



CHALMERS



Ljudabsorberande betong

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

Albin Dufvenius Esping

**INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH
SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNINGEN FÖR TEKNISK AKUSTIK**

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 20xx
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Ljudabsorberande betong

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

Albin Dufvenius Esping



CHALMERS

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för teknisk akustik

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2023

© ALBIN DUFVENIUS ESPING, 2023

Handledare: Jens Forssén, avdelningen för teknisk akustik
Examinator: Jens Forssén, avdelningen för teknisk akustik

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Chalmers tekniska högskola 2023

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för teknisk akustik
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Göteborg 2023

Ljudabsorberande betong

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

Albin Dufvenius Esping

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för teknisk akustik
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Det huvudsakliga fokusområdet i denna rapport har varit att ta fram data för en betong som ej testats för sina akustiska egenskaper. Utvecklingen av denna produkt har varit i samråd med Thomas Betong som antog utmaningen att försöka ta fram en betong med förbättrade akustiska egenskaper. Den nya produkten har i huvudsakligt syfte att effektivisera bullerskyddsskärmar i trafikerade miljöer.

Undersökningen som har gjorts är baserad på akustiska samt betongtekniska laborietester där testmetoderna följer internationell standard. Genom analys av framtagna data för betongen och akustiska egenskaper samt resultat från tester har en utvärdering gjorts i en akustisk ståndpunkt samt en enklare miljö- och hållbarhetsbedömning.

Resultaten i denna undersökning påvisar en tydlig förbättring med avseende på ljudabsorbering i vissa frekvensområden men även en generell förbättring över ett större frekvensområde. För att kunna påvisa att en förbättring har skett presenteras resultaten ihop med ett referensprov som ska efterlikna de idag förekommande bullerskyddsskärmar gjorda av vanlig betong.

Sound absorbing concrete

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

Albin Dufvenius Esping

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Acoustics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The main focus area of this report has been to gather data for a concrete that has not previously been tested for its acoustic properties. The development of this product has been in consultation with Thomas Betong who accepted the challenge of trying to produce a concrete with improved acoustic properties. The new product is mainly intended to function as a supplement to make noise barriers more efficient in a traffic environment.

The investigation is based on acoustic and concrete laboratory tests of the material properties of the concrete where the test methods follow international standards. By analyzing the data collected for the concrete properties and acoustic properties as well as results from tests, an evaluation has been made from an acoustic point of view and an environmental and sustainability assessment.

The results of this investigation demonstrate a clear improvement regarding to sound absorption in certain frequency ranges but also a general improvement over a wider register. In order to be able to demonstrate that an improvement has taken place, the results are presented together with a reference sample which is supposed to imitate the noise protection screens found today made of ordinary concrete.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BEGREPP	VI
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Frågeställning	2
1.4 Avgränsning	2
1.5 Process	3
1.6 Metod	4
1.7 Hypotes	4
2 BETONGTEORI	5
2.1 Tillverkning av ljudabsorberande betong	5
2.2 Design av bullerskärm	8
2.3 Betong och hållbarhet	9
3 AKUSTIKTEORI	10
3.1 Planvågor och normalriktning	10
3.2 Impedans	10
3.3 Absorbenter	10
3.4 Diffust fält	11
3.5 Helmholtz absorbent	11
3.6 Impedansrör	12
3.6.1 Avgränsning för impedansrör	13
4 TESTMETODER	14
4.1 Betongtekniska tester	14
4.1.1 Tryckhållfasthet	14
4.1.2 NO-nedbrytning	14
4.2 Akustiska tester	15
4.2.1 Impedansrör	15
4.2.2 Provkroppar	15
	III

5	RESULTAT	16
5.1	Betongens hållfasthet	17
5.2	Akustisk absorption i normalriktning	18
5.2.1	Resultat i tersband	18
5.2.2	Resultat i oktavband	19
5.3	Akustisk absorption i diffust fält	20
5.3.1	Resultat i oktavband	20
5.4	Skattning av absorberent	21
6	ANALYS	23
6.1	Betong	23
6.2	Akustik	23
6.2.1	Normalriktning	24
6.2.2	Diffust fält	24
6.2.3	Klassificering av ljudabsorbent	25
7	EKOLOGISK HÅLLBARHET	26
8	SLUTSATS	27
9	APPENDIX	28
10	REFERENSER	32

Förord

Idén till detta examensarbete har varit i samråd med avdelningen forskning och utveckling på Thomas Betong som såg potential i att utvärdera betongens akustiska egenskaper. För att sedan ta fram en ny typ av betong som skulle ha bättre akustiska egenskaper.

Den primära uppgiften i denna rapport är att se över hur den utvalda betongen generellt behandlar ett större frekvensområde samt hur den hade lämpat sig i en trafikerad ljudmiljö.

Jag vill uttrycka min uppskattning till Thomas Betong för deras värdefulla samarbete under projektets inledande fas och vid tillverkningsprocessen av betongproverna. Jag vill även tacka min handledare Jens Forssén för hans stöd och värdefulla insikter under hela arbetet.

Göteborg Maj 2023
Albin Dufvenius Esping

Begrepp

Fotokatalys	Luft- och ytrenigörande process aktiverad av UV-strålning
Luftporbildare	Tillsatsmedel som används i betong med syfte att öka lufthalten i betongen.
Matlab	Matematiskt beräkningsprogram.
Retarder	Tillsatsmedel som används i betong med syfte att förlänga uppehållstiden innan betongen börjar bränna
Superplasticerande	Tillsatsmedel som används i betong med syfte att minska vattenmängden i recept och öka betongens arbetbarhet

Beteckningar

c	Ljudets hastighet	[m/s]
d	Diameter	[m]
f	Frekvens	[Hz]
f_l	Undre frekvensgräns	[Hz]
f_u	Övre frekvensgräns	[Hz]
j	Imaginär enhet	
k	Vågta	[m ⁻¹]
l	Längd	[m]
m	Ytmassa	[Kg/m ²]
p	Ljudtryck	[Pa]
p_i	Infallande ljudtryck	[Pa]
p_r	Reflekterat ljudtryck	[Pa]
p_t	Transmitterat ljudtryck	[Pa]
R	Reflektion	[-]
S	Area	[m ²]
t	Tid	[s]
u	Hastighet	[m/s]
V	Volym	[m ³]
Z_g	Ytimpedans	[Pa*s/m]
Z_0	Impedans	[Pa*s/m]
α	Absorptionsfaktor	[-]
λ	Våglängd	[m]
ρ	Densitet	[Kg/m ³]
ω	Vinkelfrekvens	[Radianer/s]

1 Inledning

Detta kapitel har i huvudsaklig uppgift att beskriva rapportens uppbyggnad och innehåll. En överskådlig inblick i delmomenten samt den frågeställning som rapporten är baserad på ligger i grund för de moment och metoder som valts att användas.

1.1 Bakgrund

Buller är ett alltmer utbrett hälsoproblem i vårt samhälle. I takt med ökande urbanisering och industrialisering blir allt fler människor utsatta för höga ljudnivåer dagligen. Buller definieras som oönskat ljud som påverkar människors hälsa och välbefinnande enligt Boverket (2021). Trots att buller är en välkänd miljöfaktor, så är det fortfarande en underskattad hälsorisk.

Forskning visar att exponering för höga ljudnivåer kan orsaka både fysiska och psykiska hälsoproblem. Vanliga problem med buller är påverkan på kommunikation och koncentration, vilket kan ha negativ inverkan på arbetsprestationen och inlärningsförmågan. Dessutom beskriver Folkhälsomyndigheten (2022) att höga ljudnivåer öka risken för hörselskador, sömnstörningar, stress, hjärt- och kärlsjukdomar. Därför är det av yttersta vikt att uppmärksamma buller i offentliga miljöer som en hälsorisk orsakad av samhället och ta itu med problemet på olika nivåer.

För att se över potentiell utveckling inom området kontaktades Thomas Betong för att utforska möjligheterna att samarbeta kring förbättring av betongens akustiska egenskaper eller utveckling av en ny produkt med samma syfte. Betong med goda akustiska egenskaper är ett relativt utforskat område vilket öppnar upp många potentiella områden att undersöka.

När Thomas Betong såg över äldre produkter som skulle kunna vara aktuell för akustiska tester fann de en som kallas dräneringsbetong. Dräneringsbetong är en typ av betong som är mest känd för dess höga permeabilitet, och används vanligtvis för att hantera dagvatten på trottoarer. Inom akustikområdet ansågs den höga permeabiliteten ha potential som en absorbent av ljud. Efter att ha sett över det gamla receptet på dräneringsbetongen ansågs det relevant att uppdatera receptet för att vara mer anpassat till miljömässig hållbarhet. Det uppdaterade receptet i detta arbete kommer benämnas som den ”ljudabsorberande betongen”.

1.2 Syfte

Syftet med denna undersökning är att utvärdera de akustiska egenskaperna hos den ljudabsorberande betongen med förhoppning att den ska ha en ökad ljudabsorberande förmåga vid användning som en komponent för bullerskyddsskärmar i trafikerade miljöer. För att uppnå detta syfte kommer betongens ljudabsorberande egenskaper att studeras med fokus på resultat från laborietester och simuleringar som gjorts med hjälp av Matlab.

Utöver detta kommer en miljö- och hållbarhetsbedömning att genomföras för att utvärdera den miljöanpassning som gjorts på den ljudabsorberande betongen i förhållande till det äldre receptet på dräneringsbetong och vanlig betong.

1.3 Frågeställning

Kan den ljudabsorberande betongen utvecklad av Thomas Betong visas ha förmåga att fungera som en effektiv bullerskyddsskärm med särskilt fokus på trafikrelaterade ljudkällor?

1.4 Avgränsning

Av praktiska skäl kommer undersökningens tester att begränsas till en nerskalad testmetod där provkropparna är förhållandevis små. Avgränsning kommer även ske med avseende på transmissionsförluster genom materialet med anledning till att en fullskalig modell på en bullerskyddsskärm hade behövts för att kunna göra en korrekt bedömning. Den fullskaliga metoden följer SS-EN 1793-5:2016 men kommer ej ligga till grund för detta arbete.

Arbetet kommer att behandla hållbarhet i form av utsläppsekvivalenter i CO₂ då det är relevant att diskutera användningen av betong i det avseendet, men inte undersöka förbättrad social hållbarhet i form av folkhälsa mer än att referera till vikten i att reducera mängden bullerexponering i offentliga miljöer. Rapporten kommer heller inte behandla ekonomisk hållbarhet i betongen i jämförelse med andra likvärdiga produkter.

1.5 Process

I detta kapitel kommer utförlig process för arbetet att presenteras som använts för att komma fram till resultaten.

Till en början kommer receptet för den ljudabsorberande betongen att tas fram i samråd med Thomas Betong för att den ska klara de generella krav en betong i trafikerad miljö kan behöva.

För att få ett perspektiv över hur den ljudabsorberande betongen är uppbyggd presenteras tillverkning av betongen samt provkropparna, följt av en presentation av den design på bullerskyddsskärmen som används i Matlab-simuleringar för att testa den ljudabsorberande betongen i en tänkt verklig applicering.

Med en inblick i det generella utförandet av provkropparna samt bullerskyddsskärmen kommer en teoretisk del att presenteras för att ge förståelse över nödvändig teori för tester samt resultat. Följande kapitel kommer vara indelade i två avsnitt för att skilja på betongteknisk och akustisk teori.

Testerna som sedan utförts följer internationell standard och tillvägagången av denna kommer att förklaras.

Efter att testerna är utförda följer de resultat som testerna gett. Resultaten kommer vara presenterade enkelt för att sedan diskuteras vidare i analysen.

En analys av den data som tagits fram kommer att redovisas, därefter en analys ur ett hållbarhetsperspektiv. Fokus kommer här vara på betongens miljöpåverkan.

Slutsatsen kommer främst ha fokus på att svara på rapportens frågeställning och den förbättringspotential som både projektet och betongen har i syfte för framtida kandidatarbeten att bygga vidare på.

1.6 Metod

Arbetets metod kommer först beakta en generell hypotes om hur den ljudabsorberande betongen hade kunnat fungera i en trafikerad miljö. Där implementeringen av den ljudabsorberande betongen är att den bekläder en vanlig bullerskyddsskärm av betong för att effektivisera bullerskyddsskärmens ljudabsorberande förmåga och därmed minska det reflekterande bullret.

För att kunna utföra tester på provkropparna av den ljudabsorberande betongen och samtidigt förhålla sig till den avgränsning som valts presenterade handledaren Jens Forssén att använda en standardiserad metod ISO 10534-2:1998 (Bestämning av ljudabsorptionsfaktor och impedans i impedansrör). Fördelen med denna metod är att det går att använda mindre storlek på provkroppar.

Alla resultat kommer tas fram enligt internationell standard och testmetoderna följer också standardernas riktlinjer. De tester som gjorts av Thomas Betong är också utförda enligt standard. Både de betongtekniska och akustiska resultaten kommer presenteras och analyseras för att också jämföras med lämpliga referensmaterial.

1.7 Hypotes

Denna hypotes är baserad på teori som presenteras i kommande teoretiska kapitel 3 om akustisk.

För att få ett helhetsbegrepp om absorption inom akustik kan man tänka sig ett fjädermasssystem där fjäderns dämpande egenskap kommer ligga i fokus. Målsättningen är att betongen med sin högre porositet ska agera dämpande mot ljudvågorna och motverka så mycket reflektion som möjligt. Den ökade porositeten skapar i teorin en ökad friktion vilket i sin tur resulterar i absorption.

En annan hypotes är att den ökade porositeten också kan agera akustiskt absorberande likt en Helmholtz-absorbent. Denna typ av absorbent är lämpad för låga frekvenser och kommer förhoppningsvis vara bidragande till absorption för ett bredare frekvensband.

Transmissionsförlusterna kommer ej vara relevanta i denna undersökning men kan antas vara lika stora eller mindre i förhållande till en vanlig bullerskyddsskärm av betong. Antagandet bygger på den minskad mängden reflektioner som sker från vägbanan mot bullerskyddsskärmen med hjälp av den ljudabsorberande betongen.

2 Betongteori

I detta avsnitt presenteras en detaljerad beskrivning av tillverkningsprocessen för provkroppar av den ljudabsorberande betongen som används i studien. Den data som presenteras i detta kapitel är baserad på vad som varit tillgängligt via Thomas Betong

2.1 Tillverkning av ljudabsorberande betong

Vid framtagning av den ljudabsorberande betongen låg ett äldre recept för dräneringsbetong som grund, vilket följer standard SS 137003:2021 för att uppnå de kraven Trafikverket har på betong i utomhusmiljö intill väg, lämpad för bullerskyddsskärmar. Nedan följer tre recept för två redan befintliga betongrecept vilket avser en vanlig betong och dräneringsbetong som är testad enligt standard. Till sist den justerade betongen som är den ljudabsorberande betongen.

Tabell 2.1

Recept för vanlig betong		
Material:	Typ:	Kg/m ³ (Torrsvikt)
Cement	Anl, Cem I	430
Ballast	0-4mm	887
Sten	4-8mm	904
Tillsatsmedel	Superplasticerande	1,720
	Luftporbildare	0,860
	Retarder	0,860
Vatten	-	161

Tabell 2.2

Recept för dräneringsbetong		
Material:	Typ:	Kg/m ³ (Torrsvikt)
Cement	Anl, Cem I	340
Tillsatt material	Kalk	34
Ballast	0-4mm	71
Sten	4-8mm	1429
Tillsatsmedel	Superplasticerande	2,720
	Luftporbildare	0,680
	Retarder	0,680
	Fibrer	0,6
Vatten	-	102

Tabell 2.3

Recept för ljudabsorberande betong		
Material:	Typ:	Kg/m ³ (Torrsvikt)
Cement	Anl, Cem I	240
Tillsatt material	Kalk	24
	Slagg	113
	TiOmix	3%
Ballast	0-4mm	76
Sten	4-8mm	1513
Tillsatsmedel	Superplasticerande	1,920
	Luftporbildare	0,480
	Retarder	0,480
	Fibrer	0,6
Vatten	-	103

Den ljudabsorberande betongen har vissa tillsatser för att göra den mer miljöanpassad. Detta syns tydligt på mängden cement som används i respektive recept. Tillägget med fibrer är inte en obligatorisk komponent i receptet men vid tillverkning bidrar det till en ökad arbetbarhet och vidhäftning då det är relativt lite cementpasta i förhållande till ballast. Valet av stenstorlek 4–8 mm ansågs vara bättre lämpat i jämförelse med 8-16 mm sten med hänsyn till diametern på impedansröret som proverna kommer testas i.

Kraven i standard SS 137003:2021 föreskriver att betongen ska vara frostresistent vilket innebär tillsatt luftporbildare samt godkända tester för frostresistens. Detta har dock mindre betydelse i receptet då både dräneringsbetongen och den ljudabsorberande betongen redan har hög porositet vilket minskar risken för frostsprängning avsevärt enligt Thomas Betong. Användandet av luftporbildare i dessa recept är dock inte ogynnsamt då tillskottet av luftporbildare ökar porositeten. Avdelningen på forskning och utveckling på Thomas betong såg även möjligheten att blanda i ett tillsatsmedel kallat TiOmix som enligt Heidelberg Cement (2021-03) har en fotokatalytisk egenskap att bryta ner kvävgaser, NO och organiskt smuts.

För att göra en så miljöanpassad betong som möjligt användes även 32% slagg för att dra ner på koldioxidutsläppen per tillverkad kubik. Tillsatsen TiOmix och slagg kommer diskuteras vidare i kapitel 7 om hållbarhet.

Under tillverkningsprocessen valdes det att gjutas referensmaterial för vanlig betong som kommer användas som jämförelse vid provtagning för ljudabsorption. Den vanliga betongen är baserad på det recept som presenterats i tabell 2.1. Detta är för att se hur en bullerskyddsskärm hade agerat i vanliga fall i jämförelse med ett som har en ytbeläggning av den ljudabsorberande betongen.

Utöver proverna som gjöts för de akustiska testerna tillverkades en kub med sidor 150mm för att kunna testa betongens hållfasthet enligt SS 137003:2021.



Figur 2.1: Vanlig betong.



Figur 2.2: Ljudabsorberande betong.

Figur 2.1 illustrerar en vanlig betong som gjöts för att ha som referensmaterial och figur 2.2 visar den ljudabsorberande betongen.

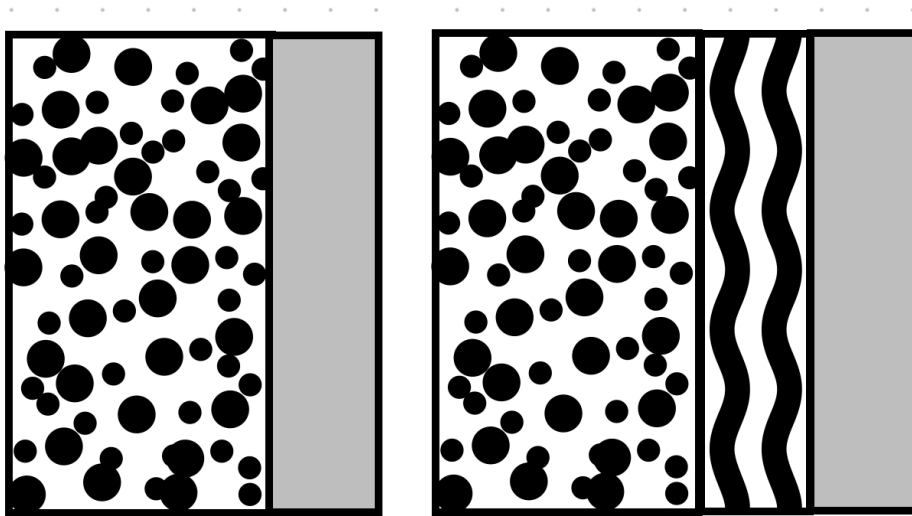
Nästa steg i tillverkningsprocessen var att ta ut borrkärnor. Både referensprovet och den ljudabsorberande betongen togs ut på samma vis med en borr på 98mm i diameter för att passa i impedansröret.



Figur 2.3: Borrkärnor av vanlig betong samt referensprovet.

2.2 Design av bullerskärm

För att illustrera de två olika förslagen i genomskärning hur bullerskärmar hade kunnat designas visas en figur med förslag 1 och förslag 2. Dessa förslag kommer testas i simulering. Det första förslaget visar en ytbeläggning där den ljudabsorberande betongen ligger tätt mot den vanliga betongen, sidan mot trafiken visas till vänster och är den porösa ljudabsorberande betongen. Detta alternativ är enklast att producera men saknar egenskapen för en Helmholtz-absorbent då det kräver en volym bakom kanalerna och en effektiv absorbent. Förslag 2 illustrerar en bullerskärm som har en beklädnad av den ljudabsorberande betongen, följt av en effektiv absorbent som ett mellanskikt och till sist betongskärmen för att implementera idén om en Helmholtz-absorbent. Dessa två designförslag kommer att testas i impedansröret för att se hur de ställer sig mot varandra.



Figur 2.4: Illustrerar de olika konstruktionerna av *bullerskyddsskärm*, utan absorbent till vänster kommer refereras till förslag 1 och med absorbent, förslag 2 till höger.

2.3 Betong och hållbarhet

För att få en inblick i betongens påverkan på miljön förklarar Naturskyddsföreningen (2021) att cementtillverkning är en energi- och resurskrävande process som har en betydande miljöpåverkan. Cementproduktion står för en stor del av koldioxidutsläppen från den globala byggsektorn men innefattar även stor exploatering av mark. Naturskyddsföreningen (2021) pekar på vikten av att minska cementanvändningen och använda alternativa byggmaterial för att minska utsläppen av växthusgaser och bevara miljön.

En lösning på alternativa byggmaterial som drar ner utsläppen för betongproduktionen är användandet av slagg i betongtillverkning förklarar HeidelbergCement (2021). Utvecklingen av nya cementrecept för att minska klimatpåverkan från cementtillverkning har tagit stora kliv, där användningen av slagg är en viktig del i arbetet. Slagg är en biprodukt från stålproduktion som tidigare varit en utmaning att hantera på ett miljömässigt hållbart sätt. Genom att använda slagg som en del i cementtillverkningen kan man minska användningen av klinker, som är en huvudingrediens i cement och som står för en stor del av utsläppen. HeidelbergCement (2021) menar på att genom att använda slagg i cement- och betongtillverkningen kan man minska utsläppen av koldioxid med upp till 80 procent jämfört med traditionell cementtillverkning.

Med denna teoretiska bakgrund kommer en analys av betongens ekologiska hållbarhet att diskuteras i kapitel 7.

3 Akustikteori

För att ge en klarare bild av de relevanta områdena att undersöka kommer det först presenteras akustiska begrepp och den teori som är nödvändig för testerna som utförts.

3.1 Planvågor och normalriktning

För att förstå planvågor kan man se det som en endimensionell vågrörelse i en riktning. En planvåg i luft är förhållandet mellan tryck, p , och partikelhastighet, u . Denna relation kan uttryckas som $p/u = \rho_0 c$, där ρ_0 representerar densiteten hos luften och c är ljudhastigheten i luft på 340 m/s. Detta förhållande förutsätter små förluster och att vågen rör sig i samma riktning som hastigheten (Höstmad, 2017; Kropp, 2017)

För att sedan definiera begreppet normalriktning kan man föreställa sig ett homogent och isotopiskt rum där planvågor färdas vinkelrätt mot ytan. Genom analyser av planvågor i normalriktning kan man enkelt definiera och mäta en ljudvågs karaktär. (Vigran, 2008)

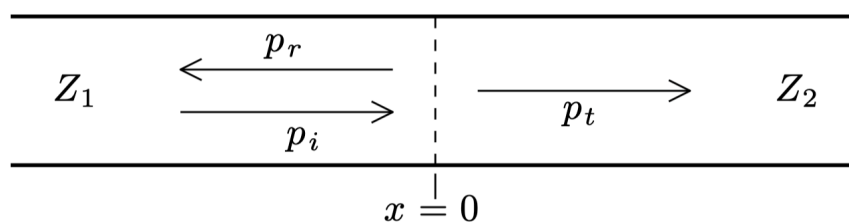
3.2 Impedans

Luftens impedans betecknas Z_0 . Generellt sett är impedansen definierad som kvoten mellan tryck och partikelhastighet, $Z = p/u$, där både trycket och partikelhastigheten kan ha komplexa värden. (Forssén, 2022)

3.3 Absorbenter

För att definiera en absorbents funktion behöver man se tillbaka på begreppet planvåg och normalfält. Genom att se över rörelsen av en planvåg mellan två medier enligt Vigran (2008), kan man beskriva tryckets reflektionsfaktor, R , enligt.

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \tag{3.1}$$



Figur 3.1: Infallande ljud mot ett nytt medium. Det infallande ljudet har en reflekterande faktor och en transmitterande i det nya mediet.

I ekvation 3.1 definierar impedans, Z , för medium 1 och 2. Detta tas sedan vidare för att förstå konceptet bättre med ett materials absorptionsfaktor.

3.4 Diffust fält

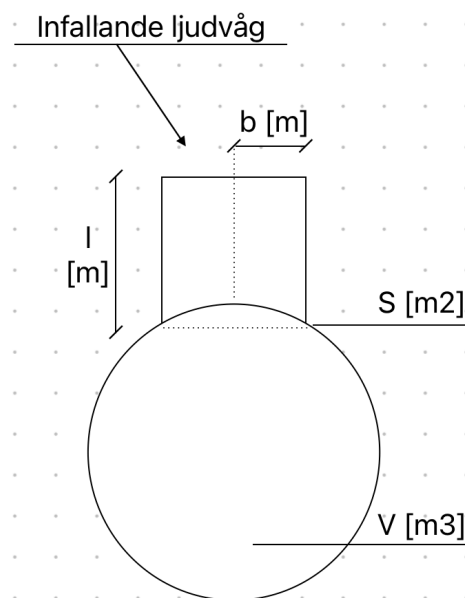
Diffust fält definierar ett mer verkligt scenario jämfört med ljud infallande i normalriktning. För att uppnå detta kommer omräkningar av resultaten för normalriktning räknas om till diffust fält enligt Vigran T.E (2008).

$$\alpha_{stat} = 2 \int_0^{\pi/2} \alpha(\varphi) \sin \varphi \cos \varphi d\varphi = 2 \int_0^{\pi/2} [1 - |R_p|^2] \sin \varphi \cos \varphi d\varphi \quad (3.2)$$

Ekvationen ovan anspelar på hur absorptionsfaktorn varierar över infallsvinkeln φ av ljudvågor mellan 0° och 90° . (Vigran. 2008)

3.5 Helmholtz absorbent

En Helmholtz absorbent är oftast designad för en specifik frekvens och placeras oftast i rum där denna specifika frekvens kan innebära problem. I kontrollerade former kan man anpassa absorbentens mått för att absorbera ett visst frekvensområde (Vigran, 2008).



Figur 3.2: Illustrerande figur av en Helmholtz-absorbent i genomskärning.

Följande formel beskriver Helmholtz-absorbentens resonansfrekvens

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{\frac{S}{V(l + 1,7b)}} \quad (3.3)$$

I fallet med den ljudabsorberande betongen är det strukturella mönstret svårt att uppskatta. Detta påverkar främst radien b , hålighetens area S och i viss mån längden l . Volymen går relativt enkelt att justera och beror på vald utformning av bullerskärm.

3.6 Impedansrör

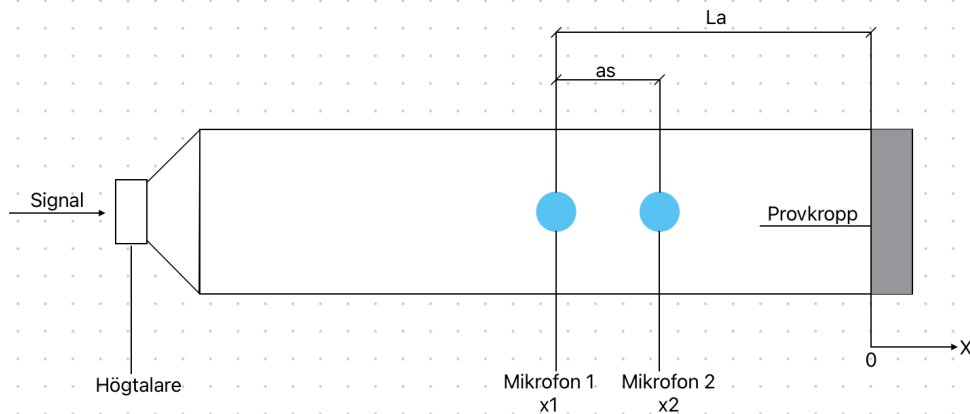
Genom att mäta ljudtrycksnivån i två positioner för mikrofonen enligt figur 3.3 (samt inkorporera normaltryck i röret) kan man ta ut H_{12} vilket avser en överföringsfunktion förmodet totala trycket mellan de två positionerna i röret.

För att få fram reflektionsfaktorn används en Fourier-transformering enligt Vigran (2008).

$$R(x, f) = \frac{F[p_r(x, t)]}{F[p_i(x, t)]} \quad (3.4)$$

För att kunna göra detta börjar uträkningen i positionen x_1 och sedan x_2 för mikrofonen (Vigran, 2008). Mätning av ljudtrycket vid de två positionerna ger förhållandet H_{12} .

$$H_{12}(f) = \frac{F[p(x_2, t)]}{F[p(x_1, t)]} = \frac{F[p_i(x_2, t) + p_r(x_2, t)]}{F[p_i(x_1, t) + p_r(x_1, t)]} \quad (3.5)$$



Figur 3.3: Illustration av ett impedansrör med två mikrofoner. För test med en mikrofon ska denna placeras ut i position x_1 och x_2 fördelat med en mätning per position.

Genom att mäta överföringsfunktionen kan man få ut provkroppens reflektion, impedans samt absorptionsfaktor. Följande ekvationer enligt Vigran (2008)

Beräkning av reflektion:

$$R(0, f) = \frac{H_{12} - e^{-jk_0as}}{e^{jk_0d} - H_{12}} * e^{j2k_0La} \quad (3.6)$$

där k_0 motsvarar.

$$k_0 = f * \frac{2\pi}{c} \quad (3.7)$$

Beräkning av impedans:

$$Z_g(0, f) = j\rho_0c_0 * \frac{H_{12} \sin(k_0La) - \sin[k_0(La - as)]}{\cos[k_0(La - as)] - H_{12} \cos(k_0La)} \quad (3.8)$$

Förhållande mellan impedans och reflektionsfaktor:

$$Z = \frac{1 + R}{1 - R} \quad (3.9)$$

Beräkning av absorberingsfaktor:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.10)$$

3.6.1 Avgränsning för impedansrör

Frekvensområdet är bestämt av undre, (f_l) och övre (f_u) gräns för impedansröret enligt ISO 10534-2:1998:

$$f_l < f < f_u \quad (3.11)$$

Bestämning av f_l vilket motsvarar den undre gränsen för frekvensbandet som är mätbart är enligt standard ISO 10534-2:1998 beroende av utrustningens dimension. Vid avläsning av testresultaten råder en osäkerhet vid 0-120Hz. För att säkerställa att resultaten är pålitliga bör frekvenser under 120Hz ses som mindre pålitliga. För bestämning av begränsningen i övre frekvens inverkar impedansrörets diameter d . Detta föreskriver en övre gräns enligt:

$$\frac{0,58 * c_0}{d} = f_u \quad (3.12)$$

4 Testmetoder

I detta kapitel beskrivs hur testerna utförs för betong respektive akustik. Resultat för betong presenterade i detta kapitel är tillhandahållna av Thomas Betong arkiv.

4.1 Betongtekniska tester

De tester som gjorts för betongen inkluderar tryckhållfasthet samt NO nedbrytning för TiOmix. NO nedbrytningen är baserad på data från Thomas Betong och resultaten för detta test kommer presenteras i detta avsnitt.

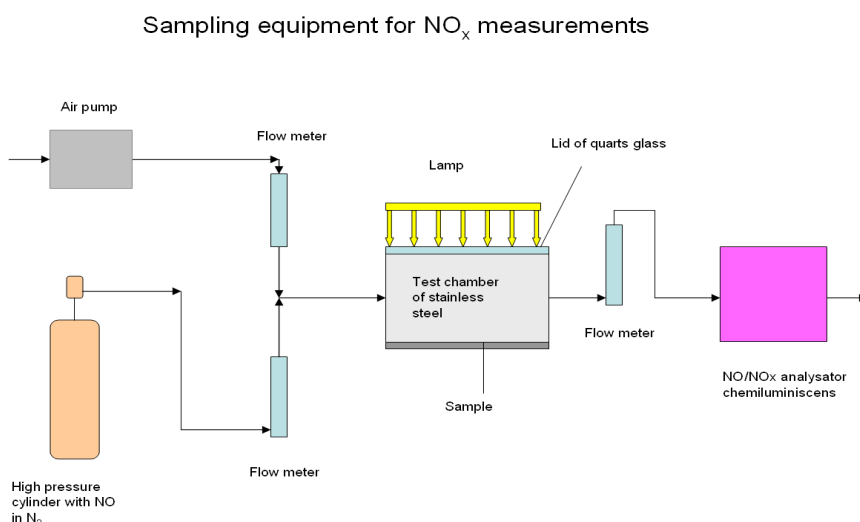
4.1.1 Tryckhållfasthet

Vid utförande av tryckhållfasthet mäts provkroppen upp för att få ut volym, vikt och densitet. Detta gör det möjligt att få ut porositet samt hållfasthet som omräknas från den brottgräns som provkroppen har genom den tryckta arean på provet. Denna testmetod är föreskriven enligt SS 137003:2021.

Enligt Thomas Betongs arkiv förväntas en dränerande betong med porositet på ca 20% ha god hållfasthet, vilket motsvarar 20MPa. Mellan 25-30% porositet förväntas provet ha lägre hållfastighet vilket motsvarar 15MPa.

4.1.2 NO-nedbrytning

I denna typ av mätningen ser man över mängd NO där halten NO_x kontrolleras i varje testomgång. Provet utsätts av en ljuskälla med UV-intensitet på 300 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, i en testkammare med luftflöde 0,4-0,5L/min.



Figur 4.1: Illustration av hur testutrustning för NO-nedbrytning är uppställd

Denna typ av test kommer att vara relevant i hållbarhetssynpunkt. Ur detta test kan man förvänta sig att en god nedbrytning av NO, ska överträffa >60% enligt Thomas Betong. Av den data som samlats in visar resultat för 3% TiOmix tillsatt i en likvärdig betong som den ljudabsorberande betongen en god nedbrytning på ca 70%.

4.2 Akustiska tester

Det test som gjordes för den ljudabsorberande betongen var den standardiserade metoden för impedansrör föreskriven enligt ISO 10534-2:1998. Utöver utrustningen för denna metod användes Matlab för att räkna ut de relevanta resultaten.

4.2.1 Impedansrör

För att få ut korrekta resultat togs de nödvändiga måtten ut på testutrustningen samt de indata som är aktuella för uträkningarna i Matlab enligt script i Appendix.

Tabell 4.1

Mått testutrustning

Diameter impedansrör	d	0,098	m
Avstånd mellan mikrofonpositioner	as	0,05	m
Avstånd till provkropp	La	0,215	m

Data relevant till tester

Ljudets hastighet	c	340	m/s
Luftens densitet	ρ_0	1,2	kg/m ³
Övre frekvensgräns	f_u	2012	Hz

Frekvensbandet som användes under testerna var ett brus i registret 0-10000 Hz men i presentationen av resultaten används frekvenserna 125-3150 Hz som bedöms vara ett giltigt frekvensområde med hänsyn till impedansrörets begränsningar. Som visas i tabell 4.1 är den övre frekvensgränsen för impedansröret begränsat till 2012 Hz men en utvärdering av denna begränsning kommer presenteras i analysen.

4.2.2 Provkroppar

För att minska osäkerheter användes fyra provkroppar för testet. Då det ej går att kontrollera betongens struktur ansågs detta lämpligt för att sedan kunna skapa en trendlinje för alla resultat.

Dessa fyra prover som användes under testet i impedansröret testades både med och utan mineralull bakom provkroppen. Detta för att se hur effektiv idén om en eventuell Helmholtz-absorbent är och för att efterlikna de designförslag som presenterats för bullerskyddsskärm.

Datan som samlades in från testerna användes för att räkna om till relevanta resultat i Matlab med hjälp av de presenterade ekvationer ha för impedansrör samt omräkningen för diffust fält.

5 Resultat

I detta avsnitt kommer resultaten att presenteras. Först kommer resultaten på den ljudabsorberande betongens hållfasthet följt av de akustiska resultaten. Med de akustiska resultaten kommer en uppdelning av tersband och oktavband redovisas. Resultaten är baserade på den data som testerna gav och är sedan omräknade med hjälp av Matlab till absorptionsfaktor över ett relevant frekvensområde om 125-3150 Hz.

För att få säkrare resultat från testerna har en trendlinje gjorts över de fyra olika proverna benämnda V1-4 som är illustrerad i graferna.

Då impedansröret endast tillåter data given i normalriktning har en omräkning av resultaten gjorts för att efterlikna ett diffust fält enligt ekvation 3.2.

Detta för att få ett mer verklighetstroget resultat. Graferna för diffust fält presenteras endast i oktavband för att göra det illustrativt.

Resultaten för diffust fält inom ett oktavband kommer även att presenteras i en klassning enligt ISO 11654:1997 som beskriver den ljudklass materialet uppnår.

5.1 Betongens hållfasthet

Uppmätt data och uträkning av hållfasthet är gjord enligt standard SS 137207:2005 för kub med sidor 150mm presenteras i tabell 5.1.

Tabell 5.1: Visar uppmätt data för betongkuben vars hållfasthet testades

**Uppmätt data:
Ljudabsorberande
betong**

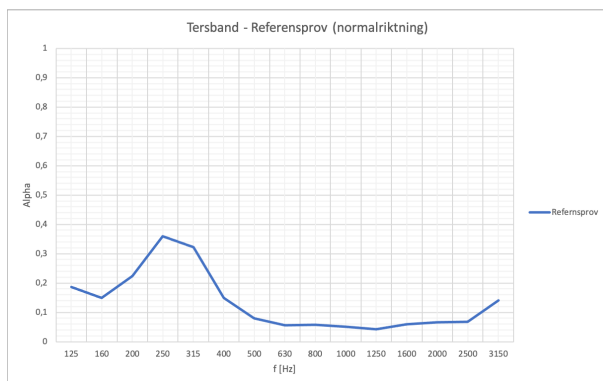
Sten:	8	mm
Gjutdatum:	16-02-2023	
Ålder på prov:	28	dygn
Densitet 0% luft:	2651	kg/m ³
Vikt:	5791	gram
Vikt i vatten:	3512	gram
Porositet förväntad:	25	%
Tryckyta:	22500	mm ²
Höjd:	150	mm
Volym:	3,375	dm ³
Densitet från mått	1716	kg/m ³
Densitet från vikt	2279	kg/m ³
Densitet medel	1997	kg/m ³
Porositet:	0,247	%
Last	315	kN
Hållfasthet	14	MPa

5.2 Akustisk absorption i normalriktning

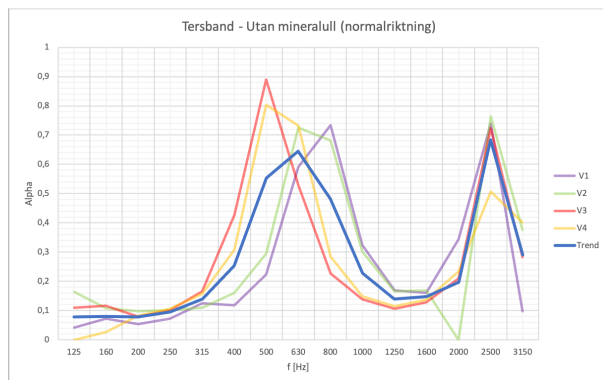
I detta avsnitt följer resultaten presenterade i tersband och oktavband i normalriktning.

5.2.1 Resultat i tersband

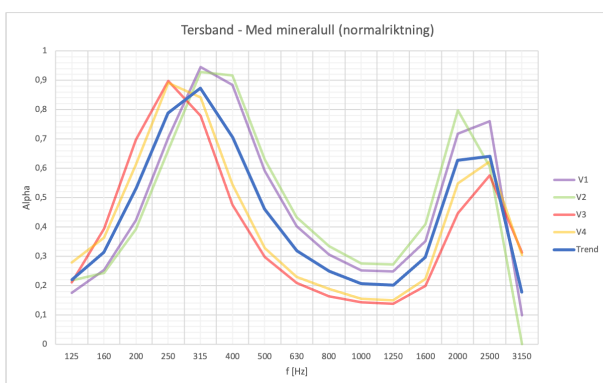
Redovisade figurer 5.1.1 till 5.1.4 avser resultaten av absorptionsfaktor över frekvensområdet 125-4000 Hz i tersband.



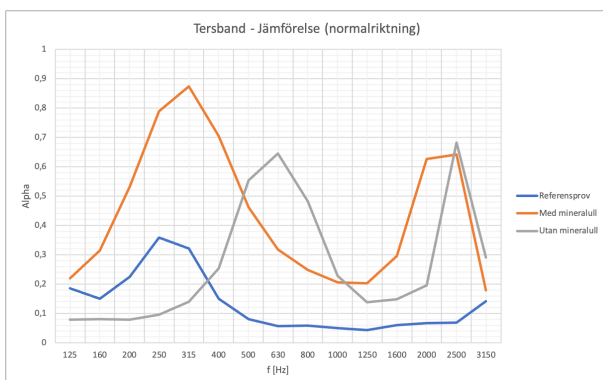
Figur 5.1.1: Referensmaterial



Figur 5.1.2: Utan mineralull



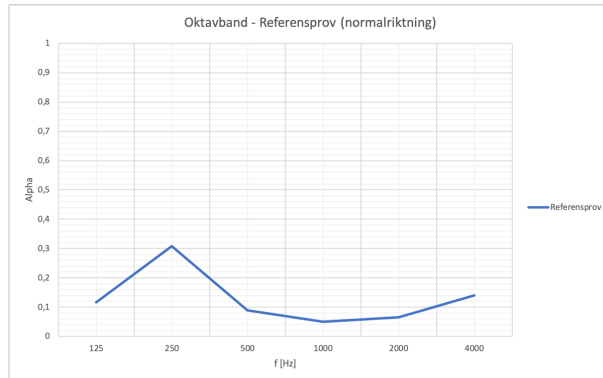
Figur 5.1.3: Med mineralull



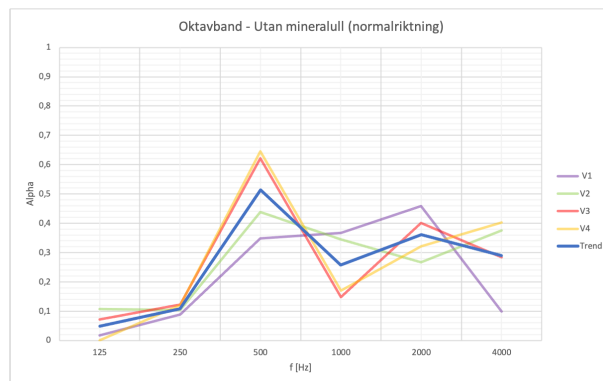
Figur 5.1.4: Jämförelse mellan referensprov och trendlinje för prover med och utan mineralull.

5.2.2 Resultat i oktavband

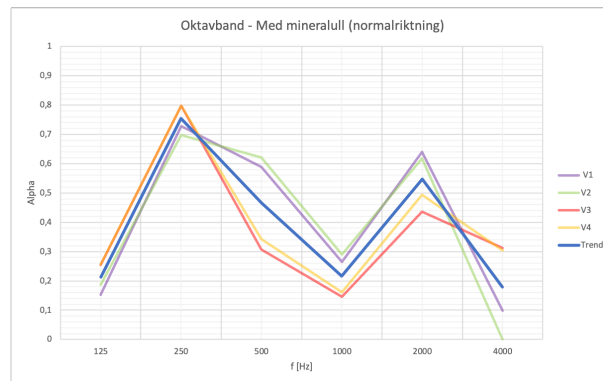
Redovisade figurer 5.2.1 till 5.2.4 avser resultaten av absorptionsfaktor över frekvensområdet 125-4000 Hz i oktavband.



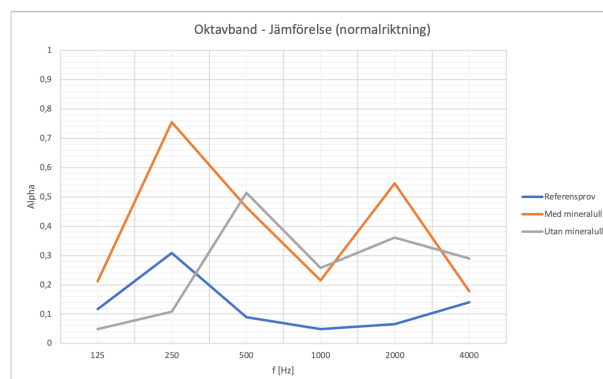
Figur 5.2.1: Referensmaterial



Figur 5.2.2: Utan mineralull



Figur 5.2.3: Med mineralull



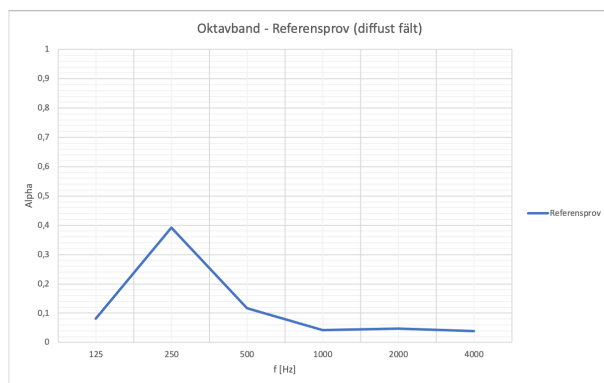
Figur 5.2.4: Jämförelse mellan referensprov och trendlinje för prover med och utan mineralull.

5.3 Akustisk absorption i diffust fält

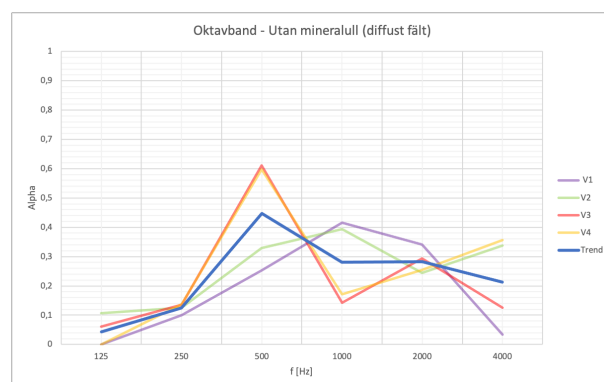
I detta avsnitt följer resultaten presenterade i oktavband omräknat till diffust fält från normalriktning enligt ekvation 3.2.

5.3.1 Resultat i oktavband

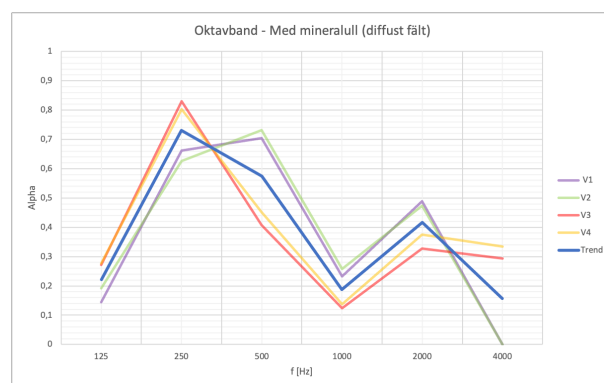
Redovisade figurer 5.3.1 till 5.3.4 avser resultaten av absorptionsfaktor över frekvensområdet 125-4000 Hz i oktavband för diffust fält.



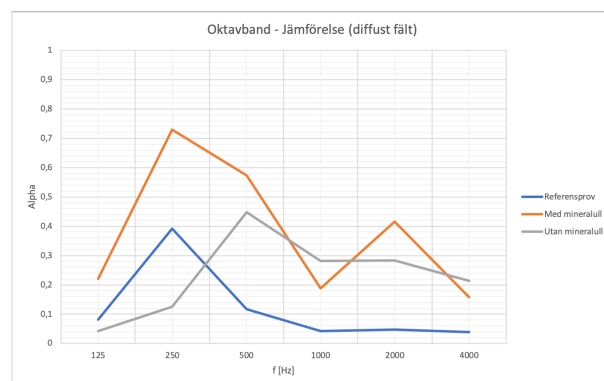
Figur 5.3.1: Referensmaterial



Figur 5.3.2: Utan mineralull



Figur 5.3.3: Med mineralull



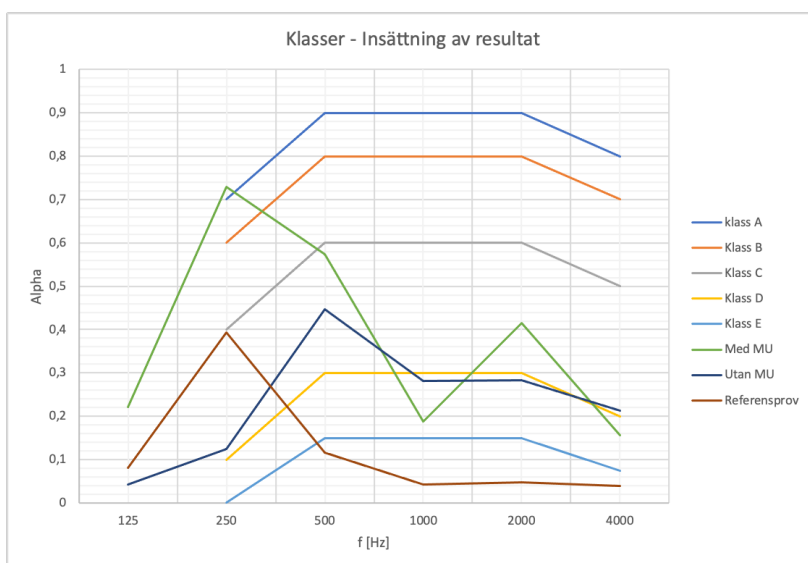
Figur 5.3.4: Jämförelse mellan referensprov och trendlinje för prover med och utan mineralull.

5.4 Skattning av absorpent

Klassificering av absorption enligt standard EN ISO 11654:1997 tillåter endast en total negativ avvikelse $\leq 0,10$. Avvikelserna för varje prov presenteras i Tabell 5.2 med en sammanställning av avvikelse för varje klass. Figur 5.4.1 redovisar hur referenskurvorna förhåller sig till varandra och figur 5.4.2 insättning av resultaten från figur 5.3.4 som avser absorptionsfaktor i diffust fält för oktavband.



Figur 5.4.1: Referenskurva för ljudklasser.



Figur 5.4.2: Referenskurva och resultaten för tester med och utan mineralull samt referensprov, omräknat i diffust fält.

Tabell 5.2 avser sammanställda värden för resultat i oktavband med omräkningen till diffust fält i förhållande till klassificering av materialet. Data för Klasser avser absorptionsfaktor och resultaten presenterade som delta (A-E) avser skillnaden i negativa avvikelsen i förhållande till absorptionsfaktor för respektive klass. Data presenterad i de högra kolumnerna är den vägda absorptionsfaktorn i diffust fält i oktavband för respektive prov.

Tabell 5.2:

Klasser

f [Hz]	A	B	C	D	E
125	0	0	0	0	0
250	0,7	0,6	0,4	0,1	0
500	0,9	0,8	0,6	0,3	0,15
1000	0,9	0,8	0,6	0,3	0,15
2000	0,9	0,8	0,6	0,3	0,15
4000	0,8	0,7	0,5	0,2	0,075

Utan MU	Med MU	Referens
0,04	0,22	0,08
0,12	0,73	0,39
0,45	0,57	0,12
0,28	0,19	0,04
0,28	0,42	0,05
0,21	0,16	0,04

Med MU

f [Hz]	Delta A	Delta B	Delta C	Delta D	Delta E
125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
500	-0,33	-0,23	-0,03	0,00	0,00
1000	-0,71	-0,61	-0,41	-0,11	0,00
2000	-0,48	-0,38	-0,18	0,00	0,00
4000	-0,64	-0,54	-0,34	-0,04	0,00
Avvikelse	2,17	1,77	0,97	0,16	0,00

Utan MU	Med MU	Referens
0,04	0,22	0,08
0,12	0,73	0,39
0,45	0,57	0,12
0,28	0,19	0,04
0,28	0,42	0,05
0,21	0,16	0,04

Utan MU

f [Hz]	Delta A	Delta B	Delta C	Delta D	Delta E
125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	-0,58	-0,48	-0,28	0,00	0,00
500	-0,45	-0,35	-0,15	0,00	0,00
1000	-0,62	-0,52	-0,32	-0,02	0,00
2000	-0,62	-0,52	-0,32	-0,02	0,00
4000	-0,59	-0,49	-0,29	0,00	0,00
Avvikelse	2,85	2,35	1,35	0,04	0,00

Utan MU	Med MU	Referens
0,04	0,22	0,08
0,12	0,73	0,39
0,45	0,57	0,12
0,28	0,19	0,04
0,28	0,42	0,05
0,21	0,16	0,04

Referensprov

f [Hz]	Delta A	Delta B	Delta C	Delta D	Delta E
125	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250	-0,31	-0,21	-0,01	0,00	0,00
500	-0,78	-0,68	-0,48	-0,18	-0,03
1000	-0,86	-0,76	-0,56	-0,26	-0,11
2000	-0,85	-0,75	-0,55	-0,25	-0,10
4000	-0,76	-0,65	-0,45	-0,15	-0,03
Avvikelse	3,56	3,05	2,05	0,85	0,27

Utan MU	Med MU	Referens
0,04	0,22	0,08
0,12	0,73	0,39
0,45	0,57	0,12
0,28	0,19	0,04
0,28	0,42	0,05
0,21	0,16	0,04

6 Analys

Kapitlet kommer analysera resultat först från det tryckhållfasthetstest som togs på betongkuben för att sedan se över de resultat som testerna med hjälp av impedansrör givit.

6.1 Materialegenskaper för betong

Genom att referera tillbaka till Thomas Betongs arkiv där en dränerande betong med porositet på ca 20% ha god hållfasthet, vilket motsvarar över 20 MPa. Mellan 25-30 % porositet förväntas provet ha lägre hållfastighet vilket motsvarar ungefär 15 MPa. För att kunna göra en fullständig likvidering av att hållfastheten som kan anses tillräcklig i förhållande till provets porositet hade det behövts utföra fler prover på tryckhållfasthet. Detta för att se om det finns en trend i spridningen på resultaten. I syftet med denna undersökning kan en tryckhållfasthet på 14 MPa anses bra jämfört med de förväntade resultaten.

6.2 Akustik absorption

Med en överskådlig blick över resultaten som fåtts ser man en ganska tydlig förbättring i absorption över hela frekvensbandet i förhållande till referensprovet som använts i testerna. För att förstärka referensprovets (för tät, vanlig betong) relevans kan man jämföra absorptionsdata i diffust fält för materialet betong mellan Boverket (2008) och de presenterade resultaten i ett oktavband.

Tabell 6.1 Avser den absorptionsfaktor i ett diffust fält presenterat i oktavband.

f [Hz]	Boverket	Resultat från test
125	0,01	0,08
250	0,01	0,39
500	0,01	0,12
1000	0,02	0,04
2000	0,02	0,05
4000	0,03	0,04

Dessa resultat skiljer sig något mot varandra men har en rimlig spridning för att vara representativa i undersökningen. Noterbart är dock den ökade absorptionen mellan 250-500 Hz som ligger inom provets topp. Vilket kan bero på testutrustningens begränsningar och provens dimensioner. Trots detta kan den ljudabsorberande betongen anses så pass korrekta i sin jämförelse med referensprovet att resultaten är relevanta.

I kapitlet om de akustiska testerna ser man en begränsning av den övre frekvensgränsen på 2012 Hz. Denna begränsning är baserad på standarden ISO 10534-2:1998. Man bör därför ta i beaktning att resultaten ovanför denna frekvens inte är helt pålitliga då det ej går att säkerställa planvågor i normalriktning enligt standarden. Ovanför den övre frekvensgränsen finner man en större spridning i resultaten presenterat i Matlabs rådata. Genom användningen av ett flertal provkroppar kan de osäkerheter som uppstått inom 125-2012 Hz minskas.

6.2.1 Akustisk absorption i normalriktning

Graferna presenterade i tersband och oktavband i normalriktning kan vara en bra indikator för en generell prestation i absorption.

Ser man över resultaten och jämför inledningsvis absorptionen mellan referensprovet och provkroppen utan mineralull finner man en tydlig förflyttning av toppfrekvensens absorption effektivitet.

Efter den första toppen vid 500 Hz ser man en generellt avtagande absorptionsfaktor tills den ökar igen vid de högre frekvenserna. I sin helhet ser man en förbättrad absorption i förhållande till referensprovet. Detta beror med störst sannolikhet på den ökade porositeten på provet vilket skapar mer friktion för de infallande ljudvågorna. Friktionsförlusterna som skapas är mest effektiva i ett högre frekvensområde vilket ser ut att stämma i den jämförelse som gjort i förhållande till referensprovet. Provet med mineralull har en tydlig topp vid 250 Hz som har betydligt bättre absorptionsfaktor än de andra proverna. Denna topp och dess placering i frekvensområdet grundar sig med stor sannolikhet där för sin egenskap som en Helmholtz-absorbent. Man kan även se att absorptionsfaktorn ser relativt lik ut resultaten från provet utan mineralull, speciellt i de högre frekvenserna där friktionsförlusten från betongen verkar vara den dominerande faktorn till att kurvorna ser så pass lika ut.

6.2.2 Akustisk absorption i diffust fält

Den största felmarginalen i diffust fält ligger i att testerna har gjorts i normalriktning och sedan blivit omräknade. Även om denna metod kan stämma överens relativt bra med ett fullskaligt test där man direkt testar i diffust fält hade det varit bra att göra en jämförelse i hur omräkningen skiljer sig från ett verkligt test.

Vid omräkningen till diffust fält genom prover i normalriktning tar man ej ytans struktur i beaktning. Den porösa ytan hade i teorin kunnat vara bidragande till diffusion som hjälper till att sprida de reflekterande ljudvågorna som annars kan vara i fas och förstärka ljudtrycket.

För att analysera de tester som har gjort i denna undersökning ser man en liknande trend som resultaten från normalriktningen. Den största skillnaden ligger omkring frekvensområdet kring 1000 Hz där man ser en aning större differens mellan proven med och utan mineralull.

6.2.3 Klassificering av ljudabsorbent

Skattningar som gjorts baserad på det klassificeringssystem man finner i EN ISO 11654:1997 är till för att kunna ge en produkt alternativt ett material en generell ljudklassning. Denna klassificering är till för ett relativt stort spektrum med en jämn absorption över detta spektrum. Då man i resultaten ser tydliga toppar vid vissa frekvensområden är denna klassning inte riktigt anpassad för den potentiella effekt den ljudabsorberande betongen har men kan vara en god indikator för hur den kan förhålla sig till andra material.

Resultaten påvisar att referensprovet ligger under ljudklass E vilket var förväntat. Med mineralull resulterar det i klass E och utan mineralull, klass D. Förväntningen här var att resultaten från provet med mineralull skulle hamna i en högre klass än den utan. Generellt sett så har provet med mineralull betydligt bättre absorptionsförmåga men på grund utav en dipp kring 1000 Hz området klarade provet inte de minsta avvikelserna på $\leq 0,10$. Anledningen till detta var att toppen vid 250 Hz skapade ett reducerat entalsvärde på den standardiserade vägningskurvan i jämförelse med provet utan mineralull som hade sin topp vid 500 Hz. Dock betyder inte en lägre klass i detta fall att denna konstruktion är sämre. För konstruktionen med mineralull finns troligtvis möjlighet att laborera med materialens tjocklek för att flytta denna topp som återfinns vid 250 Hz baserat på ekvation 3.3.

7 Ekologisk hållbarhet

Med så stor inverkan på miljön som betong har är det av stor vikt att använda alternativa material som är förnybara alternativt dra ner på de ämnen som har störst inverkan. Som förklarat i kapitel 2.3 är materialet slagg en bra väg att gå i dagens läge. Slagg var en av de hållbarhetsval som gjordes i skapandet av den ljudabsorberande betongen ihop med TiOmix. Jämför man recepten presenterade i tabell 2.1, 2.2 och 2.3 ser man dessutom en tydlig trend i minskningen av cement.

Ser man över recepten och använder en intern kalkyl framställd av Thomasbetong har den ljudabsorberande betongen baserat på receptet i tabell 2.3 ett CO₂ utsläpp (inkluderat tillverkning och transport) på 199 Kg/ton. Dräneringsbetong från tabell 2.2 utan slagg har ett utsläpp på 263 KgCO₂/ton. För att sätta detta i perspektiv till en vanlig betong enligt samma kalkyl är utsläppen för en ej klimatkompenserad betong ungefär 360 KgCO₂/ton. Något man bör ta hänsyn till är att betongkvaliteten med avseende på hållfasthet varierar mellan en porös betong vilket inkluderar både den ljudabsorberande och dräneringsbetongen i förhållande till vanlig betong. En porös betong har inte som primär uppgift att agera bärande utan lämpar sig bäst för sin funktion som ljudabsorberande eller dränerande.

Om man sedan jämför dessa utsläpp med trä som anses vara mer hållbart och är förekommande som bullerskyddsskärmar, presenterar Boverket (2023) en likvärdig produktions- och transportkalkyl som motsvarar ungefär 100 kgCO₂/ton, 99 kgCO₂/ton mindre än den ljudabsorberande betongen, vilket argumenterar för att vara ett bättre alternativ med hänsyn till miljöavtryck. Det är viktigt att ha i beaktning i denna kalkyl att detta avser hyvlat virke och skulle man upprätta en likvärdig konstruktion i trä med liknande akustiska egenskaper som den testade betongen hade utsläppen CO₂ för träkonstruktionen ökat markant.

Ser man över långsiktiga fördelar med den ljudabsorberande betongen har tillägget TiOmix en betydande roll. Som beskrivet i kapitel 2.1 har detta tillsatsmedel en fotokatalytisk funktion som bryter ner kväveoxider samt organiska ämnen. Detta har en renande effekt på de avgaser som släpps ut i trafikerade miljöer vilket gör användandet i en bullerskyddsskärm optimalt med hänsyn till sin placering. Porositeten i den ljudabsorberande betongen gör det även möjligt för reningen att ske mer effektivt då ytan för en porös betong är betydligt mycket större än en vanlig betong utan de stora porerna. Ser man över den organiska nedbrytningen som sker med hjälp av TiOmix medför den att en bullerskyddsskärm av denna sort hade det varit underhållsfritt.

8 Slutsats

I sin stora helhet är den ljudabsorberande betongen en förbättring i jämförelse med vanlig betong i användningsområdet som bullerskyddsskärm.

Genom att återblicka på den hypotes som ställts ser man goda resultat gällande teorin om Helmholtz-absorbent. Konceptet om en sådan absorbent hade kunnat vidareutvecklas för att optimera dess effekt då resultaten för denna typ av konstruktion ser lovande ut.

Undersökningen i denna rapport har enbart lagt en grund för produkten ljudabsorberande betong. Då det är ett stort område att täcka för en produkt som ej testats innan, ligger denna rapport som en god bas för att vidarearbeta på. Det största arbetet som hade behövts göras för att säkerställa att produkten faktiskt är effektiv som bullerskyddsskärm, är en fullskalig modell som följer standarden SS-EN 1793-5:2016. Genom att göra tester på en fullskalig modell kan man även säkerställa transmissionsförluster genom materialet och optimera bullerskyddsskärmens konstruktion.

I en fullskalig modell hade det även varit möjligt att testa en ljudabsorberande betong utan begränsning av dess stenstorlek som utgjorde en begränsning av impedansrörets dimensioner. Ökningen av stenstorlek hade kunnat vara aktuell i avseende på diffusion.

Genom att vidare säkerställa betongens effektivitet som absorbent kan man sedan beräkna ljudreduktion givet av bullerskyddsskärmar utsatta längs en väg. Vilket också är en potentiell vidareutveckling för att utvärdera dess effektivitet som bullerskyddsskärm.

Denna rapport har varit begränsad till trafikrelaterat buller och genom vidare undersökning om produkten kan den eventuellt vara bättre tillämpad för rumsakustik. Appliceringsområden hade då kunnat vara i skolmiljöer, stora lokaler för mässor eller kontor för att ge några exempel.

Fokus i denna rapport legat på att ta ut grundläggande data för produkten finns det även förbättringspotential i att undersöka hållbarhet mer analytiskt. Det kan då vara aktuellt att ta upp ekonomisk, ekologisk och social hållbarhet för att se om en absorbent av denna typ kunnat vara mer än befintliga likvida produkter. Detta är av stor vikt för att kunna få en transparant vy över den ljudabsorberande betongens möjlighet till att vara bidragande till ett mer hållbart samhälle.

9 Appendix

```
% Kundts tube
clear
close all
clc

FileNameLoadStart = ...

c=340; %ljudets hastighet i luft, [m/s]
rho=1.2; %densitet för luft [kg/m3]
as=0.05; %avst nd mellan mikrofonerna, [m]
La=0.215 %avst nd mellan prov och mikrofon, [m]

eval(['load ',FileNameLoadStart,'m1'])

H1=Hxy(1:Na,1,2);

eval(['load ',FileNameLoadStart,'m2'])

H2=Hxy(1:Na,1,2);

H12=H2./H1;

f = f(1:Na)';

k=f*2*pi/c;

R=-exp(j*2*k*La).*((H12-exp(-j*k*as))./(H12-exp(j*k*as)));

alpha=1-abs(R).^2;

figure ('Name','Reflection','NumberTitle','off')
plot(f,alpha)
axis([40 3000 -.5 1.5])
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Alpha (-)')
%Z=rho*c*(1+R)./(1-R);

Z=(1+R)./(1-R);

figure
plot(f,real(Z),f,imag(Z));
legend('real(Z)','imag(Z)')
axis([40 f(end) -3 3])
grid

%% averaging absorption values in frequency bands
%% 1/3-octave bands; lower limit and upper limit
fc_nominal = [25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150]';
Nters = numel(fc_nominal);
fc_numerical = 1000*10.^(((1:Nters)-17)/10);
ftersL=fc_numerical/(2^(1/6));
ftersU=fc_numerical*2^(1/6);
```

```

alpha_thirds = zeros(1,Nters);
for n = 1:Nters
    ii = find(ftersL(n) <= f & f < ftersU(n))
    alpha_thirds(n) = mean(alpha(ii));
    %pause

end

figure
semilogx(fc_nominal,alpha_thirds)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Absorption coefficient (-)')
axis([25 3150 0 1.5])

%% octave bands; lower limit and upper limit
fc_nominal = [25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150]';
Nters = numel(fc_nominal);
fc_numerical = 1000*10.^(((1:Nters)'-17)/10);
fc_numerical = fc_numerical(2:3:end);
ftersL=fc_numerical/(2^(1/2));
ftersU=fc_numerical*2^(1/2);
Noct = numel(fc_numerical);
alpha_octave = zeros(1,Noct);
for n = 1:Noct
    ii = find(ftersL(n) <= f & f < ftersU(n));
    alpha_octave(n) = mean(alpha(ii));
    %pause

end

figure
semilogx(fc_nominal(2:3:end),alpha_octave)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Absorption coefficient (-)')
axis([25 3150 0 1.5])

%% Estimate diffuse field absorption

% Angle of incidence
dfi_deg = .1;

dfi_rad = dfi_deg*pi/180;

fivec_deg = dfi_deg/2:dfi_deg:90;
fivec = fivec_deg*pi/180;

Nfi = numel(fivec);

Nf = numel(f)
alpha_stat = zeros(Nf,1);

abscoeff_big_mat = zeros(Nf,Nfi);

```

```

% Loop over angles, finding R_angular and then abs_coeff as fcn of both angle and frequency
for nfi = 1:Nfi
    fi = fivec(nfi);
    cosfi = cos(fi);

    R_angular = (Zn*cosfi - 1) ./ (Zn*cosfi + 1); % R_angular: for all frequencies, for single angle fi
    abs_coeff = 1 - abs(R_angular).^2;

    abscoeff_big_mat(:,nfi) = abs_coeff;
end

% Loop over frequencies, finding alpha_stat for each frequency via integration over diffuse field angles
sinfivec = sin(fivec);
cosfivec = cos(fivec);
for nf = 1:Nf
    alphavec = abscoeff_big_mat(nf,:);
    alpha_stat(nf) = 2*sum(alphavec.*sinfivec.*cosfivec)*dfi_rad;
end
%%
figure
semilogx(f,alpha_stat)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Diffuse field absorption coeff. (-)')
axis([0 5000, -1 2])
%%
save alpha_stat_H_concrete_ref alpha_stat f

%% averageing absorption values in frequency bands
%% 1/3-octave bands; lower limit and upper limit
fc_nominal = [25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150]';
Nters = numel(fc_nominal);
fc_numerical = 1000*10.^(((1:Nters)'-17)/10);
ftersL=fc_numerical/(2^(1/6));
ftersU=fc_numerical*2^(1/6);

alpha_stat_thirds = zeros(1,Nters);
for n = 1:Nters
    ii = find(ftersL(n) <= f & f < ftersU(n))
    alpha_stat_thirds(n) = mean(alpha_stat(ii));
    %pause
end

figure
semilogx(fc_nominal,alpha_stat_thirds)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Absorption coefficient (-)')
axis([25 3150 0 1.5])

%eval(['save ',FileNameSave])

%% octave bands; lower limit and upper limit

```

```

fc_nominal = [25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150]';
fc_nominal_ters = fc_nominal;

```

```

Nters = numel(fc_nominal);
fc_numerical = 1000*10.^(((1:Nters)'-17)/10);
fc_numerical = fc_numerical(2:3:end);
ftersL=fc_numerical/(2^(1/2));
ftersU=fc_numerical*2^(1/2);
Noct = numel(fc_numerical);
alpha_stat_octave = zeros(1,Noct);
for n = 1:Noct
    ii = find(ftersL(n) <= fc_nominal_ters & fc_nominal_ters < ftersU(n));
    alpha_stat_octave(n) = mean(alpha_stat_thirds(ii));
    %pause

```

```

end

```

```

figure
semilogx(fc_nominal(2:3:end),alpha_stat_octave)
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('Absorption coefficient (-)')
axis([25 3150 0 1.5])

```

```

%%
fc_nominal(2:3:end)'
alpha_tmp = [alpha_stat_octave alpha_stat_thirds(end)]

```

10 Referenser

- Boverket. (2008). Bullerskydd i bostäder och lokaler. Hämtad 7 april 2023, från: https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2008/bullerskydd_i_bostader_och_lokaler.pdf
- Boverket. (2021). Buller beror på många faktorer. Hämtad 7 april 2023, från: <https://www.boverket.se/sv/samhallsplanering/sa-planeras-sverige/planeringsfragor/information-om-buller-och-goda-ljudmiljoer/buller-beror-manga/>
- Boverket. (2023). Klimatdeklaration - Klimatdatabasen. Hämtad 7 april 2023, från: <https://www.boverket.se/sv/klimatdeklaration/klimatdatabas/klimatdatabas/GetResourceByCategoryID/>
- Folkhälsomyndigheten. (2022). Buller - tillsynsvägledning för hälso- och miljöskydd. Hämtad 7 april 2023, från: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/livsvillkor-levnadsvanor/miljohalsa-och-halsoskydd/tillsynsvagledning-halsoskydd/buller/>
- Forssén, J. (2022). Compendium - Introduction to building acoustics. Chalmers University of technology
- HeidelbergCement. (2021). Nya cementrecept för minskad klimatpåverkan. Hämtad 7 april 2023, från: <https://www.cement.heidelbergmaterials.se/sv/nya-cementrecept-for-minskad-klimatpaverkan>
- HeidelbergCement. (2021-03). TiOmix – För bättre luft och renare fasader – Betongtillsatsmaterial för reduktion av luftföroreningar och organiska ämnen. Hämtad 7 april 2023, från: <https://www.dahlgrenscement.se/wp-content/uploads/2021/03/traulit.pdf>
- Naturskyddsföreningen. (2021). Cement, klimat och miljö. Hämtad 7 april 2023, från: <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/cement-klimat-och-miljo/>
- P. Höstmad, W. Kropp. (2017). Wave motion. Chalmers University of technology
- SIS. (1997). Ljudisolering - Mätning av ljudisolering i byggnader och av byggnadsdelar (Standard No. ISO 11654:1997). Hämtad 16 februari från: https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/skydd-av-och-i-byggnader/akustik-i-byggnader-ljudisolering/ssenis011654/?\ t _id=DelZti0\ TNmRCaV DaQSZag&\ t _q=11654:1997&\ t _hit.id=SIS\ se\ site\ Features\ Product\ Catalogs\ StandardProduct\ CatalogContent\ f4ba5209-af25-45f1-bddb-e2489c18d0fd\ sv&\ t _hit.pos=1&\ t _tags=andquerymatch,language:sv,siteid:326c3465-4f01-4d81-93c2-166392ce4789

- SIS. (1998). Akustik - Bestämning av ljudabsorptionsfaktor och impedans i impedansrör - Del 2: Metod med överföringsfunktion (Standard No. ISO 10534-2:1998). Hämtad 16 februari från:
https://www.sis.se/produkter/metrologi-och-matning-fysikaliska-fenomen/akustik-och-bullermatning/allmant/sseniso105342/?_t_id=OP947sO8RvGbAwrBx3btKw&_t_q=SS-EN+ISO+10534-2&_t_hit.id=SIS_se_site_Features_Product_Catalogs_StandardProduct/CatalogContent_2987aadb-8664-40f4-8f09-1ccf2d87e294_sv&_t_hit.pos=1&_t_tags=andquerymatch,language:sv,siteid:326c3465-4f01-4d81-93c2-166392ce4789
- SIS. (2005). Betongprovning - Hårdnad betong - Tryckhållfasthet - Omräkningsfaktorer (Standard No. SS 137207:2005). Hämtad 19 februari från:
https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/betong-och-betongprodukter/ss1372072005/?_t_id=h8sT-UErSpmDZ2Nxc9zleQ&_t_q=SS-EN+12390-3&_t_hit.id=SIS_se_site_Features_Product_Catalogs_StandardProduct/CatalogContent_e6501061-853a-41fd-a187-0cb53fe7bb4c_sv&_t_hit.pos=2&_t_tags=andquerymatch,language:sv,siteid:326c3465-4f01-4d81-93c2-166392ce4789
- SIS. (2016). Buller orsakat av transportmedel - Mätning av hörselburen ljudnivå - Del 5: Järnvägstrafik (Standard No. SS-EN 1793-5:2016). Hämtad 16 februari från:
<https://www.sis.se/produkter/metrologi-och-matning-fysikaliska-fenomen/akustik-och-bullermatning/buller-fororsakat-av-transportmedel/ssen179352016/>
- SIS. (2021). Betong och betongprodukter - Bedömning av hållfasthet, täthet och dimensioner (Standard No. SS 137003:2021). Hämtad 16 februari från:
https://www.sis.se/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/betong-och-betongprodukter/ss-13700320212/?_t_id=le79-ME2TKGzaW1HxZ_P4w&_t_q=SS+137003:2021&_t_hit.id=SIS_se_site_Features_Product_Catalogs_StandardProduct/CatalogContent_db0d370b-d837-4833-af04-02b9ed1acd9d_sv&_t_hit.pos=1&_t_tags=andquerymatch,language:sv,siteid:326c3465-4f01-4d81-93c2-166392ce4789
- Vigran, T. E. (2008). *Building Acoustics* (1st ed.). Taylor & Francis Group.