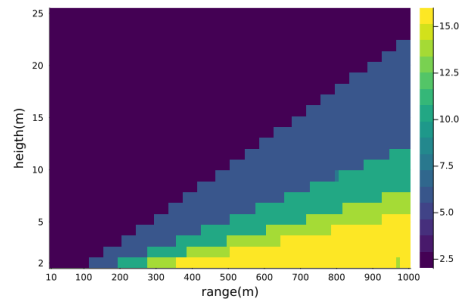


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.12: W2S5 forhold.

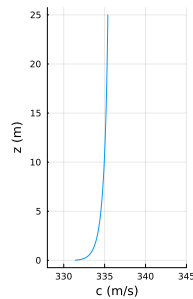


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

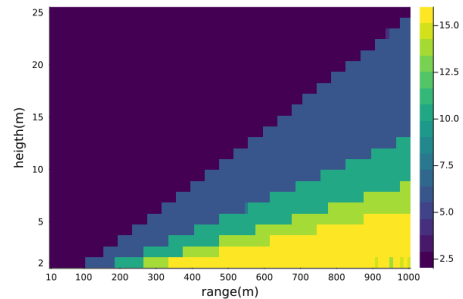


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.13: W3S1 forhold.

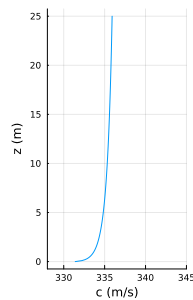


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

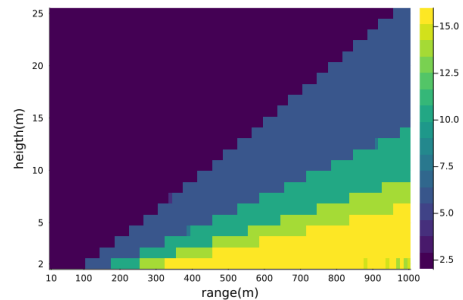


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.14: W3S2 forhold.

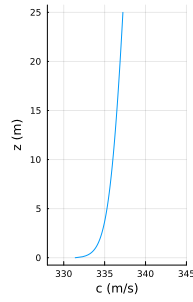


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

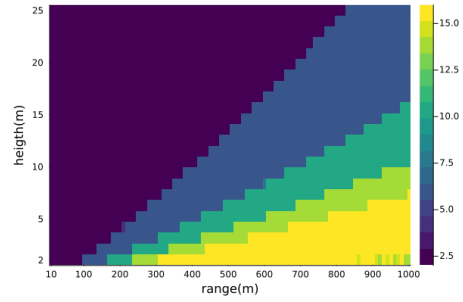


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.15: W3S3 forhold.

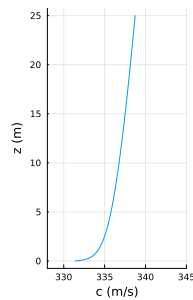


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

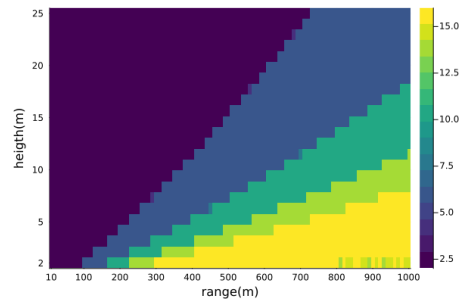


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.16: W3S4 forhold.

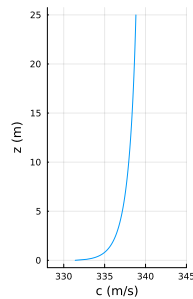


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

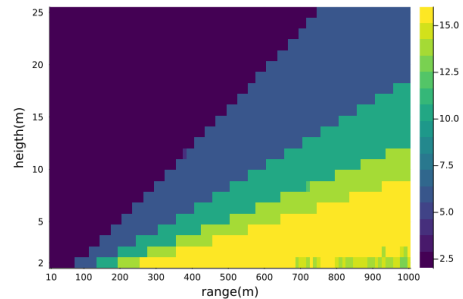


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.17: W3S5 forhold.

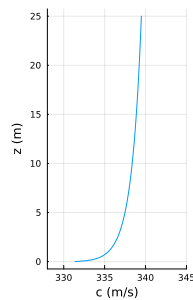


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

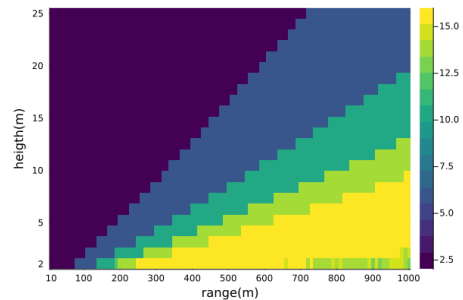


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.18: W4S1 forhold.

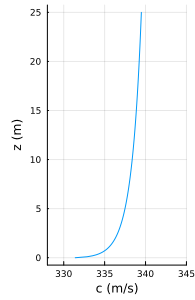


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

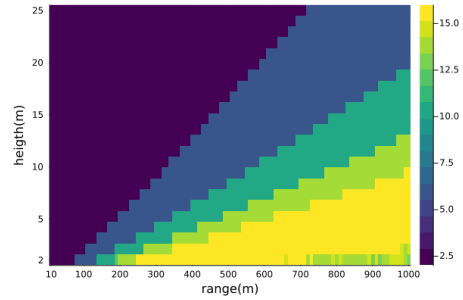


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.19: W4S2 forhold.

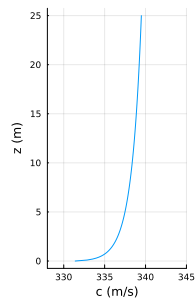


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

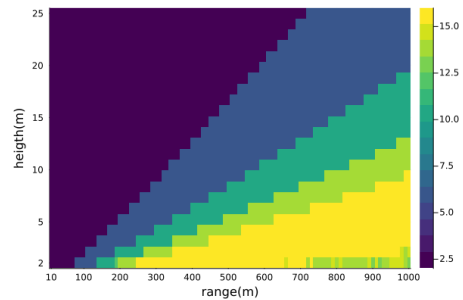


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.20: W4S3 forhold.

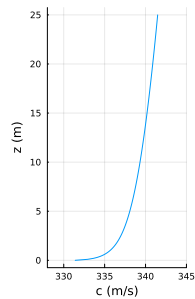


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

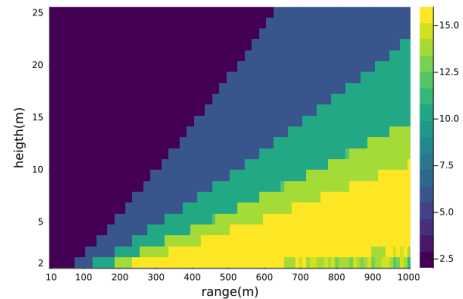


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.21: W4S4 forhold.

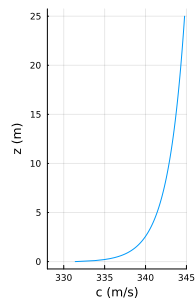


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

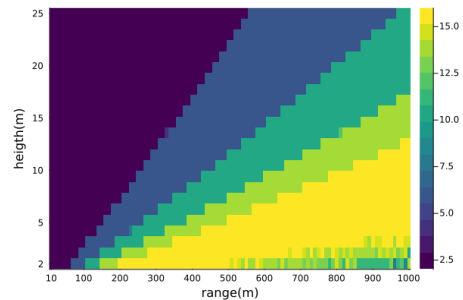


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.22: W4S5 forhold.

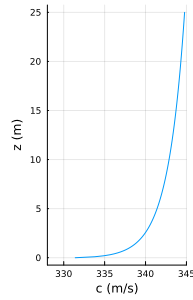


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

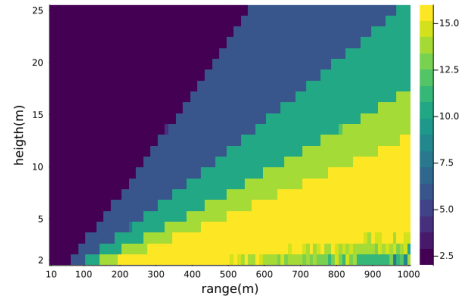


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.23: W5S1 forhold.

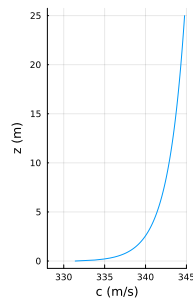


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

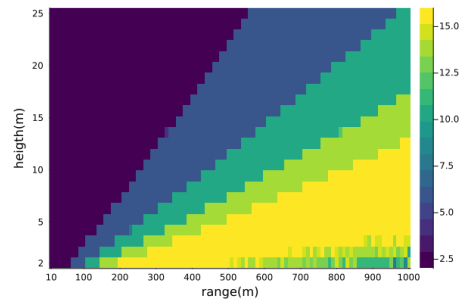


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.24: W5S2 forhold.

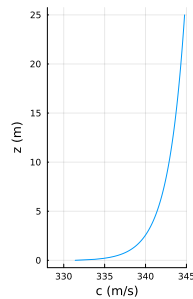


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

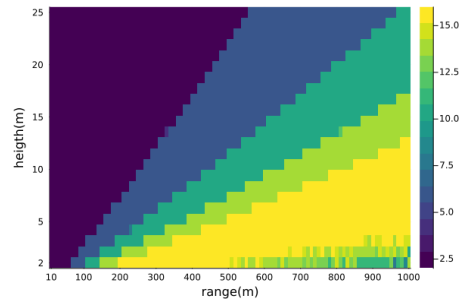


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.25: W5S3 forhold.

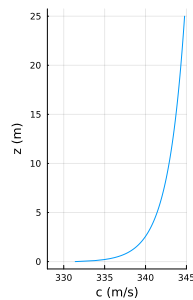


(a) Vertikal lydshastighetsprofil.

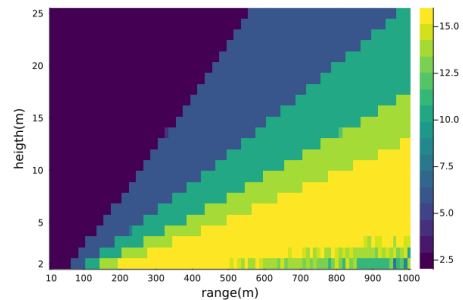


(b) Antall lydbaner.

Figur 3.26: W5S4 forhold.



(a) Vertikal lydshastighetsprofil.



(b) Antall lydbaner.

Figur 3.27: W5S5 forhold.

Kapittel 4

Konklusjon

4.1 Oppnådde resultater

Med fokus på støy fra vegtrafikk ble det gjennomført en parametrisk studie som vurderte antall lydbaner mellom en punktkilde nær bakken og mottakere på ulike realistiske avstander fra kilden og høyder over bakken, under ulike standardiserte og i hovedsak gunstige værforhold med. Studien er basert på analytisk ray-tracing som ble nylig implementert.

Resultatet er at antall lydbaner meget ofte er høyere enn to på mottakerposisjoner. Dette gir mening med tanke på eksponering til veitrafikk. Det kan hende at antall lydbaner mellom kilden og mottakeren når 15. Dette antallet er sannsynligvis undervurdert, for det ble nødvendig å lineærisere lydshastighetsprofilene for å redusere beregningstid.

4.2 Veien videre

Et stort antall lydbaner betyr også at mange av dem når mottakeren etter mange refleksjoner på en absorberende bakke, med andre ord med lite energi, slik at ikke alle lydbaner bidrar til lydnivået. Videre arbeid vil kunne gjøre det mulig å utvide strålesporingskoden som ble brukt her slik at den kan beregne de ulike relevante lyddempingene (luftabsorpsjon, bakkedemping) som skal gjøre det mulig å kombinere denne parametriske studien med vurderinger av lyddemping til å undersøke hvor stort antall lydbaner mellom kilde og mottaker skal tas i betraktning i beregningsmetoder for støynivåer.

Bibliografi

- [1] Eric M. Salomons. *Computational atmospheric acoustics*. Springer Science+Business Media B.V., 2001.
- [2] Qi Mo, Hengchin Yeh, Ming Lin, and Dinesh Manocha. Analytic ray curve tracing for outdoor sound propagation. *Applied Acoustics*, 142:142–151, 2016.
- [3] David A. Bies, Colin H. Hansen, and Carl O. Howard. *Engineering noise control*. CRC Press, 5th edition, 2018.
- [4] Colin H. Hansen, Con J. Doolan, and Kristy L. Hansen. *Wind Farm Noise: Measurement, Assessment, and Control*. Wiley Press, mar 2017.
- [5] Guillaume Dutilleux, Jérôme Defrance, David Ecotièrre, Benoit Gauvreau, Michel Bérengrier, Francis Besnard, and Emmanuel Le Duc. NMPB-Routes-2008: The revision of the French method for road traffic noise prediction. *Acta Acustica united with Acustica*, 96(3):452–462, 5-6 2010.
- [6] Louise Berthier. Implantation d’une méthode de tracé de rayons acoustiques en milieu inhomogène [*Programmering av en metode for akustisk ray-tracing i heterogent miljø*]. Master I, ENTPE, Vaulx-en-Velin, France, aug 2023.
- [7] Michael B. Porter. The BELLHOP manual and user’s guide: preliminary draft. Technical report, Heat, Light and Sound Research Inc., La Jolla, CA, USA, 2011.
- [8] Hammad Hussain and Guillaume Dutilleux. A parametric study of long-range sound propagation using underwater acoustics software. In Denis Max, editor, *Proceedings of Meetings on Acoustics - Proc. LRSP XVIII*, volume 41, page 7, Washington, DC, aug 2020. Acoustical Society of America.
- [9] Jeff Bezanson, Alan Edelman, Stefan Karpinski, and Viral B Shah. Julia: A fresh approach to numerical computing. *SIAM review*, 59(1):65–98, 2017.
- [10] EU. Commission Directive 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2015/996/ec of the European parliament and the Council. Commission Directive 2015/996/EC, European Commission, Brussels, BE, may 2015.
- [11] ISO. Acoustics, Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of sound pressure levels. Standard ISO 1996-2:2017, International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2017.
- [12] Birger Plovsing and Jørgen Kragh. Nord2000 - Comprehensive outdoor sound propagation model - Part 2: Propagation in an atmosphere with refraction. Technical Report AV1851/00, DELTA, Lyngby, DK, dec 2001.

[13] Birger Plovsing. Proposal for nordtest method: Nord2000 - Prediction of outdoor sound propagation. Technical Report AV1106/07, DELTA Acoustics and Electronics, Hørsholm, DK, jan 2014.

