



CHALMERS



Materials lämplighet för bullerskärmskonstruktioner

En jämförelse med avseende på ljudreduktion,
kostnader och miljöaspekter

Kandidatarbete inom Byggnadsteknologi

Björk Tocaj, Caroline
Hellberg, Anton
Petersson, Axel
Toller, Erik

Materials lämplighet för bullerskärmkonstruktioner
En jämförelse med avseende på ljudreduktion, kostnader och miljöaspekter
CAROLINE BJÖRK TOCAJ
ANTON HELLBERG
AXEL PETERSSON
ERIK TOLLER

© CAROLINE BJÖRK TOCAJ, ANTON HELLBERG, AXEL PETERSSON, ERIK TOLLER, 2015.

Institutionen för Bygg- och miljöteknik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sweden
Telephone + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
[Undersökningsobjekt (2,3,4,5) vid fältmätningar.]

Göteborg, Sverige 2015

Förord

Följande kandidatarbete är utfört vid institutionen bygg- och miljöteknik, med handledare Ingemar Segerholm, på Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet är utfört i samråd med Trafikverket och ett speciellt tack riktas till Maria Persson, på avdelning Underhåll i Göteborg, för hjälp under arbetets gång. Vidare vill vi tacka Jens Forssén, Patrik Höstmad och Börje Wijk, vid institutionen för Teknisk Akustik, för hjälp med beräkningar, mätningar och stöd i arbetets akustiska delar.

Sammandrag

Bullerstörningar är ett allvarligt problem kopplat till vägtrafik. Trafikverket, som väghållare, åligger att skydda kringliggande miljöer från buller. Där extra åtgärder behövs är bullerskärmar en lösning.

Denna undersökning behandlar utformning av bullerskärmar samt dess ljudreducerande egenskaper. I studien jämförs olika material med avseende på deras ljudreducerande förmåga, kostnader samt miljöaspekter för att avgöra vilka material som är lämpade för bullerskärmskonstruktioner.

För att utvärdera olika material har egenskaper tagits fram ur litteraturstudier och fältmätningar har utförts på specifika skärmar. De undersökta materialen är trä, glas, tegel och fibercementskivor. I fältundersökningarna har ljudnivåerna på respektive sida om skärmarna mätts upp och den ljudreducerande förmågan beräknats som differensen mellan sidorna. Resultaten har utvärderats genom ett antal multikriterieanalyser och sedan jämförts med varandra.

Litteraturstudien visar att effektiviteten hos bullerskärmar bl.a. påverkas av skärmens material, dimensioner, täthet samt avstånd från ljudkälla till skärm. Undersökningarna visar även att skärmarna bör placeras så nära ljudkällan som möjligt, konstrueras så det inte finns några håligheter och av ett material med hög ytvikt och högt ljudreduktionstal.

Fältmätningarna visar att det finns stora skillnader mellan materialen. Glas och tegel har bäst ljudreducerande förmåga vilket troligen beror på en högre densitet och ytvikt jämfört med fibercementskivor och trä. Kostnadsanalysen visar däremot att trä är det billigaste materialet tätt följt av fibercementskivor. Tegel är billigare än glas men båda materialen är betydligt dyrare än de förstnämnda. Varje material tilldelades en ekologisk faktor beräknad ur multikriterieanalysen. Denna faktor visar att tegel är det mest miljövänliga materialet utifrån de valda parametrarna. Övriga material bedöms relativt likvärdiga.

Den slutgiltiga analysen väger samman materialens ljudreduktion, kostnader och miljöpåverkan. Ljudreduktionen har bedömts dubbelt så viktig som de övriga parametrarna och har därför viktats för att ge större påverkan på resultatet. Detta innebär att den slutliga fördelningen av materialens lämplighet för bullerskärmskonstruktioner är tegel, trä, fibercementskivor och glas. Det är då viktigt att ha i åtanke att alla byggnationer av bullerskärmar skiljer sig åt och att olika aspekter varierar i betydelse. För att välja rätt material krävs det därför att alla parametrar vägs in i valet.

Abstract

Community noise is a serious problem connected to road traffic. The Swedish Transport Administration are obliged to protect the environment close to the roads from noise. Where there is a need for extra measures, noise barriers are used as a solution.

This study includes a comparison between different materials in order to decide which materials are suitable for construction of noise barriers. The comparison is executed with regard to the sound reduction of the materials, expenses for constructing the barrier and environmental aspects.

Measurements in field have been carried out to evaluate specific barriers of the materials timber, glass, fibre cement boards and brick. The field study has been conducted by measuring the sound pressure level on both sides of the barrier and the specific sound reduction from each barrier has been calculated as the difference in sound pressure level on both sides of the barrier. Multiple-criteria decision analyses have been executed in order to evaluate the results.

The literature study concludes that the efficiency of noise barriers is affected by a number of factors. According to the study, the barrier should be placed as close as possible to the sound source, it should be constructed well with no gaps and of a material with high unit weight and density as well as a high sound reduction index.

The results of the field measurements show that there are notable differences between the materials. The sound reduction is higher for glass and brick than for fibre cement boards and timber. Timber and fibre cement boards are much cheaper than brick and glass which indicates a correlation between cost and sound reduction. The multiple-criteria decision analysis of the environmental aspects imply that brick is the material with the lowest effects on the environment whereas the other materials are equal.

In the final analysis the sound reduction, costs and environmental aspects of the materials have been weighed together in order to create a final factor corresponding to each material. The final evaluation shows that brick is the most suitable material for constructing a noise barrier followed by timber, fibre cement boards and glass. Conclusively it's important to take into account that every noise barrier is unique and that different aspects varies in importance.

Variabelförteckning

a	= avståndet till vägkant längs normalen [m]
b	= halva avståndet mellan de yttre gränserna för de yttre körfälten [m]
d	= längsta sträckan till vägs slut [m]
G	= gradienten för vägen [%]
h_b	= vägens höjd relativt det reflekterade planet [m]
h_m	= höjden för mottagaren i förhållande till det reflekterade planet [m]
L_{Aeq}	= A-viktade ljudtrycksnivå [dB]
$L_{A,eq24h}$	= ekvivalent A-viktad ljudtrycksnivå under 24 timmar [dB]
L_p	= ljudtrycket [dB]
$L_{p,eq}$	= ekvivalenta ljudtrycksnivå [dB]
L_{pi}	= ljudtrycksnivå för varje tryckskillnad [dB]
L_{pshift}	= kalibrationsfaktor [dB]
L_R	= ljudnivå på mottagarsidan [dB]
L_S	= ljudnivå på den sidan där källan är belägen [dB]
N_{heavy}	= tunga fordon [st]
N_{light}	= antalet lätta fordon [st]
n	= antalet element i ljudtrycksnivåvektorn [st]
p	= ljudtryck [Pa]
p_A	= A-viktade ljudtrycket [Pa]
p_{ref}	= referenstrycket [Pa]
p_{rms}	= tryckskillnaden [Pa]
R	= ljudreduktionstal [dB]
R'	= ljudreduktionstal uppmätt i fält [dB]
s	= voltsignal [V]
T	= mättiden [s]
v	= hastighet [km/h]
W_{in}	= ursprungsljudkraft [W]
W_{tr}	= transmitterad ljudkraft [W]
α	= vinkeln för vilken vägen undersöks [°]

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och problemställning	1
1.3	Mål	1
1.4	Avgränsningar	1
2	Akustik	3
2.1	Definitioner	3
2.2	Ljudets utbredning i luft	4
2.3	Buller	4
2.3.1	Bullers effekt på hälsan	5
2.3.2	Kravspecifikationer och riktlinjer	5
2.3.3	Nordic Prediction Method	5
3	Bullerskärmar	7
3.1	Utformning	7
3.2	Grundläggning	7
3.3	Effektivitet	7
3.3.1	Skärmens dimensioner	8
3.3.2	Avstånd från källa till skärm	8
3.3.3	Materialparametrar	9
3.3.4	Täthet	10
3.3.5	Underhåll	10
4	Konstruktionsmaterial	13
4.1	Träkonstruktioner	13
4.1.1	Materialegenskaper	13
4.1.2	Beständighet hos utomhuskonstruktioner	13
4.1.3	Underhåll och kostnader	14
4.1.4	Miljö och hållbarhet	14
4.2	Glaskonstruktioner	14
4.2.1	Materialegenskaper	15
4.2.2	Underhåll och kostnader	15
4.2.3	Miljö och hållbarhet	15
4.3	Konstruktioner av cementbundna fiberskivor	15
4.3.1	Materialegenskaper	16
4.3.2	Underhåll och kostnader	16
4.3.3	Miljö och hållbarhet	16
4.4	Tegelkonstruktioner	16
4.4.1	Materialegenskaper	17
4.4.2	Underhåll och kostnader	17
4.4.3	Miljö och hållbarhet	17
4.5	Material i förhållande till varandra	17

4.5.1	Livscykelanalys för material	18
5	Metod	19
5.1	Fältundersökning	19
5.2	Beräkningar och analys av inspelningar	19
5.3	Beräkning av ljudtrycksnivå enligt Nordic Prediction Method	21
5.4	Multikriterieanalyser	21
6	Undersökningsobjekt	23
6.1	Bullerskärm 1	24
6.2	Bullerskärm 2	25
6.3	Bullerskärm 3	26
6.4	Bullerskärm 4	27
6.5	Bullerskärm 5	28
7	Resultat	29
7.1	Ljudreduktion	29
7.1.1	Hålligheters och springors inverkan på ljudreduktionen	30
7.2	Beräknade ljudtrycksnivåer	30
7.3	Kostnadsanalys	30
7.4	Multikriterieanalys av miljöpåverkan	32
7.5	Slutlig analys	33
7.6	Utformning	33
8	Diskussion	35
8.1	Ljudreduktion	35
8.2	Kostnader	36
8.3	Miljö och hållbarhet	36
8.4	Utformning	37
8.5	Fältmätningar och analys	38
8.5.1	Multikriterieanalys	39
8.6	Rekommendation för fortsatt analys	40
9	Slutsats och rekommendationer	41
	Referenser	43
	Bilagor	i
A	Nordic Prediction Method	i
B	Kostnadsberäkningar	v
C	Resultat fältmätningar	vii
D	Matlab-skript	ix

Figurer

3.1	Skillnad för ljudets vägsträcka beroende på bullerskärmen höjd	8
3.2	Skärm placerad nära ljudkälla med stor brytningsvinkel	9
3.3	Skärm placerad längre från ljudkälla med liten brytningsvinkel	9
5.1	Isolering av mätresultat vid avvikelser	20
6.1	Karta över respektive skärms geografiska placering (Google Maps, 2015)	23
6.2	Träskärm längs väg 158 södergående riktning, vid Askims stationsväg	24
6.3	Träskärm längs väg 158 södergående riktning, vid Hovåsmotet	25
6.4	Glasskärm längs E20 västergående riktning, vid Partillemotet	26
6.5	Skärm av fibercementskivor längs söderleden västergående riktning, vid Årbro- motet	27
6.6	Tegelskärm längs Övådersgatan, avfart från Lundbyleden	28

Tabeller

4.1	Sammanfattande tabell över materialegenskaper	18
5.1	Indikatorer för multikriterieanalys	21
5.2	Metod för slutlig multikriterieanalys	22
6.1	Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 1 .	24
6.2	Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 2 .	25
6.3	Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 3 .	26
6.4	Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 4 .	27
6.5	Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 5 .	28
7.1	Ljudreduktion uppmätt i fält	29
7.2	Ljudreducerande materialegenskaper	29
7.3	Multikriterieanalys - normaliserad ljudreduktion	29
7.4	Hålligheters och springors inverkan på ljudreduktionen	30
7.5	Beräknade ekvivalenta ljudtrycksnivåer för de olika fallen enligt Nordic Prediction method	30
7.6	Multikriterieanalys - kostnader	32
7.7	Multikriterieanalys - miljöpåverkan	32
7.8	Multikriterieanalys - normaliserad miljöpåverkan	33
7.9	Multikriterieanalys - sammanvägda faktorer	33
7.10	Faktorer för utformning	34

1 Inledning

Denna studie ämnar att jämföra olika material som vanligen används för konstruktion av bullerskärmar. Undersökningen behandlar faktorer för utformning av bullerskärmar samt ljudreducerande egenskaper, kostnader och miljöaspekter kopplade till de undersökta materialen.

1.1 Bakgrund

Buller är ett växande folkhälsoproblem som leder till försämrad livskvalité och skapar negativa hälsoeffekter (Naturvårdsverket, 2014). Enligt miljö kvalitetsnormen som infördes år 2004 ska det eftersträvas att buller inte medför skadliga effekter på människors hälsa. För att säkerställa detta krävs att de som är ansvariga för bullrande verksamheter agerar för att sänka nuvarande bullernivåer.

Trafikverket äger och förvaltar stora delar av det svenska vägnätet och en del av deras åtaganden är att skydda kringliggande miljö från buller. Vid platser där extra åtgärder har behövts är bullerskärmar en lösning. Skärmarna längs Trafikverkets vägar har olika utformning och effektivitet. Ett åtagande för Trafikverket är att leda ett nationellt projekt för att minska buller längs statliga vägar och järnvägar (Trafikverket, 2012). Strategin för detta är att först minska buller från vägar och järnvägar, men också att göra bullerskyddande åtgärder vid sidan av vägen. Från Trafikverkets sida finns det ett önskemål om att ur ett livscykelperspektiv kartlägga hur bullerskärmars verkningsgrad påverkas av olika faktorer.

1.2 Syfte och problemställning

Syftet med följande undersökning är att jämföra bullerskärmar av olika material för att avgöra vilka material som är väl lämpade att använda samt att kartlägga hur bullerskärmar bör utformas med avseende på effektivitet. Lämplighet bedöms med avseende på materialens ljudreducerande förmåga samt miljö- och kostnadsaspekter kopplade till materialen.

Studien behandlar således utformning av bullerskärmar samt ljudreducerande egenskaper, kostnader och miljöaspekter som är relaterade till materialen trä, glas, fibercement och tegel.

1.3 Mål

Målen med rapporten är att presentera förslag på vilka material Trafikverket bör använda för bullerskärmskonstruktioner samt riktlinjer för hur skärmarna bör utformas och placeras för att uppnå effektiv ljudreduktion.

1.4 Avgränsningar

Konstruktionsmaterialen som har undersökts är några av de vanligaste materialen för bullerskärmar; trä, glas, tegel samt fibercementskivor. Fältmätningarna som ligger till grund för rapporten har utförts på skärmar som är belägna längs vägtyp 1, storstadsvägar, och har endast utförts vid ett tillfälle. Detta då arbete vid väg inte får utföras om inte vägarna spärras av vilket medför att en entreprenör måste tillhandahålla TMA-skydd¹ vilket i sin tur innebär kostnader för Trafikverket. Alla fältmätningar har utförts på skärmar placerade i

¹TMA-skydd, Truck Mounted Attenuator, är skydd som ställs upp vid vägapspärningar för att förhindra allvarliga personskador

Göteborgs närområde. Mätningarna och beräkningar har utförts enligt befintliga standarder och SI-enheter. Den visuella inspektionen av skärmarna är baserad på parametrarna slitage, konstruktionstyp och miljö.

Kostnadsberäkningarna är baserade på prisuppgifter för de olika materialen hämtade från samma återförsäljare. Prisen är således inte specifika för bullerskärmkonstruktioner utan gäller generellt för de undersökta materialen. Det är enbart kostnader för materialen trä, fibercementskivor, glas och tegel som är inkluderade, således har ingen hänsyn tagits till att bullerskärmar ofta består av flera olika material. Utöver materialkostnader har grundläggnings-, underhålls- och reparationskostnader inkluderats i kostnadsanalysen.

Värden för indikatorerna som ingår i miljöanalysen är hämtade ur en specifik källa. Datan är således inte anpassad för bullerskärmkonstruktioner utan gäller generellt för materialen och inkluderar all användning. Vad gäller fibercementskivor är motsvarande data hämtad från en återförsäljares hemsida.

2 Akustik

Ljud är vågor i luften vilka uppkommer av små påtvingade tryckskillnader som överförs till gaser, vätska eller fasta material (Andersson och Kropp, 2015a). Detta kallas för ljudtryck [Pa] och kan ses som skillnaden mellan det totala trycket och det statiska trycket. Det statiska trycket ligger normalt i storleksordningen 10^5 Pa medan det mänskliga örat kan höra skillnader i ljudtryck på $20 \mu\text{Pa}$.

2.1 Definitioner

Följande definitioner är baserade på material skrivet av Andersson och Kropp (2015a) som arbetar på avdelningen för tillämpad akustik vid Chalmers Tekniska Högskola.

Ljudtrycksnivå

Om ljudtrycket dubblas innebär inte det att ljudet uppfattas som dubbelt så starkt. Eftersom att örat inte tolkar ljud linjärt finns en logaritmisk ekvation som beskriver ljudtrycket

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) \quad (2.1)$$

där p_{rms} är tryckskillnaden och p_{ref} är referenstrycket vilket ofta är detsamma som hörseltröskeln. Ekvationen beräknar ljudtrycksnivån och tar hänsyn till att örat kan uppfatta förhållandevis små tryckskillnader samt förhållandet mellan den totala tryckskillnaden och den lägsta nivån som örat kan uppfatta. Ljudtryck mäts i decibel och betecknas [dB ref. $20 \mu\text{Pa}$] eller förenklat [dB] där 0 dB är den lägsta hörbara nivån för människan.

Frekvens

Frekvensen för ett visst ljudtryck är antalet svängningar per sekund och mäts i enheten Hertz [Hz]. Ju fler svängningar desto högre frekvens. Det mänskliga örat kan tolka ljud från frekvenser mellan ungefär 20 och 20 000 Hz.

A-viktad ljudtrycksnivå

På grund av att örat inte uppfattar ljud av olika frekvenser på samma sätt väljs ofta ett viktat filter som anpassar verklig ljudtrycksnivå till den relativa nivå örat tolkar. Det vanligaste filtret som används är A-viktning, dB(A), som sänker ljudtrycksnivån för frekvenser under 1 kHz och över 6 kHz. Dessutom höjer A-filtret den upplevda ljudtrycksnivån för frekvenser inom detta intervall eftersom örat uppfattar dessa frekvenser bättre.

Ekvivalent ljudtrycksnivå

Ljudtrycket varierar oftast konstant upp och ner och därför mäts ljud över tid. För att få en bättre uppskattning av den upplevda ljudtrycksnivån under tid används därför den ekvivalenta ljudtrycksnivån, $L_{p,eq}$ som beräknas enligt

$$L_{p,eq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{pi}/10} \right). \quad (2.2)$$

där n är antalet element i ljudtrycksnivåvektorn och L_{pi} är ljudtrycksnivån för varje tryckskillnad.

Ljudreduktionstal

Ljudreduktionstalet är ett mått i dB för ljudisoleringen hos ett system (Andersson och Kropp, 2015b). Detta definieras enligt

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{W_{in}}{W_{tr}} \right) \quad (2.3)$$

där W_{in} (*incident*) är ursprungsljudkraft och W_{tr} (*transmitted*) är transmitterad ljudkraft. För ljudreduktionstal uppmätta i fält används ett prim som indikator R' . Enligt Andersson och Kropp (2015b) bestäms R' uppmätt i fält som

$$R' = L_S - L_R \quad (2.4)$$

där L_S är ljudnivån på den sidan där källan är belägen och L_R är ljudnivån på motsatt sida.

2.2 Ljudets utbredning i luft

Ljud utbreder sig i luften, eller andra fluider, som longitudinella vågor där oscillationer sker i samma färdriktning som vågen utbreder sig i (Andersson och Kropp, 2015a). Denna utbredning sker antingen som en sfär eller en cylinder, beroende på källan och vilka antaganden som gjorts (Andersson och Kropp, 2015c). När ljudet utbreder sig utomhus kan det reflekteras, dvs. ändra färdriktning, på grund av en temperaturgradient eller en vindgradient.

En vindgradient syftar till hur vindhastigheten varierar med höjden. Vindhastigheten vid mark antas enligt Andersson och Kropp (2015c) vara noll. Ljudhastigheten kan öka eller minska med vindhastigheten, beroende på om det är med- eller motvind. När ljudet utsätts för en medvind ökar ljudhastigheten vilket ger upphov till att ljudvågen böjer tillbaka ned mot marken. Om ljudet utsätts för en motvind kommer ljudvågen att böja uppåt istället.

Temperaturgradienten kan antingen öka eller minska i höjdriktning. Under normala förhållanden minskar temperaturen med höjden vilket innebär att den varmare luften skapar en så kallad ljudtunnel. Detta skapar ett lager mot den kallare luften där ljudet kan reflekteras. Om temperaturen ökar med höjden ger detta upphov till att även ljudhastigheten ökar vilket skapar liknande effekt som om ljudet hade utsatts för medvind.

Ljudet kan även utsättas för turbulens i luften, där turbulens är slumpmässiga variationer av vindhastigheten (Andersson och Kropp, 2015c). Dessa variationer ger upphov till att ljudhastigheten varierar i ljudvågen. Ljudvågen delas då upp och vissa delar böjer ned mot marken medan andra fortsätter i ljudvågens ursprungliga riktning.

2.3 Buller

Buller har ingen fysikalisk skillnad från ljud utan definieras som oönskat ljud (Berglund et al., 1999). Begreppet samhällsbuller definieras som buller från alla källor utom buller från industriella arbetsplatser. En av de huvudsakliga källorna till samhällsbuller är bil- och järnvägstrafik. Studien som Berglund utfört visar på att 40% av befolkningen inom den Europeiska Unionen är utsatta för ljudtrycksnivåer som överskrider riktvärdet på 55 dB(A) under dagtid och 20% är utsatta för ljudtrycksnivåer över 65 dB(A). Den främsta källan till dessa ljudtrycksnivåer

är vägtrafiken. De ökade bullernivåerna är ett växande problem och andelen utsatta fortsätter att öka.

2.3.1 Bullers effekt på hälsan

Bullers påverkan på hälsan delas in av Världshälsoorganisationen, WHO, (Berglund et al., 1999) i sex olika grupper:

1. bullerrelaterad hörselnedsättning
2. störning av tal och kommunikation
3. störning av vila och sömn
4. psykofysiologiska effekter, mentala hälsoeffekter och prestationseffekter
5. effekter på boenderelaterat beteende och irritation
6. störning av den avsedda verksamheten

Alla dessa grupper har olika riktlinjer för vad som kan anses rimligt för hälsan. De riktvärden som WHO använder är av formen ekvivalent A-viktad ljudtrycksnivå under 24 timmar, $L_{A,eq24h}$.

2.3.2 Kravspecifikationer och riktlinjer

Generellt gäller att den som skapar bullret är ansvarig för att riktvärdena efterföljs (Boverket, 2014). Detta medför att Trafikverket, som väghållare, är ansvariga för eventuella störningar. Eventuella krav på bullerskyddsåtgärder riktas således mot väghållaren och det är på samma grunder innehavaren som kan bli ersättningsskyldig på grund av störningen (Åkerlöf och Byman, 1999).

Vid nyanläggning av vägar där bulleråtgärder finns angivna i arbetsplanen måste dessa utföras samtidigt som planen genomförs. För befintliga vägar är det svårare att avgöra när bulleråtgärder måste vidtas. Infrastrukturpropositionen som godkändes av regeringen 1996 specificerar dock några gränser för vägtrafikbuller (Åkerlöf och Byman, 1999). Åtgärder bör, enligt denna, vidtas då den A-viktade ekvivalentnivån för befintliga bostäder överstiger 65 dB(A).

2.3.3 Nordic Prediction Method

Vid beräkningar av ljudtrycksnivåer genererade från en väg används Nordic Prediction Method som standard enligt Vägar och gators utformning, VGU (Vägverket, 2004). Denna metod används för beräkningar av buller vid vägar och för att förutspå en A-viktad ekvivalent och maximal ljudtrycksnivå (The Nordic Council of Ministers, 1996). Beräkningar enligt denna metod anses vara pålitliga upp till 300 m från källan längs normalen med vindstyrkor mellan 0 och 3 m/s samt normal temperaturgradient.

För beräkning av den ekvivalenta A-viktade ljudtrycksnivån L_{Aeq} krävs ingående parametrar: trafikflöde, andel tung trafik, fordonens hastighet, avstånd från referenspunkt till vägens mittlinje, vägens höjdläge relativt omgivningen, plats och höjd för skärmen, skärmens tjocklek, omkringliggande marks yta och referenspunktens position.

Om bullerskärmen är omgiven av vegetation så kan detta ha en inverkan på ljudutbredningen. Enligt Nordic Prediction Method ger en tät vegetation på ett djup av mer än 5 meter en minskning med 2 dB av den totala ljudtrycksnivån. Om djupet är större än 50 meter är minskningen mellan 3 till 6 dB.

3 Bullerskärmar

Bullerskärmar, eller bullerbarriärer, är konstruktioner som bryter siktlinjen mellan en ljudkälla och en mottagare (Raichel, 2006). Om ljudet når mottagaren via en indirekt väg, över skärmen, kommer ljudnivån bli lägre än om ljudet hade färdats direkt till mottagare. Den effektiva insättningsdämpningen, dvs. skillnaden mellan ljudnivån före och efter att skärmen är konstruerad, som kan fås av en bullerskärm är mellan 5-12 dB medan ljudreduktionstalet kan vara betydligt högre (Daigle, 1999).

3.1 Utformning

Bullerskärmar måste utformas med hänsyn till trafiksäkerhet och bör således utformas som en del av miljön i landskapet runt vägen (Träguiden, 2006b). Det är viktigt att långa skärmar varierar i utseende och avstånd från vägen för att skärmarna inte ska vara för enformiga och på så sätt bidra till ökad osäkerhet i trafiken. Ju längre från vägen skärmen ställs desto högre måste den vara för att klara av efterfrågad ljuddämpning.

3.2 Grundläggning

Grundläggning av en skärm utgörs vanligtvis av betongplintar eller någon form av pålar (Nordicwood, 1998). Vid val av grundläggningsmetod är det viktigt att ta hänsyn till laster, aktuella markförhållanden och övriga lokala förhållanden. Skärmar som byggs i redan bebyggda områden konstrueras med grundläggningsmetoder som stör omgivande mark så lite som möjligt. Enligt Nordicwood (1998) är några av de vanligaste grundläggningsmetoderna plattgrundläggning, förtillverkade betongelement och pålning. Vid plattgrundläggning levereras förtillverkade plattor av armerad betong till byggplatsen. För att kunna ta upp moment och vindlast måste plattorna vara bredare tvärs skärmen än längs skärmen. Förtillverkade betongfundament möjliggör justering av stolpens lutning och är därför lämpade för bullerskärmar. Vid pålning tillverkas pålarna av stål, betong eller trä. Detta anses vara en ekonomisk grundläggningmetod vid bullerskärmar eftersom pålen kan fortsätta ovan mark som en stolpe och på så sätt behövs inga fästdon. Nordicwood (1998) behandlar även risken för tjällyftning på grund av tjälfarlig mark och hur grundläggningen bör utformas med hänsyn till detta. Oftast används därför pålar som förs ned till tjälfrött djup. Den tjälfarliga marken kan även bytas ut mot icke tjälfarlig fyllning eller utformas på sådant sätt att anslutningen klarar tjällyftningen.

3.3 Effektivitet

Ljudets spridning påverkas av vindriktning, vindhastighet, temperatur och relativ fuktighet vilket leder till att bullerskärmars effektivitet kan variera beroende på väderförhållandena (Träguiden, 2006c). Även markens yta i omkringliggande miljö påverkar bullerskärmars effektivitet - om marken består av akustiskt mjuka ytor (t.ex. gräs och snö) blir den totala ljudnivån dämpad men om marken består av akustiskt hårda ytor (t.ex. asfalt) blir den totala ljudnivån förstärkt. Enligt Daigle (1999) finns det flera faktorer som påverkar en bullerskärms effektivitet:

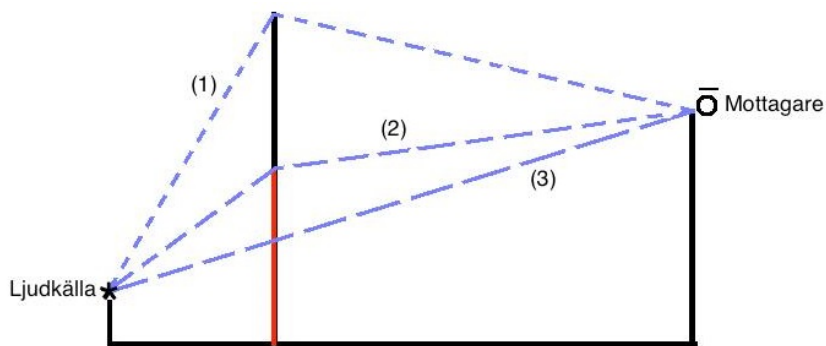
- Skärmens dimensioner
 - Höjd, bredd och längd

- Avstånd från ljudkällan till skärmen
- Skärmens material
 - Transmissionsförluster då ljudet passerar genom skärmen
 - Absorption av ljud
 - Reflektion
- Skärmens täthet

En bullerskärm bör dimensioneras med avseende på vindlast, egentygnd, snölast, last från snöröjning och risken för stenskott (Nordicwood, 1998). Av ovan nämnda faktorer är det oftast vindlasten som blir dimensionerande i horisontalled. I vissa fall kan dock lasten från snöröjning bli den största faktorn, detta om bullerskärmen är placerad mycket nära vägkanten, eftersom snöröjningsmaskiner kastar snön åt sidan. Vanligtvis utgörs de vertikala lasterna enbart av skärmens egentygnd, dessa kan ge upphov till nedböjning om det är långt mellan grundläggningspunkterna. Generellt är det endast bullerskärmar helt eller delvis konstruerade av glas som är känsliga för stenskott.

3.3.1 Skärmens dimensioner

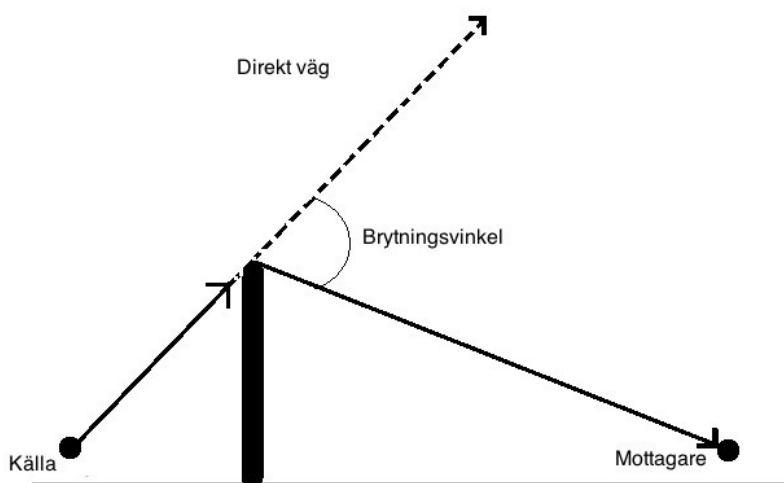
Vid höga bullerskärmar blockeras siktlinjen och ljudet måste färdas en längre sträcka. Ju längre vägskillnaden är, dvs. skillnaden i sträcka för ljudet att transporteras med och utan skärm, desto högre blir dämpningen (Daigle, 1999). I figur 3.1 framgår det att avståndet som ljudet färdas är längre för en hög skärm (1) än för en låg skärm (2) och att den kortaste sträckan uppstår om ingen skärm blockerar siktlinjen (3).



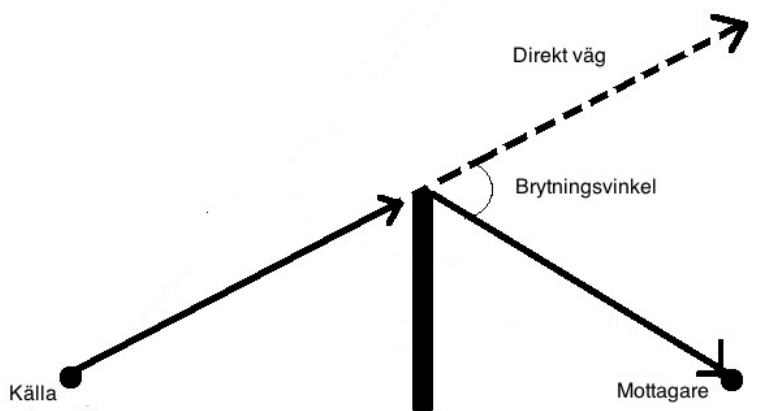
Figur 3.1: Skillnad för ljudets vägsträcka beroende på bullerskärmens höjd

3.3.2 Avstånd från källa till skärm

På samma sätt som att en högre skärm ger längre vägskillnad ger även en skärm som är placerad närmre källan samma resultat. När en skärm placeras mellan en källa och en mottagare bryts ljudets direkta väg av över skärmen vilket innebär att ljudenergin minskar och det bildas en ljudskugga bakom skärmen (Eckard Mommertz, 2008). Ju närmre källan skärmen placeras desto större blir brytningsvinkeln vilket resulterar i en högre insättningsdämpning, se figur 3.2 och 3.3.



Figur 3.2: Skärm placerad nära ljudkälla med stor brytningsvinkel



Figur 3.3: Skärm placerad längre från ljudkälla med liten brytningsvinkel

En annan anledning till att skärmen bör placeras nära källan är att ljudet sprider sig på olika sätt i luften och effekten av atmosfärisk turbulens, vindhastighet och temperaturgradienter blir mindre (Daigle, 1999).

3.3.3 Materialparametrar

Enligt Åkerlöf och Byman (1999) bestäms de ljuddämpande egenskaperna främst av skärmens dimensioner och de enda relevanta materialparametrarna är att skärmen bör ha en ytvikt av minst 15 kg/m^2 och ett ljudreduktionstal som är minst 25 dB. Enligt Raichel (2006) och

Daigle (1999) är dock även materialens reflektions-, absorptions- och transmissionsegenskaper av intresse då ljudvågor som färdas i luft och träffar en skärm.

Transmissionsförluster

Mängden ljudenergi som transmitteras genom en skärm avgörs av materialets impedans, dvs. akustiska motstånd, relativt luften (Raichel, 2006). En skärms ljudisolerande förmåga bestäms därför bland annat av materialets transmissionsförlust och varierar med frekvensen. Detta måste beaktas vid beräkning av insättningsdämpningen eftersom en del av ljudet transmitteras genom skärmen (Daigle, 1999).

Absorption

Absorption innebär att ljudenergi omvandlas till värme och absorberas av materialet. Absorption är en materialbeorende parameter vilket gör det möjligt att styra den ljudabsorberande förmågan genom val av material (Träguiden, 2006c). Det är även möjligt, och vanligt i tätbebyggda områden, att använda skärmar med absorberande yta. Porösa material och material med ojämn ytstruktur absorberar ljud (Statens Vegvesen, 2008). Andra material kan även göras absorberande med hjälp av ytbehandlingar.

Reflektion

När en ljudvåg träffar en kompakt, glatt yta kommer en del av ljudet att reflekteras (Nordicwood, 1998). Detta innebär att ljudet som reflekteras mot en bullerskärm kommer höja ljudnivån på motsatt sida av vägen. Om allt ljud reflekteras innebär det en höjning av ca. 3 dB. I praktiken varierar ljudnivån på grund av interferens, samverkan mellan vågrörelser och ytans reflektionsförmåga. Glatta och hårda material, som t.ex. glas och stål, reflekterar ljud (Statens Vegvesen, 2008). Vid bullerskärmkonstruktioner på enbart en sida av vägen är det då viktigt att notera riktningen på reflektionen så att ljudvågorna inte träffar hus på andra sidan vägen och således bidrar till ökad ljudnivå.

3.3.4 Täthet

Lufthål i form av sprickor eller spalter bidrar till minskad ljudreduktion på mellan 0 - 3 dB (Träguiden, 2006c). Otätheter mellan skärmen och marken, eller mellan skärmen och den bärande konstruktionen, kan halvera bullerdämpningen. För att få god tätning bör därför bullerskärmen föras ned några decimeter under markytan. För att inte riskera att skärmen ruttnar kan anslutningen till marken utformas på olika sätt. Ett sätt är att skärmen motfylls med kapillärbrytande material, t.ex. singel. Det går även att montera en offerplanka mellan skärmen och marken eller bygga den nedre delen av skärmen i ett material som har låg fuktkänlighet t.ex. fibercementskivor eller plåt.

3.3.5 Underhåll

Eftersom underhållet utgör en relativt stor del av kostnaderna för en bullerskärm måste det i tidigt skede finnas en plan över hur och när underhållet ska utföras (Government of the Hong Kong SAR, 2003). Bullerskärmar måste underhållas för att kunna upprätthålla funktion och estetik och underhållsbehoven varierar med konstruktionsmaterialet. Generellt måste en skärm

tvättas, repareras, målas om och ytbehandlas, vegetation runt om skärmen måste klippas och fästdon kan behöva justeras. I planeringen av skärmen måste underhållsbehovet beaktas. Det är viktigt att det finns en plan för hur ofta skärmen måste tvättas för att inte ge ett negativt intryck. Skärmen måste utformas så att den antingen är lättillgänglig för att underhåll ska kunna utföras eller så måste det beaktas att vägar kan behöva stängas av för åtkomlighet vilket medför ytterligare kostnader. Det måste även finnas en plan för hur ofta reparationer bör utföras och för hur ofta vissa delar behöver bytas ut.

4 Konstruktionsmaterial

Det finns flera faktorer som måste beaktas vid val av konstruktionsmaterial för bullerskärmar (RTA, 2006). Det är viktigt att avgöra vilken beständighet materialet måste ha för att klara av befintliga klimatförhållanden och efterfrågad livslängd. Väderförhållandena spelar in i frågan angående hur materialet åldras och konstruktionsmaterialet måste väljas utgående från rådande miljö. Säkerheten måste beaktas i form av hur brandfarligt materialet är eller vilka andra risker som skulle kunna vara kopplade till materialet. Materialets tålighet mot skadegörelse måste beaktas och det måste därför det avgöras hur tillgänglig konstruktionen kommer vara för klotter och annat sabotage. Det är även viktigt att ta hänsyn till kostnader och miljöaspekter.

4.1 Träkonstruktioner

Trä är ett av de vanligaste konstruktionsmaterialen för bullerskärmar (RTA, 2006). Trä är lätt att använda och skärmarna blir formbara på plats vilket ofta är fördelaktigt. De negativa aspekterna med trä är att livslängden är förhållandevis kort, den kan inte förväntas vara högre än 40 år och sannolikt lägre om underhåll inte sker kontinuerligt (Träguiden, 2014). Materialet kan även börja ruttna om det inte underhålls ordentligt och är brandfarligt (RTA, 2006). Trä är bäst lämpat att använda när risken för brand och skadegörelse är relativt låg. Vid bullerskärmkonstruktioner av trä bör träet väljas så att det är beständigt och inte kräver dyra ytbehandlingsåtgärder.

4.1.1 Materialegenskaper

Tryckimpregnerat furu är det vanligaste materialet för bullerskärmar (SP Träteknik, 2011). Trä är ett anisotropt material vilket innebär att det har olika egenskaper i olika riktningar. Trä är starkare parallellt med fibrerna än tvärs fibrerna och styrkan påverkas av densitet, fukt-kvot, belastning samt temperatur. Densiteten hos furu är 470 kg/m^3 . Kärnveden hos furu har högre beständighet mot nedbrytning än splintveden och är således lämplig att använda vid utomhuskonstruktioner, så som bullerskärmar. Det är dock vanligt att tryckimpregnera splintved av furu vilket ökar beständigheten mot angrepp. Ljudreduktionstalet för en enkel träkonstruktion är enligt akustikdatorprogrammet BASTIANs databas omkring 28 dB.

4.1.2 Beständighet hos utomhuskonstruktioner

Generellt för utomhuskonstruktioner av trä gäller att de utsätts för nedbrytning på grund av solen som torkar ut träytan och skapar sprickor samt regnvatten som fyller sprickorna vilket resulterar i att träet sväller (Träguiden, 2006d). Med tiden kan träet även utsättas för rötangrepp vilket bidrar till minskad hållfasthet.

Motståndsförmågan mot angrepp, beständigheten, är olika för olika träslag (Nordicwood, 1998). Vanligtvis gäller att träslag med hög densitet är mer beständiga än träslag med låg densitet. Det är dock viktigt att ha i åtanke att hög densitet hos träslaget inte automatiskt innebär att träkonstruktionen är beständig då konstruktionen dessutom måste ha en god utformning och ett bra skydd. Vid utomhuskonstruktioner av trä finns det tre viktiga moment för att undvika skador (Träguiden, 2006d): Utformning av konstruktionen, skydd av ytan med ytbehandling samt regelbundet underhåll och rengöring. För att uppnå hög beständighet

och långtidsfunktion bör konstruktionen dessutom avskärmas från regn och sol, dränera bort vatten samt konstrueras av beständig träråvara eller kemiskt behandlat trä. Det är även fördelaktigt att undvika trä i direkt kontakt med mark för att slippa stora fuktproblem.

För att skydda träet mot vatten, nedbrytning och erosion samt för att hindra vattenupptagning eller för att ge träet önskvärd färg används ytbehandlingar (Nordicwood, 1998). Det är av stor vikt att alla ytbehandlingar görs på färsk träytta för att förhindra att vatten släpps in i träet men inte ut. Om ytbehandlingar inte används måste konstruktionen utformas på sådant sätt att den inte tar upp fukt och vatten för att träet inte ska ruttna. Det finns flera olika typer av ytbehandlingar för trä. De vanligaste är sådana som motverkar svampangrepp, skyddar mot nedbrytning på grund av solljus och har en vattenavvisande effekt. Ommålning av ytbehandlingar måste ofta ske med några års intervall för att upprätthålla de skyddande egenskaperna och för att skärmarna ska bibehålla sina estetiska kvalitéer.

4.1.3 Underhåll och kostnader

Vid underhållsbesiktningar bör förekomsten av sprickor, deformationer i planket och missfärgande svamp och/eller röta bedömas (Åkerlöf och Byman, 1999). Underhållsbehovet är beroende av läge, klimat och utformning. Trä är ett levande material vilket innebär att det alltid rör på sig. På grund av detta kan det uppkomma underhållsbehov för att åtgärda håligheter. Tätheten måste bevakas och beroende på grundläggningsförhållandena kan det krävas insatser för att säkerställa en tät anslutning mot marken. Ett sätt är, som tidigare nämnt, en offerplanka som är lätt utbytbar. Målning av skärmen är både en underhållsfråga och en estetisk fråga men behöver beaktas i kostnadsberäkningar för underhåll. Klotter är också en aspekt som måste beaktas när det kommer till underhåll, dock är det svårt att förutsäga ommålningsbehoven och de ekonomiska konsekvenserna av klotter. Vegetation i närheten av skärmen måste även underhållas och klippas för att inte skärmen ska missfärgas av växterna (Government of the Hong Kong SAR, 2003).

4.1.4 Miljö och hållbarhet

Trä är ett förnyelsebart material som kan absorbera och lagra koldioxid (Nordicwood, 1998). Utsläpp från tillverkningen är små i jämförelse med andra byggmaterial och den huvudsakliga energikällan är biobränslen. Trä kan återvinnas efter användning, antingen som råvara till nya träprodukter eller som koldioxidneutralt bränsle. Enligt Ashby (2013) är energiåtgången för produktion av trä ca. 8,8 - 9,7 MJ/kg, koldioxidutsläppen vid produktion är 0,36-0,4 kg/kg. Trä har dock en stor vattenåtgång under sin livslängd och det går enligt Ashby (2013) ca. 625 liter vatten per kg trä. Återvinningsfraktionen är relativt låg och ligger på ca. 8-10% (Ashby, 2013).

4.2 Glaskonstruktioner

Glasskärmar har väldigt liten visuell inverkan på omgivningen eftersom de är transparenta, mindre påträngande och smälter in i omgivningen (RTA, 2006). Skärmar av glas används ofta för att skapa ett öppnare intryck, tillåta ljusinsläpp och minska risken för att skärmen ska bli ett visuellt hinder. Glas är dyrare än andra mer konventionella alternativ och bör användas där sikten är extra viktig, t.ex. vid stora korsningar eller vid broar. Vid användning av glas är det viktigt att ha i åtanke att transparensen minskar då skärmen utsätts för avgaser

och blir smutsig. Skärmen bör därför placeras så att naturlig rengöring, i form av regn, kan utnyttjas. En fortsatt viktig aspekt är att det finns risk för bländande reflektioner från solen eller strålkastare. Livslängden för skärmar konstruerade av glas är över 40 år (Hammerglass, 2015).

4.2.1 Materialegenskaper

Enligt Burström (2001) ligger densiteten för glas inom spannet 2200-3000 kg/m³. Enligt Pilkington Floatglas AB (2012) ligger reduktionstalet för glas generellt i intervallet 30 - 50 dB, men det kan ökas om glaset lamineras eller behandlas på annat sätt. För ljudreduktionstalet gäller generellt att det ökar med ökad tjocklek (Pilkington Floatglas AB, 2012). En dubbling av glasets tjocklek skulle teoretiskt betyda en ökning av ljudreduktionstalet med 6 dB för glas. Ljudreduktionstalet beror dock även av frekvensen och är olika i olika frekvensintervall. Om ljudets frekvens sammanfaller med glasets egenfrekvens kommer ljudnivån att öka ju tjockare skivan är, vilket beror på att en tjock skiva är styvare än en tunn skiva och glaset hamnar i större svängningar. För ljudreduktionstalet är det även fördelaktigt att ha dubbla glasrutor eftersom att resonansfrekvensen, dvs. den frekvens där det yttre ljudets frekvens stämmer överens med glasets egensvängningar, i så fall flyttas längre upp i frekvensskalan. Genom att konstruera glasskärmar av olika tjocklek minskar problemet med resonans.

4.2.2 Underhåll och kostnader

Glas har relativt höga underhållsbehov då det lätt fastnar smuts och föroreningar på ytan vilket påverkar transparensen (Government of the Hong Kong SAR, 2003). Glasskärmar måste därför tvättas regelbundet. Skadegörelse måste även beaktas till högre grad för glas än för andra material då krossning av skärmen leder till att partier kan behöva bytas ut. Det är även ett av de dyrare och minst tåliga skärmmaterialen som förhållandevis lätt kan gå sönder på grund av vandalism eller stenskott (Träguiden, 2006a).

4.2.3 Miljö och hållbarhet

En faktor som får konsekvenser för djurlivet vid byggnation av glas- eller andra genomskinliga bullerskärmar är påflygning av fåglar (Trafikverket, 2013). Ur det perspektivet är skärmar i andra, ickegenomskinliga material, att föredra. Skärmar byggs dock av glas på grund av andra anledningar, därför finns de ett flertal åtgärder som kan vidtas för att förhindra påflygningar av fåglar. Dessa går ut på att mönstra glaset med hjälp av t.ex. plastfilmsremsor som fästs ovanpå glaset med tätt mellanrum.

Energiåtgången för tillverkning av glas är ca. 10-11 MJ/kg, koldioxidåtgången för produktionen är ca. 0,7-0,8 kg/kg och vattenåtgången ca. 17 l/kg (Ashby, 2013). Det skrivs även att 22-26% av allt glas som brukas återvinns.

4.3 Konstruktioner av cementbundna fiberskivor

Cementbundna fiberskivor, eller fibercementskivor, tillverkas av vatten, cement och kalkstensfiller och brukar armeras med cellulos-, glas- eller plastfibrer (Burström, 2001). Skivorna används ofta i våtutrymmen då de har hög fuktbeständighet och små fuktbetingade rörelser. Fibercementskivor används ofta som offerplanka i anslutning till mark på grund av sin

höga fuktbeständighet (Nordicwood, 1998). Bullerskärmar kan även konstrueras med fiberskivor som huvudmaterial och monteras då på t.ex. träreglar (Byggbasen, 2008). Dessa brukar oftast målas eller kläs av estetiska skäl då den ursprungliga grå färgen lätt uppfattas som tråkig. Fibercementskivor förväntas ha en livslängd på över 50 år vid normal användning (The architects journal, 2012).

4.3.1 Materialegenskaper

Fibercementskivor har hög fuktbeständighet och står lätt emot röta och mögel på grund av det höga pH-värdet, pH 11 (Cembrit, 2010). Skivorna tål ständig nedfuktning och bibehåller sina egenskaper även i vått tillstånd. Då materialet till stor del består av betong har det även mycket god brandbeständighet. Enligt Cembrit (2010) har 9 mm tjocka skivor ett ljudreduktionstal på 28 dB och 12 mm tjocka skivor har ett ljudreduktionstal på 31 dB. För att uppnå dessa ljudreduktionstal krävs att skivorna är monterade på ett korrekt och lufttätt sätt, det är således viktigt att skarvar och infästningar ljudtätas på ett riktigt sätt. Densiteten för fibercementskivor är enligt Cembrit (2010) 1150 kg/m³.

4.3.2 Underhåll och kostnader

Fibercementskivor kan ytbehandlas med silan/siloxan eller betongbinder för att stå emot kraftig nedsmutsning (Cembrit, 2010). En obehandlad skiva kan rengöras med högtrycksspolning eller såpalösning. Eftersom de tekniska egenskaperna bibehålls även när skivan är blöt eller smutsig är underhållskostnaden för skivorna relativt låg. Trasiga eller spruckna skivor bör därför bytas ut snarare än repareras. Cementbundna fiberskivor säljs och tillverkas under många produktnamn och har varierande prissättning beroende på återförsäljare (Beijer Byggmaterial, 2015a).

4.3.3 Miljö och hållbarhet

Det finns inga kända miljöfaror, i form av utsläpp av gifter, vid användning av cementbundna fiberskivor (Institut Bauen und Umwelt, 2012). Efter användning kan skivorna monteras ned och användas vid andra projekt förutsatt att de är i gott skick. Går de sönder eller monteras ner kan råmaterialen återvinnas för tillverkning av t.ex. nya skivor. Eftersom skivorna inte heller bryts ned frigörs inga gifter i form av t.ex. mögel (Cembrit, 2010).

Enligt Cembrits produktdeklaration är energiutgången för produktion av fibercementskivor 12 MJ/kg, koldioxidutsläppen vid produktion är ca. 0,68 kg/kg och vattenåtgången ca. 8 l/kg (Institut Bauen und Umwelt, 2012). Enligt Folksam's byggmiljöguide är fibercementskivor gjorda av förnyelsebara material (Folksam, 2012). I bruksskedet har de låga emissioner och bra funktion. Folksam's bedömning är att fibercementskivor inte återvinns i hög grad, dock används de för energiåtervinning och läggs sedan på deponi. Arbetsmiljön vid bygganläggande med fibercementskivor bedöms vara dålig då arbetarna utsätts för tunga lyft och kemisk exponering.

4.4 Tegelkonstruktioner

Tegel består av bränd lera som är förnyelsebart och är ett byggnadsmaterial med hög beständighet (Ashby, 2013). Tegelkonstruktioner kan förväntas ha en livslängd på över 100 år

(Tegelinformation, 2009). Bullerskärmar av tegel används ofta av estetiska skäl när skärmen ämnar att smälta in i omgivningen och placeras ofta intill cykelvägar, gångvägar och vid bostadsområden (RTA, 2006). Vid tegelkonstruktioner finns många estetiska möjligheter då det går att konstruera mängder av olika mönster. Fasta tegelstenar används för att konstruera reflekterande bullerskärmar medan perforerade tegelstenar används för att konstruera absorberande skärmar (Kotzen, 1998).

4.4.1 Materialegenskaper

Enligt Burström (2001) varierar densiteten för olika tegeltyper mellan 1400 och 1800 kg/m³. För ljudreduktionstalet för tegel gäller att en dubbling av tjockleken innebär en ökning av ljudreduktionstalet med 5 dB (Sound Research Laboratories Ltd, 1991). Om ytvikten är 220 kg/m² blir ljudreduktionstalet 45 dB vilket i sin tur innebär att en ytvikt på 440 kg/m² ger ett ljudreduktionstal på 50 dB. Utifrån detta kan ljudreduktionstalet beräknas för vilken tjocklek som helst.

4.4.2 Underhåll och kostnader

Tegel har lågt eller inget underhållsbehov på grund av dess höga beständighet och hålls ofta ren genom nederbörd (Government of the Hong Kong SAR, 2003). Klotter är lätt att tvätta bort med högtryckstvätt om nödvändigt.

4.4.3 Miljö och hållbarhet

Leran som används för att konstruera tegelstenar finns i stor mängd över hela världen och är ett förnyelsebart material (Kotzen, 1998). Tegel kan återvinnas och enligt Ashby (2013) återvinns ca. 15-20% av allt tegel som är i användning. Ashby (2013) skriver även att energiåtgången för produktion av tegel är 2,2-3,5 MJ/kg där den största energiåtgången sker då leran som används för tillverkning förbränns. Koldioxidutsläppen vid produktion är ca. 0,2 kg/kg och vattenåtgången ligger på ca. 5,6 l/kg.

4.5 Material i förhållande till varandra

I tabell 4.1 sammanfattas de materialspecifika egenskaperna för att se och förstå skillnaderna och likheterna mellan materialen. Tjocklekarna listade i tabellen är valda för att representera förekommande tjocklekar för respektive material. Listad densitet är ett medelvärde av tidigare nämnda densiteter. Ytvikten är beräknad som densitet multiplicerat med tjocklek. Ett användbart sätt att jämföra material är även genom att utföra livscykelanalyser.

Tabell 4.1: Sammanfattande tabell över materialegenskaper

Materialegenskaper				
	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Densitet [kg/m^3]	500	2600	1150	1600
Tjocklek [mm]	50	10	9	250
Ytvikt [kg/m^2]	250	260	10,35	400
Ljudreduktionstal [dB]	28	40	28	49

4.5.1 Livscykelanalys för material

Enligt Ashby (2013) bör en livscykelanalys utföras enligt följande steg: Målbeskrivning och omfattning, inventeringsanalys, miljöpåverkan och resultattolkning. Det första steget ämnar att definiera varför analysen utförs, vilka faktorer som ska beaktas och vilken del av materialets liv som bedöms. Omfattning på studien samt mellan vilka stadier analysen ska ske måste definieras. De två vanligaste omfattningarna på en studie är vagga-till-port och vagga-till-grav där den första sträcker sig från materialets tillkomst tills dess att det används för en konstruktion, och den senare sträcker sig från materialets tillkomst tills dess att konstruktionen är byggd och avvecklad.

De olika resursförbrukningarna och utsläppen som materialen kräver undersöks i inventeringsanalysen. Först måste gränserna bestämmas och sen kan datan samlas in. När datan samlas in måste enheter definieras. Vilken enhet som ska användas beror på hur materialet säljs och brukas. Olika enheter måste användas för olika indikatorer vilket kan skapa problem i den senare bedömningen.

Vidare förklarar Ashby (2013) att alla indikatorer inte har samma miljöpåverkan och vissa är allvarligare än andra. I steg tre utreds således hur resursförbrukningen och utsläppen påverkar miljön. Varje miljöpåverkan vägs genom att multiplicera kvantiteten av inventeringen med en miljöpåverkansfaktor. Miljöpåverkansfaktorn är ett mått på hur allvarlig påverkan bedöms vara. Sista steget innebär att resultaten tolkas och analyseras för att avgöra vad de innebär och vilka åtgärder som bör vidtas.

Resultat som kan utläsas ur livscykelanalyser innehåller ofta många siffror och är både svårtolkade och svårbearbetade vilket har lett till behovet av en ekologisk indikator bestående av endast en siffra (Ashby, 2013). Den ekologiska indikatorn tas fram genom fyra steg. I det första steget klassificeras all data enligt den miljöpåverkan de har. Det andra steget är normalisering, vilket innebär att alla enheter tas bort och all data görs om till en gemensam skala. I det tredje steget viktas datan enligt hur allvarlig miljöpåverkan bedöms vara och i det sista steget summeras den viktade och normaliserade datan till en faktor, den ekologiska indikatorn. Enligt Ashby (2013) har metoden ibland kritiserats då olika problem kan anses vara olika allvarliga eftersom det inte finns någon standard för hur viktningen ska gå till. Resultatet blir dock mer lättarbetat och det är lättare att jämföra olika materials påverkan utgående från en enda siffra.

5 Metod

Metoden har syftat till att jämföra och beskriva effekterna av bullerskärmars utformning och material i relation till varandra med fokus på ljudreduktion, kostnader och miljöaspekter. Den bakomliggande teorin och materialdatan har framtagits genom litteraturstudier inom respektive område. Undersökningsobjekten valdes med hänsyn till material och dess jämförbarhet i relation till varandra. För att tillhandahålla jämförelsebara parametrar för de olika skärmarna utfördes en fältundersökning som underlades av beräkningar och analyser. Slutligen sammanställdes resultat från litteraturstudie och mätningar i multikriterieanalyser och resultatet värderades och diskuterades.

5.1 Fältundersökning

För val av bullerskärmar har Trafikverkets databas Bro och Tunnel Management (BaTMan) använts. Data i form av ålder, material och konstruktionstyp för de valda skärmarna har tagits fram ur BaTMan. Undersökningar har utförts med avseende på slitage, utformning, konstruktion och miljö. För att få en konkret bild över detta har undersökningarna fokuserats på flera skärmar av olika utformning och ålder men med så liknande trafikmiljö som möjligt.

Fältmätningarna utfördes genom att ljudtrycksnivån på båda sidor av bullerskärmen mättes samtidigt. Detta upprepades för olika mätpunkter längs med skärmen och för de olika bullerskärmarna. För att utföra mätningarna spärrades delar av körfältet och vägrenen närmst bullerskärmen av. Först gjordes en visuell besiktning av skärmen där dimensioner, slitage, avstånd till vägen, konstruktionstyp och material undersöktes. Efter den visuella besiktningen utfördes mätningarna genom att två parallellkopplade mikrofoner anslöts till en dator. Mikrofonerna positionerades sedan mitt emot varandra på varsin sida av skärmen med ett avstånd från skärmens topp som var större än, eller lika med, en meter enligt Swedish Standards Institute (SIS, SS-EN ISO 354:2003). När mikrofonerna var i position startades ett Matlab-skript som spelade in ljud i 30 sekunder. Samtidigt som ljudinspelningen var igång räknades antalet bilar och tung trafik som passerade, denna information kunde senare användas i de beräkningar som utfördes. Efter att inspelningen var avslutad sparade skriptet originalfilen och proceduren kunde därefter upprepas.

Mätningpunkterna valdes enligt SIS (SS-EN ISO 354:2003) till positioner mitt på skärmen med minst två meter inbördes mellanrum. Vidare valdes även positioner där det är transmissionsvägar med mindre motstånd så som hål, springor och kopplingar. I efterhand utfördes även en mätning med en kalibrator för att få fram kalibreringsfaktorn till mätningarna.

5.2 Beräkningar och analys av inspelningar

Inspelningen registrerades i form av en voltsignal som sedan transformerades till en ekvivalent ljudtrycksnivå. Detta utfördes genom ett Matlab-skript baserat på skriptet `isv.m` skrivet av Andersson (2011), se bilaga D. Först omvandlades signalen till ett ljudtryck genom en kalibrationsfaktor. Denna kalibrationsfaktor tar även hänsyn till mikrofonens kalibrering L_{pshift} och ljudtrycket beräknas genom

$$p = s \cdot 10^{L_{pshift}/20} \quad (5.1)$$

där s är voltsignalen.

Därefter gjordes en A-viktning av ljudtrycket och det A-viktade ljudtrycket p_A beräknades. Den ekvivalenta A-viktade ljudtrycksnivån över frekvenserna fås genom

$$L_{pA} = 20 \log_{10} \left(\frac{|p_A|}{p_{ref}} \right) \quad (5.2)$$

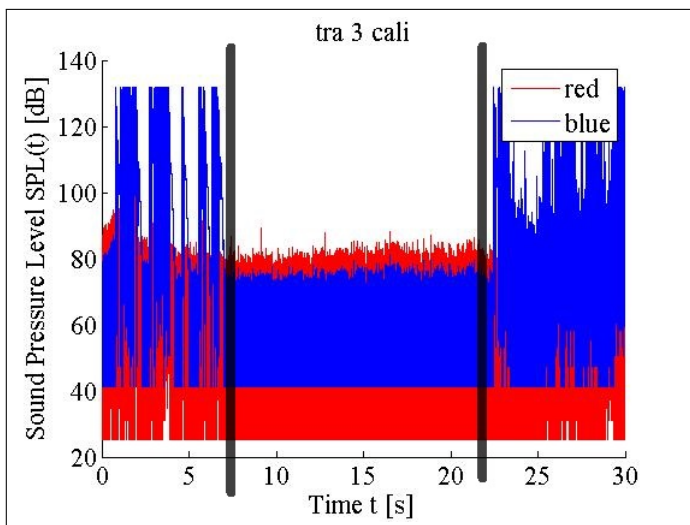
och den totala ekvivalenta A-viktade ljudnivån beräknas enligt

$$L_{ptotA} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{L_{pA(i)}/10} \quad (5.3)$$

där n är antalet värden i L_{pA} vektorn. En ekvivalent ljudnivå beräknades även för ett oviktat fall med ekvationerna 5.2 och 5.3.

Ekvation 2.4 används för att jämföra skillnader mellan fram- och baksidan om skärmen och är alltså skillnaden i ekvivalent ljudtrycksnivå. Detta användes som referensvärde för att uppskatta hur stort ljudreduktionstalet för skärmen är, medan ljudtrycket och ljudtrycksnivån plottades över tid för att se hur väl de båda mätpunkterna följer varandra.

Om de olika mätpositionerna följer varandra i ljudtryck och ljudtrycksnivå antogs mätningarna vara pålitliga nog för att användas som uppskattning. Följer de däremot inte varandra antas mätningen vara påverkad av andra källor och är därmed opålitlig. Då en avvikelse upptäcktes kunde beräkningarna isoleras till den delen av mätningen där de två mätpositionerna följer varandra, se figur 5.1. De värden som uppmätts gav uppskattningar och syftar till att ge en bild över reduktionsprocessen och bör inte ses som absoluta värden utan snarare som riktlinjer.



Figur 5.1: Isolering av mätresultat vid avvikelser

De inspelningar som utfördes vid varje skärm adderades för att få ett medelvärde för skärmen. De mätningar som gjordes vid håligheter och dylikt adderades dock ej. Utifrån medelvärdena beräknades ljudreduktionstalet för att jämföra de olika skärmarna.

5.3 Beräkning av ljudtrycksnivå enligt Nordic Prediction Method

Utöver fältmätningarna gjordes även en analytisk undersökning enligt den nuvarande svenska standarden Nordic prediction method (The Nordic Council of Ministers, 1996). Dessa beräkningarna är utförda i ett Matlab-skript, se bilaga D, med ingående parametrarna enligt följande: fordonens hastighet v [km/h], antalet lätta och tunga fordon N_{light}, N_{heavy} , mättiden T [s], avståndet till vägkant längs normalen a [m], höjden för mottagaren i förhållande till det reflekterade planet h_m [m], vägens höjd relativt det reflekterade planet h_b [m], den längsta sträckan till vägs slut d [m], hård eller mjuk mark, vinkeln för vilken vägen undersöks α [°], gradienten för vägen G [%], halva avståndet mellan de yttre gränserna för de yttre körfälten b [m] och om det finns hus på motstående sida av skärmen. Se bilaga A för fullständig beräkningsgång.

Det är endast av intresse att veta ljudtrycksnivån vid bullerskärmen och enligt The Nordic Council of Ministers (1996) kan då alla korrektionsvärden rörande själva bullerskärmen samt bakom skärmen sättas till noll. Det har även antagits att det inte finns några bidrag från en ensamt reflekterade yta, detta för att ingen sådan situation undersöktes. Samma antagande är även gjort för reflektioner i sidogata, innegårdar, villor samt fasader.

5.4 Multikriterieanalyser

För att bedöma de olika materialens lämplighet används multikriterieanalyser som ett verktyg. De olika delarna som vägs in i bedömningen är materialens ljudreducerande förmåga, kostnader för material och underhåll av skärmarna samt materialens miljöpåverkan. Se tabell 5.1 för indikatorer. Separata analyser för respektive del har utförts och dessa har sedan vägts samman i en slutlig analys.

Tabell 5.1: Indikatorer för multikriterieanalyser

Multikriterieanalyser	
Miljöindikatorer	-Energiåtgång för produktion -Koldioxidutsläpp -Vattenåtgång under materialets livslängd -Återvinningsandel
Ljudreducerande förmåga	-Ljudreduktion uppmätt i fält -Materialens teoretiska ljudreduktionstal -Absorberande respektive reflekterande
Kostnadsfaktorer	-Underhåll -Grundläggning -Materialkostnader -Reparationskostnader

Tidigare beskriven teori kring livscykelanalyser är även applicerbar på multikriterieanalyser. För att bedöma de olika materialens miljöpåverkan har därför en multikriterieanalys utförts enligt de steg som beskrivs i avsnitt 4.5.1. De miljöindikatorer som beaktats redovisas i tabell 5.1. Den insamlade datan är hämtad ur befintlig teori och de valda indikatorerna har inte viktats då det är svårt att avgöra vilken miljöpåverkansindikator som har störst inverkan på miljön. Resultatet analyseras genom en jämförelse mellan materialen där det inte

läggs någon vikt vid de exakta värdena utan resultaten värderas enbart genom hur materialen förhåller sig till varandra. För att lättare kunna tolka resultatet ur den första multikriterieanalysen av materialens miljöpåverkan har de olika indikatorerna normaliserats till en enda ekologisk indikator, även detta utfört i enlighet med teori beskriven i avsnitt 4.5.1. För att normalisera indikatorerna har alla värden för trä satts till 1.0 och utifrån det har en faktor beräknats för respektive material. De normaliserade värdena har sedan summerats för att slutligen ge en enda ekologisk indikator. Den ekologiska indikatorn används som jämförelsetal mellan materialen och visar förhållandet mellan de olika materialens miljöpåverkan. Återigen har ingen värdering gjorts kring vilka indikatorer som ger störst påverkan på miljön utan alla har istället bedömts lika väsentliga.

För bedömning av materialens ljudreducerande förmåga har de faktorer som presenteras i tabell 5.1 använts. Den uppmätta ljudreduktionen har normaliserats genom att de uppmätta värdena, samt det teoretiska ljudreduktionstalet, för trä har satts till 1.0 och därigenom har en faktor beräknats för de övriga materialen. Absorberande material har tilldelats faktorn 1.0 jämfört med faktorn 1.25 för reflekterande material. För att få en slutlig ljudreduktionsfaktor har alla värden summerats för respektive material och således skapat en total ljudreduktionsfaktor som används för vidare analys.

Multikriterieanalysen för kostnader relaterade till de olika materialen är utförd med kriterier enligt tabell 5.1. För underhålls- och grundläggskostnader har materialen tilldelats värdena 1, 2 eller 3 baserat på bedömningen om huruvida skärmarna konstrueras med låg, medel eller hög standard enligt Göteborgs Stad Trafikkontoret (2013). För att bedöma materialkostnaderna har inköpspris för materialen hämtats från olika återförsäljare och kostnaderna har sedan normaliserats på samma sätt som tidigare, dvs. kostnaden för trä har satts till 1.0 och utifrån det har faktorer beräknats för de övriga materialen. Reparationskostnader har tilldelats värdena 1, 2 eller 3 baserat på hur ofta element riskerar att behöva bytas ut och kostnader för ett sådant byte. I det sista steget har de olika faktorerna summerats till en enda kostnadsfaktor som används för den slutliga analysen.

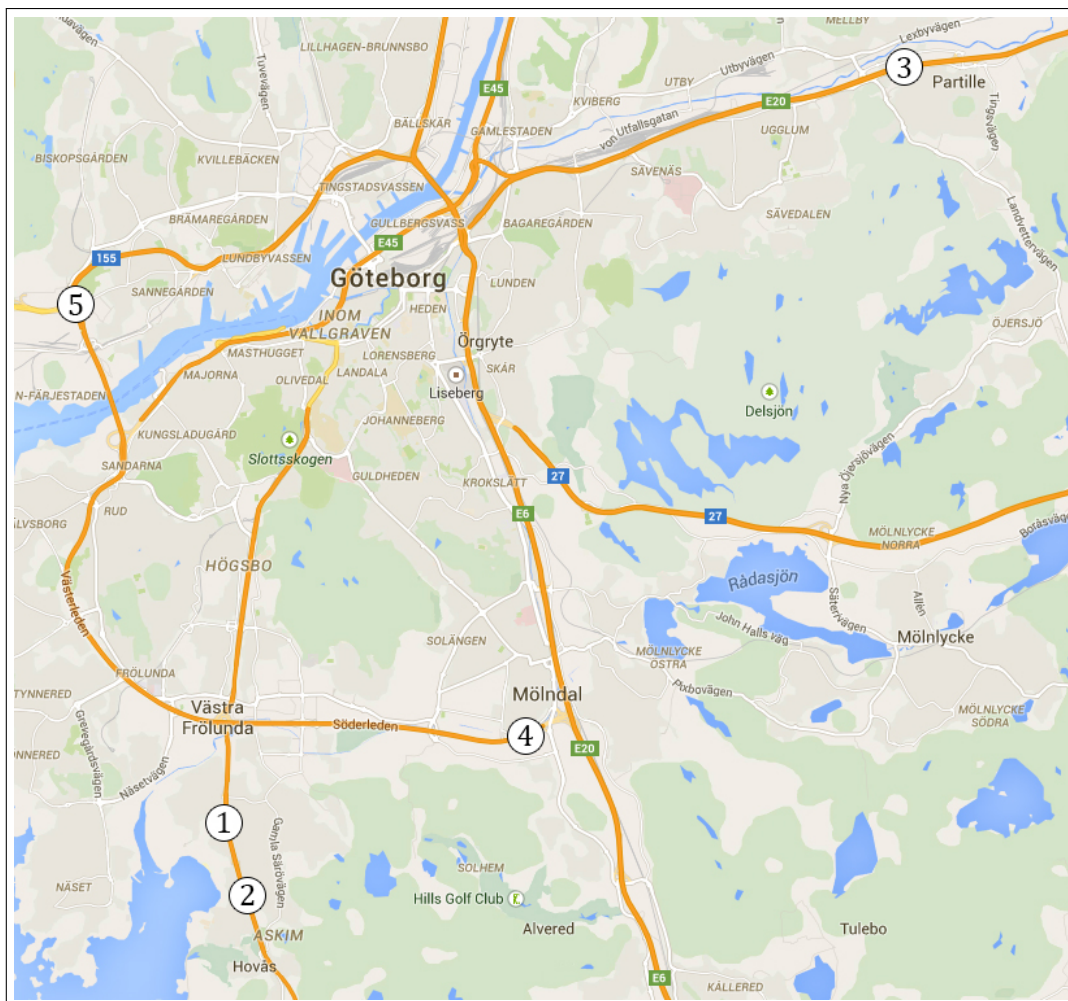
Den slutliga bedömningen av materialens lämplighet för bullerskrämskonstruktioner har gjorts genom en multikriterieanalys där kriterier enligt tabell 5.2 vägs samman. Ingångsdaten för analysen är således den beräknade ljudreduktionsfaktorn, kostnadsfaktorn och den ekologiska indikatorn. Materialens ljudreduktion bedöms vara dubbelt så viktig som de övriga två faktorerna då den huvudsakliga anledningen till konstruktion av bullerskräms är ljuddämpning. På grund av detta har ljudreduktion tilldelats en viktningsfaktor på 1.0 medan kostnadsfaktorn och den ekologiska indikatorn har tilldelats faktorn 0.5. En summering av de tre faktorerna ger den slutgiltiga sammanvägda faktorn som följaktligen bedöms vara den faktor som indikerar lämplighet hos materialen.

Tabell 5.2: Metod för slutlig multikriterieanalys

Slutlig multikriterieanalys	
Slutlig lämplighetsfaktor	-Ljudreduktionsfaktor*1.0 -Kostnadsfaktor*0.5 -Ekologisk indikator*0.5

6 Undersökningsobjekt

I detta kapitel presenteras de bullerskärmar som undersökts enligt tidigare redovisad metod. Totalt har fem olika skärmar undersökts: En nyare träskärm (1), en äldre träskärm (2), en skärm av glas (3), en konstruerad av cementbundna fiberskivor (4) och en skärm i tegel (5). Se figur 6.1 för de olika undersökningsobjektens geografiska placering. För varje skärm presenteras indata för de beräkningar som har utförts i tabellform. Samtliga mätningar har utförts under en klar dag med temperaturer runt 5 - 10 °C.



Figur 6.1: Karta över respektive skärms geografiska placering (Google Maps, 2015)

6.1 Bullerskärm 1



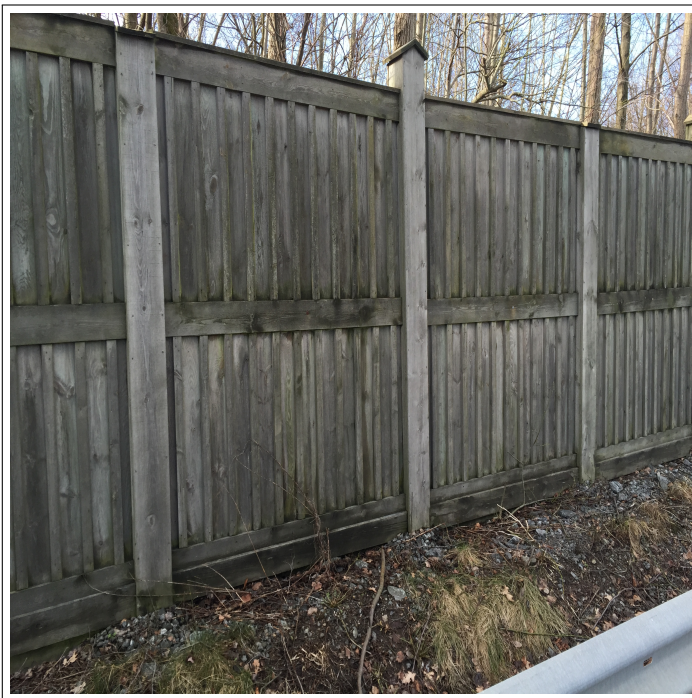
Figur 6.2: Träskärm längs väg 158 södergående riktning, vid Askims stationsväg

Undersökningsobjekt 1 är en träskärm konstruerad mellan 2009-2011 vilket ger en bra representation av en nyare träskärm. Då skärmen vid vissa partier är placerad på en vall varierar den mycket i höjd, som lägst 1.5 meter och 2.9 meter vid den högsta punkten. Skärmen är belägen intill väg 158 som är mycket trafikerad vilket kan innebära ökat slitage på skärmen. Trots detta bedöms skärmen vara i mycket gott skick, med lite buskage omkring. Den upplevda ljudreduktionen varierade längs med skärmen eftersom att skärmen varierade i höjd. På lite längre avstånd från skärmen var reduktionen mer jämn, troligen eftersom vallens reduktion bidrog.

Tabell 6.1: Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 1

Träskärm ny, skärm 1			
Hastighet, v [km/h]	70	Längsta avståndet till väg, d [m]	221
Antal personbilar, N_{light} [st]	16	Mark typ, $ground$	mjuk
Antal tunga fordon, N_{heavy} [st]	1	Vinkel för synlig väg, α [°]	176
Mätningstid, T [sekunder]	30	Vägens gradient, G [‰]	0
Avstånd till vägen, a [m]	14.7	Halva körbanan, b [m]	7.3
Höjd mottagaren, h_m [m]	0.5	Hus på motstående sida, $house$	ja
Höjd vägen, h_b [m]	0		

6.2 Bullerskärm 2



Figur 6.3: Träskärm längs väg 158 södergående riktning, vid Hovåsmotet

Undersökningsobjekt 2 är en äldre träskärm belägen längs med samma sträcka som skärm nummer 1. Exakt byggnadsår för denna skärm är okänt eftersom uppgifter för detta saknas. Då den är placerad i liknande miljö ger detta en god uppfattning om hur en träskärm påverkas under en längre tid. Skärmen, med sin höjd på 2.6 meter, bedömdes som mycket sliten med flertalet håligheter och sprickor. Detta i sin tur medförde att den upplevda ljudreduktionen var betydligt sämre än för den nyare träskärmen, eftersom att ljud lätt tar sig igenom håligheter.

Tabell 6.2: Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 2

Träskärm gammal, skärm 2			
Hastighet, v [km/h]	70	Längsta avståndet till väg, d [m]	313
Antal personbilar, N_{light} [st]	12	Mark typ, $ground$	hård
Antal tunga fordon, N_{heavy} [st]	1	Vinkel för synlig väg, α [°]	175
Mätningstid, T [sekunder]	30	Vägens gradient, G [%]	0
Avstånd till vägen, a [m]	9.8	Halva körbanan, b [m]	7.3
Höjd mottagaren, h_m [m]	1.6	Hus på motstående sida, $house$	ja
Höjd vägen, h_b [m]	0		

6.3 Bullerskärm 3



Figur 6.4: Glasskärm längs E20 västergående riktning, vid Partillemotet

Skärm nummer 3, med byggnadsår 2006, är den glasskärm som har undersökts. Den består av en 2 meter hög betongbas med glasskivor som sträcker sig ytterligare 2.20 meter. Det är för dessa glasskivor som mätningarna har utförts. Skärmen är placerad precis intill väg E20 med bostadshus precis bakom skärmen vilket medför höga krav i form av ljudreduktion. Skärmen bedömdes vara i gott skick med undantag för en krossad glasskiva. Ljudreduktionen upplevdes trots detta som mycket god, trafikljud tog sig knappt igenom.

Tabell 6.3: Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 3

Glasskärm, skärm 3			
Hastighet, v [km/h]	80	Längsta avståndet till väg, d [m]	321
Antal personbilar, N_{light} [st]	18	Mark typ, $ground$	hård
Antal tunga fordon, N_{heavy} [st]	3	Vinkel för synlig väg, α [°]	160
Mätningstid, T [sekunder]	30	Vägens gradient, G [‰]	0
Avstånd till vägen, a [m]	14.5	Halva körbanan, b [m]	11.5
Höjd mottagaren, h_m [m]	3.2	Hus på motstående sida, $house$	ja
Höjd vägen, h_b [m]	0		

6.4 Bullerskärm 4



Figur 6.5: Skärm av fibercementskivor längs söderleden västergående riktning, vid Årbromotet

Undersökningsobjekt 4, skärmen med cementbundna fiberskivor, är belägen längs söderleden som även detta är en vältrafikerad sträcka. Skärmen är 3.7 meter hög och omgiven av buskage på båda sidor. Skärmens skick bedömdes som gott, med undantag för vissa håligheter vid anslutning till mark. Skärmen var även smutsig på grund av den kringliggande vegetationen, vilket kan medföra ökade underhållskostnader i form av rengöring. Ljudreduktionen upplevdes som god, dock inte lika bra som glas- eller tegelskärmen. Även detta är en äldre skärm men uppgifter om exakt byggnadsår saknas.

Tabell 6.4: Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 4

Fibercementskärm, skärm 4			
Hastighet, v [km/h]	70	Längsta avståndet till väg, d [m]	396
Antal personbilar, N_{light} [st]	26	Mark typ, $ground$	mjuk
Antal tunga fordon, N_{heavy} [st]	3	Vinkel för synlig väg, α [°]	180
Mätningstid, T [sekunder]	30	Vägens gradient, G [%o]	0
Avstånd till vägen, a [m]	21.0	Halva körbanan, b [m]	9.8
Höjd mottagaren, h_m [m]	2.7	Hus på motstående sida, $house$	ja
Höjd vägen, h_b [m]	0		

6.5 Bullerskärm 5



Figur 6.6: Tegelskärm längs Övädersgatan, avfart från Lundbyleden

Skärm nummer 5 är en 3.2 meter hög tegelskärm, belägen vid en avfart vid lundbyleden. Information om skärmens byggnadssår saknas. Skärmen är omgiven av mindre buskage och bedömdes vara i gott skick. Tegelskärmen skiljer sig från de andra skärmarna då det är en betydligt mer massiv och tjockare konstruktion. Ljudreduktionen upplevdes som mycket god.

Tabell 6.5: Ingående värden för beräkningar med Nordic Prediction Method för skärm 5

Tegelskärm, skärm 5			
Hastighet, v [km/h]	50	Längsta avståndet till väg, d [m]	188
Antal personbilar, N_{light} [st]	5	Mark typ, $ground$	hård
Antal tunga fordon, N_{heavy} [st]	1	Vinkel för synlig väg, α [°]	130
Mätningstid, T [sekunder]	30	Vägens gradient, G [‰]	0
Avstånd till vägen, a [m]	9	Halva körbanan, b [m]	8
Höjd mottagaren, h_m [m]	2.2	Hus på motstående sida, $house$	nej
Höjd vägen, h_b [m]	0		

7 Resultat

Utifrån de tre kriterierna ljudreduktion, kostnad och miljöpåverkan, har resultat sammanställts och redovisas nedan i tabellform.

7.1 Ljudreduktion

Följande medelvärden, se tabell 7.1, erfordrades efter att fältmätningar utförts och insamlad data analyserats. Fullständiga värden för varje enskild mätning återfinns i bilaga C.

Tabell 7.1: Ljudreduktion uppmätt i fält

Mätningar av ljudnivå vid befintliga bullerskärmar			
Skärm [Material]	Ljudtrycksnivå vid väg [dB(A)]	Ljudtrycksnivå på andra sidan skärmen [dB(A)]	Reduktion [dB(A)]
Trä (ny)	67.57	57.92	9.65
Trä (gammal)	77.23	67.25	9.98
Glas	71.32	33.63	37.69
Fibercementskiva	79.91	65.98	13.93
Tegel	96.36	48.68	47.68

Tabell 7.2 visar en sammanställning av de materialparamtrar som har bedömts viktiga för ljudreduktionen för respektive material.

Tabell 7.2: Ljudreducerande materialegenskaper

Ljudegenskaper				
	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Ljudreduktionstal	28	40	28	49
Absorberande	Ja	Nej	Ja	Nej
Reflekterande	Nej	Ja	Nej	Ja

Tabell 7.3 visar den normaliserade ljudreduktionen för de olika materialen. Eftersom undersökningarna är utförda på två olika skärmar i trä används ett medelvärde av reduceringen för trä. Utöver resultatet från fältmätningar vägs det teoretiska värdet för ljudreduktionstalet och huruvida materialet är absorberande eller reflekterande in i bedömningen. Ju lägre värde på den slutliga faktorn desto större reduktion.

Tabell 7.3: Multikriterieanalys - normaliserad ljudreduktion

Normaliserad ljudreduktion				
	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Ljudreduktion	1.0	0.26	0.705	0.206
Ljudreduktionstal	1.0	0.7	1.0	0.57
Absorberande/reflekterande	1.0	1.25	1.0	1.25
Total ljudreduktionsfaktor	3.0	2.21	2.705	2.026

7.1.1 Hålligheters och springors inverkan på ljudreduktionen

Tabell 7.4 visar uppmätta värden vid hålligheter och springor på de undersökta skärmarna. Tabellen visar även skillnaden i ljudreduktion jämfört med de uppmätta värdena för mätningpunkter utan hålligheter i närheten.

Tabell 7.4: Hålligheters och springors inverkan på ljudreduktionen

Inverkan av hålligheter och springor		
	Ljudreduktion [dB(A)]	Skillnad i ljudreduktion [dB(A)]
Glas - krossad ruta	10.98	26.82
Glas - springa	37.4	0.4
Fibercement - hål i anslutning	1.6	12.33
Trä - hål	6.4	3.415
Trä - anslutning	5.7	4.115

7.2 Beräknade ljudtrycksnivåer

Ljudtrycksnivån vid den positionen där bullerskärmen är placerad är beräknad för varje skärm enligt Nordic Prediction Method. Tabell 7.5 visar de ekvivalenta ljudtrycksnivåerna för de olika fallen.

Tabell 7.5: Beräknade ekvivalenta ljudtrycksnivåer för de olika fallen enligt Nordic Prediction method

Beräknade ekvivalenta ljudtrycksnivåer					
	Trä (ny)	Trä (äldre)	Glas	Fibercement	Tegel
Ekvivalent ljudtrycksnivå, L_{Aeq} [dB(A)]	71.4922	73.5375	84.2680	69.8646	80.7827

7.3 Kostnadsanalys

Kostnadsanalysen grundar sig i en jämförelse mellan de olika materialen med avseende på aspekterna underhållsbehov, grundläggningskostnader, materialkostnader och reparationskostnader. Eftersom varje enskilt projekt varierar i omfattning är det svårt att sätta ett exakt pris på en skärm av ett visst material vilket leder till att analysen enbart bör användas för ett förhållande mellan de olika materialen.

Bedömningskriterier

För att kunna vikta kostnaderna mot varandra kan de delas in i tre olika standarder enligt Göteborgs Stad Trafikkontoret (2013) där hög standard är mest kostsamt.

Hög standard: Mer estetiskt tilltalande, ofta glasskärmar

Medel standard: Bättre grundlagd träskärm, större betongbas

Låg standard: Träskärm fäst på grundlagda stolpar

Respektive standard tilldelades en faktor från 1-3, hög standard motsvarar värdet 3, medel standard värdet 2 och låg standard värdet 1. De undersökta skärmarna av respektive material delas in efter ovan nämnda standarder. För att enkelt kunna presentera jämförelsen tilldelas varje material en viktningsfaktor där ett numeriskt värde saknas. Materialkostnaden räknas om till en normaliserad faktor, utgående från skärmarnas tjocklek och återförsäljares prislister. Således kan en total kostnadsfaktor beräknas.

Underhåll

Samtliga bullerskärmar kräver underhåll, vilken typ av underhåll och hur ofta beror på konstruktionsmaterialet. Gemensamt för alla material är klottersanering och uppröjning av vegetation kring skärmarna. Om träskärmen är målad behöver den målas igen ungefär vart 8 - 10:e år (Trafikverket, 2004). Skärmar av glas tvättas vanligtvis med ett intervall på 1 - 2 år för att behålla sin transparens. Underhållsbehovet kan delas in från högt till lågt. Utifrån tidigare utförd litteraturstudie bedöms underhållsbehovet för glas vara högt, träskärmen och fibercementens behov som medel, och teglets behov som lågt.

Grundläggning

Grundläggningskostnader varierar starkt beroende på vilket material skärmen konstrueras av, men är även olika från skärm till skärm. Träskärmar och skärmar av fibercementskivor grundläggs ofta med pålar som fortsätter som stolpar ovan mark vilket ger relativt låga grundläggningskostnader och materialen tilldelas således faktorn 1. Tegel bedöms grundläggas enligt medelhög standard och tilldelas således värdet 2. Bullerskärmar av glas är däremot oftast anslutna till ett större betongfundament vilket medför en större grundläggningskostnad än de övriga materialen och ges således faktorn 3.

Materialkostnader

För att kunna beräkna priser användes följande tjocklekar, som anses representativa för bullerskärmar för de olika materialen:

Trä: 22 mm · 2 stycken

Glas: ca 1 cm

Cementbunden fiberskiva: ca 8 mm · 2 stycken

Tegel: 25 cm

För att jämföra materialkostnaderna har inköpspris för materialen studerats och ett ungefärligt pris per kvadratmeter har räknats fram, se bilaga B för beräkningar:

Trä: 308 kr/m² (Beijer Byggmaterial, 2015d)

Glas: 2272 kr/m² (Beijer Byggmaterial, 2015b)

Cementbunden fiberskiva: 543 kr/m² (Beijer Byggmaterial, 2015a)

Tegel: 1868 kr/m² (Beijer Byggmaterial, 2015c)

Reparationskostnader

Vid avgörande av hur reparationskostnaderna för de olika materialen förhåller sig till varandra har en bedömning av hur ofta reparationer behöver genomföras samt materialkostnader för byten värderats. Glasskivor är det mest känsliga materialet och bedöms behöva bytas ut ofta. Byten av glasskivor medför även högre kostnader än för övriga material. Risken för reparation av element i tegel, fibercement och trä bedöms betydligt lägre precis som kostnaderna vid eventuella byten.

Kostnadsjämförelse

Resultatet av kostnadsanalysen presenteras i följande kostnadsjämförelse.

Tabell 7.6: Multikriterieanalys - kostnader

Kostnadsjämförelse				
	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Underhåll	2	3	2	1
Grundläggning	1	3	1	2
Materialkostnadsfaktor	1	7.38	1.76	6.06
Reparationskostnader	1	3	1	1
Total kostnadsfaktor	5	16.38	5.76	10.06

7.4 Multikriterieanalys av miljöpåverkan

Tabell 7.7 visar den utförda multikriterieanalysen av materialens miljöpåverkan. Inga värden har viktats då det är svårt att bedöma vilka indikatorer som har störst påverkan på miljön. I följande tabell har alla indikatorer således bedömts lika allvarliga och ingen viktning har gjorts.

Tabell 7.7: Multikriterieanalys - miljöpåverkan

Multikriterieanalys, miljöpåverkan				
	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Energiåtgång för produktion [MJ/kg]	8,8-9,7	10-11	12	2,2-3,5
Koldioxidutsläpp [kg/kg]	0,36-0,4	0,7-0,8	0,68	0,2
Vattenåtgång [l/kg]	625	17	8	5,6
Återvinning [%]	8-10	22-26	-	15-20
Livslängd [år]	40	40+	50+	100+

I tabell 7.8 har alla normaliserade indikatorer summerats och resultatet visar längst ner en enda miljöpåverkansfaktor, en ekologisk indikator, som bedöms som slutgiltig. Ju lägre värde på den ekologiska indikatorn desto lägre bedöms miljöpåverkan vara.

Tabell 7.8: Multikriterieanalys - normaliserad miljöpåverkan

Normaliserade värden, ekologiska indikatorer				
	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Energiåtgång för produktion	1.0	1.135	1.297	0.308
Koldioxidutsläpp	1.0	1.974	1.799	0.526
Vattenåtgång	1.0	0.0272	0.0128	0.00896
Återvinning	1.0	0.375	1.0*	0.5
Livslängd	1.0	1.0	0.8	0.4
Total ekologisk indikator	5.0	4.51	4.9	1.743

*Data för återvinning av fibercementskivor saknas men värdet sätts till 1.0 då fibercementskivor ej återvinns i hög grad enligt tidigare beskriven teori.

7.5 Slutlig analys

I tabell 7.9 bedöms ljudreduktionen vara det viktigaste kriteriet eftersom att huvudsyftet med en bullerskärm är ljudreduktion och ljudreduktionen tilldelas således viktningsfaktorn 1.0. Både kostnad och miljö bedöms sekundärt i analysen och tilldelas därför en viktningsfaktor på 0.5. Det slutliga värdet på den sammanvägda faktorn är det värde som indikerar lämplighet hos materialen, ju lägre värde desto högre grad av lämplighet enligt analysen.

Tabell 7.9: Multikriterieanalys - sammanvägda faktorer

Multikriterieanalys, sammanvägda aspekter					
	Viktningsfaktor	Trä	Glas	Fibercement	Tegel
Ekologisk indikator	0.5	5.0	4.51	4.9	1.743
Kostnadsfaktor	0.5	5.0	16.38	5.76	10.06
Ljudreduktion	1.0	3.0	2.21	2.705	2.026
Sammanvägd faktor		8.0	12.65	8.04	7.93

7.6 Utformning

Enligt litteraturstudien finns flera faktorer som påverkar bullerskärmars effektivitet. Vid konstruktion av bullerskärmar bör material väljas som uppfyller materialparametrarna i tabell 7.10. För att bullerskärmen ska ha så hög effektivitet som möjligt bör den dessutom konstrueras enligt faktorerna sammanställda i tabell 7.10.

Tabell 7.10: Faktorer för utformning

Viktiga faktorer vid utformning av bullerskärmar	
Trafiksäkerhet	-Variationer i utseende
Grundläggning	-Hänsyn till vindlast, snöröjningslast och egen- tyngd -Hänsyn till tjälfarlig mark -Tätt mot marken
Dimensioner	-Skärmen bör vara så hög som möjligt
Avstånd från källa till skärm	-Skärmen bör placeras så nära källan som möj- ligt
Materialparametrar	-Ytvikt minst 15kg/kvm -Ljudreduktionstal minst 25dB -Absorberande ytor -Så låg reflektion som möjligt: reflekterande skärmar bör placeras på båda sidor om vägen för att undvika förhöjda ljudnivåer
Täthet	-Inga springor/hål efter montering -Tät anslutning mot mark: kan göras med offer- plankor, kapillärbrytande material eller fuktbe- ständigt material i botten av konstruktionen
Underhåll	-Regelbunden tvättning, ommålning och städ- ning -Skärmen bör vara lätt att klottersanera -Skärmen bör vara lättillgänglig för underhåll och reparationer

8 Diskussion

Resultaten för de olika materialens ljudreduktion visar att tegel är det material som reducerar ljud bäst, följt av glas, fibercementskivor och trä. Kostnadsanalysen visar ett annat förhållande mellan materialen där trä är det billigaste alternativet. Den utförda miljöanalysen tyder på att den ekologiska indikatorn är lägst för tegel medan de övriga materialen är förhållandevis likvärdiga. Dessa olika faktorer har i den slutliga analysen vägts samman och kan därigenom rangordnas med avseende på bedömd lämplighet för konstruktion av bullerskärmar. Enligt tabell 7.9 blir rangordningen enligt följande: tegel, trä, fibercementskivor, glas. Effektiviteten hos bullerskärmar är influerad av olika faktorer där tabell 7.10 visar vilka som bör vara uppfyllda för att konstruktionen ska ha så hög effektivitetsgrad som möjligt.

Nedan diskuteras giltigheten i de slutsatser som kan dras direkt ur resultaten. För de olika parametrarna, ljudreduktion, kostnad och miljö, finns felkällor i beräkningar och mätningar samt nämnvärd fakta ur litteraturstudien som inte har vägts in i resultatet. Fältmätningarna och multikriterieanalyserna diskuteras även för att avgöra huruvida metoden kan anses lämplig och trovärdig.

8.1 Ljudreduktion

Den uppmätta ljudreduktionen i undersökningen är direkt kopplad till materialen och beror av materialens ytvikt, transmissions-, absorptions- och reflektionsegenskaper. Genom att subtrahera ljudnivån bakom skärmen från ljudnivån framför skärmen fås ljudreduktionstalet kopplat till den specifika skärmen och således det specifika materialet. Eftersom att det uppmätta ljudreduktionstalet inte nödvändigtvis stämmer överens med det teoretiska värdet vägdes båda in i den slutliga bedömningen. Resultaten visar att den största skillnaden mellan det teoretiska värdet och det uppmätta värdet hittas för trä och fibercementskivor medan värdena för tegel och glas stämmer relativt bra överens. Anledningen till detta kan bland annat vara att det teoretiska ljudreduktionstalet för trä är taget för ett enkelt trägolv, regler med trall, och inte specifikt en träskärm. Detta på grund av att denna information inte gick att finna specifikt för en träskärm utan en liknande träkonstruktion valdes för att åtminstone ge ett jämförvärde. Det teoretiska värdet för fibercementskivor är taget från en återförsäljares (Minerits) hemsida och är olika för olika produkter vilket innebär att de skivor som finns i den undersökta konstruktionen inte nödvändigtvis är likadana som produkten på hemsidan. Det angivna ljudreduktionstalet är dessutom uppmätt i laboratoriet och således inte direkt jämförbart med ett värde uppmätt i fält. En annan möjlighet är att de teoretiska värdena är beräknade på nya konstruktioner som är monterade på ett korrekt sätt och utan håligheter vilket resulterar i att de borde vara något högre än de uppmätta värdena.

Eftersom mätningarna har utförts i direkt anslutning till skärmarna är sannolikheten liten att ljud har transporterats över skärmen och bidragit till ökad ljudnivå. Trots att sannolikheten är liten bedöms detta som en felkälla då det självklart finns en risk för detta beroende på rådande vindförhållanden vid mätningarnas utförande. Ytterligare en felkälla vid mätningarna är att den uppmätta ljudnivån på motsatt sida av skärmen inte enbart påverkas av vägljudet utan även av övrigt omgivningsljud. För resultaten i tabell 7.1 innebär detta att ljudtrycksnivån på andra sidan om skärmen hade kunnat vara lägre om ljud inte transporterats från andra håll. Den resulterande materialspecifika ljudreduktionen kan därför antas vara något högre.

De utförda fältmätningarna visar tydligt att de olika materialen inte är likvärdiga vad gäller ljudreduktion. Trots ovan nämnda felkällor tyder analysen på relativt starka samband mellan de teoretiska värdena på ljudreduktionstalet och de värden som är uppmätta i fält. Ur ljudreduktionsynpunkt är tegel och glas överlägsna både fibercementskivor och trä. Anledningen till detta är främst att glas och tegel har höga densiteter. Tegelkonstruktioner är dessutom betydligt tjockare än övriga konstruktioner vilket resulterar i betydligt högre ytvikt. Då ljudreduktionen är direkt kopplad till materialens densitet och ytvikt är fördelningen, redan från början, näst intill självklar. Det är dock viktigt att beakta flera olika faktorer vid val av konstruktionsmaterial, det är inte alltid nödvändigt att bygga en skärm av det material som ger högst ljudreduktion.

8.2 Kostnader

I resultatet ersattes kostnaderna med normaliserade faktorer och sammanställdes i tabell 7.6 för att ge en tydlig överblick. I de beräkningar som utförts har ett antal antaganden och förenklingar gjorts, detta för att resultaten lätt ska kunna jämföras. Resultaten som räknats fram anses dock rimliga som jämförelsetal även om det inte går att säga att en glasskärm skulle vara tre gånger dyrare än en av trä.

Då varje byggnation av bullerskärmar skiljer sig åt med t.ex. olika grundläggningsföretag har de flesta värden istället bestämts efter en skala ett till tre utefter vilken typ av skärm som studerats. Glasskärmar består ofta av en glasdel samt ett betongfundament då glaset inte kan placeras direkt på mark. Materialkostnaderna för denna betongdel har inte beaktats trots att det tillkommer kostnader även för den delen av skärmen. De skärmar som är konstruerade i tegel består också till stor del av murbruk, denna kostnad är inte heller medräknad. Övriga kostnader har täckts in och viktats under vilken standard skärmarna anses passa in. Som ovan nämnt har de kostnader som inte kunnat tilldelas ett faktiskt pris fått ett uppskattat värde. Detta innebär att resultaten inte är lämpliga som en prisuppskattning utan ger enbart en faktor för hur de olika skärmmaterialen ställer sig mot varandra. Att en underhållskostnad som tilldelats faktorn tre skulle stå jämnt mot en grundläggningskostnad med samma faktor bedöms inte rimligt.

Livslängden för de olika konstruktionerna har inte heller beaktats i kostnadsanalysen. Ett alternativt sätt att utföra analysen hade kunnat vara att dela alla kostnader med den förväntade livslängden för att på så sätt få en årlig kostnad. En sådan analys hade istället inneburit fördelningen tegel, fibercement, trä, glas baserat på de förväntade livslängderna.

Att glas avslutningsvis konstateras som det överlägset dyraste materialet känns mycket troligt, det är då viktigt att inte förringa glasets många andra fördelar som i många fall gör just glas till det lämpligaste alternativet trots sin höga kostnad.

8.3 Miljö och hållbarhet

De valda indikatorerna för multikriterieanalysen har olika grad av tillämplighet. Gällande energiåtgången för produktion har ingen hänsyn tagits till huruvida materialet främst tillverkas av förnyelsebara eller icke-förnyelsebara energikällor vilket ur miljösynpunkt är högst relevant. Anmärkningsvärt i analysen är att energiåtgången för produktion av tegel är betydligt lägre än för de övriga materialen trots att tegel är ett material som vid tillverkning förbränns i höga temperaturer. Värdena för de olika materialen anses dock jämförbara då de

flesta är grundade på samma källa.

Det går även att ifrågasätta huruvida vattenåtgång är en lämplig indikator i bedömningen då värdena skiljer sig åt i hög grad. Den främsta nackdelen med indikatorn är att vattenåtgången för trä möjligen inte är jämförbar med de övriga materialen eftersom stora delar av vattenåtgången vid plantering av träd är regnvatten. Den använda återvinningsfraktionen är materialspecifik och inte anpassad för konstruktionstypen bullerskärmar. Den är inte heller anpassad för Sveriges återvinning vilket troligen hade varit mer intressant då studien inriktar sig på Göteborgsområdet.

Utöver de kriterier som multikriterieanalysen är baserad på finns det flera andra faktorer som kan vägas in i miljö- och hållbarhetsaspekten. Trä kan lagra koldioxid och bidrar således inte till en ökad koldioxidhalt i atmosfären. Enligt litteraturstudien är den främsta energikällan vid tillverkning av trä biobränslen, men eftersom litteraturstudien inte innehåller någon information om energikällan för övriga material var det svårt att väga in detta i bedömningen. För glas har ingen hänsyn tagits till att djurlivet påverkas negativt då fåglar kan flyga in i skärmarna.

Utifrån ovanstående felkällor och resultatet av multikriterieanalysen kan slutsatsen dras att tegel är mest lämpat ur miljösynpunkt medan de övriga materialen är relativt likvärdiga. Analysen är dock begränsad och innehåller enbart ett fåtal miljöindikatorer. För ett mer pålitligt resultat skulle en mer utförlig analys kunna utföras, där fler miljöindikatorer vägs in och dessutom viktas beroende på hur allvarlig miljöpåverkan de bedöms ha. Resultatet från den utförda analysen är såldes direkt kopplat till de valda faktorerna och erbjuder inte en omfattande bedömning av de olika materialens miljöpåverkan. Skillnaderna i den utförda analysen är små och det finns flera andra kriterier som spelar in i bedömningen av huruvida materialen är miljövänliga. Den mest givande slutsatsen som kan dras ur studien är att inga av materialen är direkt olämpliga.

8.4 Utformning

Enligt litteraturstudien påverkas bullerskärmars effektivitet främst av materialval, skärmens dimensioner och skärmens placering. Dimensionerna och placeringen har i den här studien enbart undersökts teoretiskt. Resultaten av undersökningen visar att bullerskärmar bör byggas så höga som möjligt för att på så sätt blockera större delar av siktlinjen och därigenom uppnå högre dämpning. Undersökningen tyder även på att skärmen bör placeras så nära källan som möjligt för få en stor skuggzon. Vid konstruktion av bullerskärmar är höjden dock ofta en begränsande faktor och det kan därför istället vara lämpligt att välja ett material som har kapacitet nog att uppnå önskad ljudreduktion.

Utöver ovanstående faktorer är det även viktigt att bullerskärmar monteras och grundläggs på ett korrekt sätt för att uppnå maximal effektivitet. För att ljuddämpningen inte ska påverkas negativt bör skärmen monteras utan håligheter och springor vilket innebär att anslutningen till marken måste vara tät. Enligt den visuella undersökningen av bullerskärmarna presenterade i kapitel 6 var det tydligt att anslutningen till marken inte alltid är utförd på ett korrekt sätt. Vid skärmarna av trä och fibercementskivor fanns tydliga springor och hål vilket enligt resultatet innebar försämrad ljudreduktion. Vid anslutningen mellan träplankorna och träpelaren var ljudreduktionen lägre än vid håligheter mitt på skärmen vilket tyder på att den viktigaste faktorn för montering är anslutningspunkterna. Detsamma gäller för skärmen av fibercementskivor där ett stort hål i anslutningen mellan skärmen och marken resulterade

i en minskad ljudreduktion på nära 90 procent. För glasskärmen kunde inte samma samband utläsas då ljudreduktionen vid anslutningen mellan glasrutorna och betongfundamentet uppmättes till densamma som vid övriga mätpunkter.

Gällande utformning av bullerskärmar är det även av stor vikt att trafiksäkerhet och underhållsmöjligheter beaktas. För att en bullerskärm inte ska bidra till minskad trafiksäkerhet bör den enligt litteraturstudien variera i utformning längs med vägen och för att underhållsmöjligheterna ska vara goda bör skärmen vara lättillgänglig. Enligt den visuella inspektionen av undersökningsobjekten verkar de undersökta skärmarna inte vara konstruerade enligt ovan nämnda förutsättningar. Samtliga skärmar ser mer eller mindre likadana ut längs med hela sträckan och flera av skärmarna är täckta av buskage på båda sidor vilket gör dem svårtillgängliga. Ett samband mellan den praktiska och den teoretiska utformningen kan därigenom inte utläsas.

Slutligen innebär analysen att det går att utläsa en del samband mellan studerad teori och uppmätt data medan andra är svårare att se. Litteraturstudien visar att skärmar bör vara höga och placerade nära ljudkällan. Ljudreduktionen påverkas negativt om det finns håligheter eller otätheter i konstruktionen vilket styrks av både teori och fältmätningar. Enligt teorin bör trafiksäkerheten och underhållsmöjligheter styra utformningen medan den praktiska utformningen ger intryck av att andra faktorer dominerar.

8.5 Fältmätningar och analys

Undersökningsmetoden är baserad på standarder och förhållningskrav vid arbete på väg i förhoppningen att uppnå ett trovärdigt och tillförlitligt resultat. Konsekvensen av dessa förhållningskrav är att det vid fältmätningarna, av säkerhetsskäl, krävdes att delar av körfältet närmst bullerskärmen stängdes av, vilket resulterade i att trafiken flyttade längre från bullerskärmen. Detta innebär främst att ljudet måste färdas en längre väg och ljudtrycksnivån vid bullerskärmen blir möjligen något lägre än vid normal trafik. Troligen innebär inte detta någon större avvikelse för resultaten eftersom de värden som är beräknade är en differens mellan ljudtrycksnivån på båda sidor av skärmen och således inte direkt påverkade av hur hög ljudtrycksnivån brukar vara. Om ljudtrycksnivån vid skärmen är avsevärt lägre än vanligt skulle det dock kunna innebära att omgivningsljudet på båda sidor om skärmen har större inverkan på resultatet. Detta innebär i sin tur att skärmens ljudreducerande förmåga vid mätningen blir lägre eftersom att det inte finns tillräckligt höga ljudnivåer att reducera.

Något som ger större inverkan på resultatens giltighet är tiden då fältmätningarna utförs. Fältmätningarna utfördes enbart under en dag och vid en tidsperiod för varje skärm. Om fältmätningarna hade utförts kontinuerligt under flera dagar hade ett medelvärde kunnat användas och resultaten hade i sådana fall kunnat bedömas mer representativa för materialen. Det skall dock tilläggas att vid en jämförelse av olika skärmar bör de utföras så nära i tid som möjligt för att uppnå så liknande förhållanden som möjligt. För att utveckla analysen vidare hade flera skärmar av samma material kunnat undersökas och även där hade ett medelvärde för olika skärmar kunnat ge högre trovärdighet till resultaten.

Vid analys av ljudreduktionen är kontinuitet mellan ljudtrycksnivåerna en viktig faktor. När mätningarna analyserades kunde partier där det var störningar klippas bort för att uppnå mer representativa mätningar. Detta var möjligt eftersom alla mätningar var kontinuerliga och diagrammen tydligt visar när det var någonting som inte gått korrekt till i mätningarna, se figur 5.1. Korrigeringen var dessutom möjlig eftersom varje mätning innehåller över en miljon

loggade värden vilket innebär att mätningen, trots bortklippta delar, består av tillräckligt många värden för att antas tillförlitlig.

För att kunna jämföra de uppmätta värdena och på så sätt bedöma giltigheten i fältmätningarna beräknades ljudnivån på vägsidan av skärmen enligt Nordic Prediction Method. I beräkningarna med NPM har förenklingar och antaganden gjorts, dessa anges i kapitel 6.2. Beräkningsmetoden i sig är förenklad eftersom att den ursprungliga metoden är utformad för att beräkna ljudnivåer vid t.ex. fasader om en bullerskärm sätts in, medan de utförda beräkningarna syftar till att beräkna ljudnivån vid skärmen som en jämförelse med de uppmätta värdena. Ingångsdaten som således har störst påverkan i beräkningsmetoden är trafikmängd, avstånd till vägen och hastighet, vilket resulterar i en förenklad beräkning av de teoretiska ljudtrycksnivåerna. Detta kan vara en anledning till att de beräknade värdena skiljer sig från de uppmätta. En annan anledning till skillnaden kan vara att trafikanter överskrider hastighetsbegränsningarna, felräkningar i passerande trafik, trafikanternas position eller felmätningar på grund av mätutrustningen.

Resultaten visar att den beräknade ljudtrycksnivån skiljer sig från den uppmätta för alla undersökningsobjekten vilket resulterar i att det är svårt att utläsa något form av samband. Eftersom varje fall är unikt är det inte troligt att beräkningar och uppmätta värden överensstämmer helt och hållet. Förhoppningen med att utföra både fältmätningar och beräkningar var att dessa skulle överensstämma till stor grad och därigenom få konstaterat att de uppmätta värdena var trovärdiga. Resultaten från fältmätningarna bedöms trots detta vara rimliga eftersom flera mätpunkter valdes på de olika skärmarna och resultaten mellan de olika punkterna stämmer överens till hög grad. Mätresultaten stämmer även överens med den upplevda ljudnivån vid undersökningstillfällena då det var tydligt att glas och tegel dämpade till betydligt högre grad än både fibercementskivor och trä. Detta innebär slutligen att de uppmätta ljudtrycksnivåerna från fältmätningarna anses sannolika.

Undersökningsmetodiken för fältmätningar och analys har flertalet förbättringsmöjligheter. I en fältmätning bör man sträva efter att ha så liknande förhållanden under mätningarna som möjligt. Det är även att föredra normala trafikflöden vilket innebär att en avstängning av vägen inte gynnar mätningen men är trots detta nödvändig. Det hade även varit intressant att placera ut fler mikrofoner och låta dem spela in automatiskt under en längre tid, utan felkällor i form av den mänskliga faktorn. Vidare är det även så att när undersökningen görs ute i fält så påverkas den av betydligt fler faktorer än om ljudreduktionen hade beräknats i ett laboratorium. Det kan dock vara av större intresse att se hur skärmens ljudreducerande förmåga fungerar i praktiken, ute i fält, än i ett laboratorium.

8.5.1 Multikriterieanalys

Multikriterieanalyser är ett lätthanterligt sätt att sammanställa och jämföra olika parametrar. Den största fördelen är att parametrarna i sig inte behöver vara relaterade till varandra utan kan trots detta vägas samman till en total faktor. De utförda analyserna erbjuder dock inte konkreta värden på olika parametrar utan bör enbart användas som en jämförelse. Den slutgiltiga faktorn i multikriterieanalysen är baserad på tidigare beräknade faktorer för ljudreduktion, kostnader och miljö. För att få inblick i varför resultatet av analysen ter sig som det gör måste därför resultaten från de tidigare analyserna tolkas och analyseras allt eftersom.

Det är även viktigt att poängtera att multikriterieanalyser är relativt subjektiva då olika kriterier kan vikts på olika sätt beroende på vem det är som utför analysen. Resultaten kan

därför skilja sig åt för olika fall trots att de ingående parametrarna är desamma. För att analyserna utförda i kapitel 7 ska vara så objektiva som möjligt har nästintill ingen viktning skett. Den enda parametern som är viktad är den slutliga ljudreduktionsfaktorn med förklaring enligt tidigare. Detta innebär att resultaten ur de olika analyserna kan användas och viktas i efterhand från fall till fall. Om några specifika projekt kräver ovanligt hög ljudreduktion kan den parametern i så fall viktas till högre grad. Om ett framtida projekt istället kräver låga kostnader kan kostnadsfaktorn viktas för att påverka resultatet mer. Analyserna kan därför anses mångsidiga och användbara även för fortsatt undersökning.

Valet att utföra multikriterieanalyser som ett verktyg för att hantera resultatet grundade sig i ovanstående faktorer. Analysen ger tydliga jämförelsetal som på ett okomplicerat och lättförståeligt sätt kan användas för att sätta materialen i relation till varandra. Att analysmetoden är mångsidig och användbar även för framtida analyser bidrog även till valet.

8.6 Rekommendation för fortsatt analys

För fortsatt analys och undersökning av olika materials lämplighet för bullerskärmkonstruktioner rekommenderas att fler mätningar utförs vid flera tillfällen samt att flera olika skärmar av samma material undersöks. Det är även eftersträvarvärt att utföra en livscykelanalys med fler miljöindikatorer och med data som är direkt applicerbar på svenska förhållanden. För att Trafikverket ska få ut så mycket som möjligt av en liknande analys rekommenderas vidare att en framtida kostnadsanalys grundas på förfrågningsunderlag från Trafikverket och på offerter från företag som vanligtvis konstruerar skärmar åt Trafikverket.

9 Slutsats och rekommendationer

Den slutliga multikriterieanalysen, där materialens ljudreducerande egenskaper, kostnader och miljöaspekter vägs samman, tyder på att tegel är det mest lämpade materialet för konstruktion av bullerskärmar, följt av trä, fibercementskivor och glas. Utifrån tidigare diskussion kan det dock konstateras att resultatet måste brytas ned och varje delanalys måste betraktas separat för att få en helhetssyn av de olika materialens lämplighet.

Ur analysen angående materialens ljudreducerande egenskaper kan slutsatsen dras att tegel och glas reducerar ljud betydligt bättre än trä och fibercementskivor. Det kan även konstateras att tegel och glas kostar betydligt mer än trä och cementbundna fiberskivor, ett samband mellan kostnad och ljudreduktionsförmåga kan då utläsas. Att en dyrare bullerskärm skulle ha en bättre ljudreduktionsförmåga är dock ingen slutsats som kan dras då det finns många andra faktorer som spelar in på skärmens kostnader. Multikriterieanalysen angående miljöaspekter kopplade till materialen visar att tegel är bäst lämpat ur miljösynpunkt medan de övriga materialen bedöms relativt likvärdiga.

Studien visar även att utformning av bullerskärmar är minst lika viktigt som materialval och att ett samspel mellan flera faktorer leder till bäst ljudreduktion. Enligt den utförda litteraturstudien påverkas effektiviteten hos bullerskärmar bl.a. av skärmens material, avstånd från ljudkälla till skärm, skärmens dimensioner samt täthet. Bullerskärmar bör även placeras så nära ljudkällan som möjligt, konstrueras så att det inte finns några håligheter och av ett material med så hög ytvikt och ljudreduktionstal som möjligt.

Trots en del felkällor i undersökningarna är det tydligt att materialen inte är likvärdiga då de inte har samma egenskaper och bör användas på olika platser och av olika anledning. Många gånger är det inte eftersträvanvärt att uppnå högsta möjliga ljudreduktion utan istället mer relevant att nå en bra balans mellan de undersökta faktorerna. Utifrån ovanstående slutsatser rekommenderas därför tegel och glas främst ur ljudreduktionssynpunkt, trä och fibercementskivor ur kostnadssynpunkt medan samtliga material anses lämpade ur miljösynpunkt. Det bör dock beläggas att dessa resultat är grundade i de parametrar som undersökts och att resultaten hade kunnat se annorlunda ut om fler eller andra faktorer analyserats.

Referenser

- P. Andersson and W. Kropp. *Introduction to Sound and Vibration, Lecture 1*. Division of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Januari 2015a.
- P. Andersson and W. Kropp. *Introduction to Sound and Vibration, Lecture 12*. Division of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Januari 2015b.
- P. Andersson and W. Kropp. *Introduction to Sound and Vibration, Lecture 5*. Division of Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Januari 2015c.
- Patrik Andersson. isv.m, 2011.
Hämtad från http://www.ta.chalmers.se/downloads/students/cpg_isv/isv.m.
- Michael F. Ashby. *Materials and the environment - Eco-informed material choice*. Elsevier INC, 2013.
- Beijer Byggmaterial. Cembrit heavy duty fasad, 2015a.
Hämtad från <http://www.beijerbygg.se/store/privat/byggmaterial/byggskivor/cementbaserade-skivor/cembrit-heavy-duty-fasad-8x1194>.
- Beijer Byggmaterial. Glasskiva till glassräcke adam, 2015b.
Hämtad från <http://www.beijerbygg.se/store/privat/utemilj%C3%B6/sk%C3%A4rmar-staket/staket---r%C3%A4cken/glas-till-glasr%C3%A4cke-adam>.
- Beijer Byggmaterial. Fasadtegel röd spånat mångåligt, 2015c.
Hämtad från <http://www.beijerbygg.se/store/privat/byggmaterial/byggnadsblock---ballast/tegel/fasadtegel-rt380snf-spÅ-mh-rÅd-mÅngÅl-r-004447108>.
- Beijer Byggmaterial. Ytterpanelbräda 22x120mm impregnerad, 2015d.
Hämtad från <http://www.beijerbygg.se/store/privat/trÅdprodukter/ytterpaneler/behandlade-ytterpaneler/ytterpanelbrÅdda-22x120mm-impr-klass-ab>.
- Birgitta Berglund, Thomas Lindvall, and Dietrich H Schwela. *Guidelines for Community Noise*. World Health Organization, 1999.
- Boverket. Hälsa och miljö i byggnader, September 2014.
Hämtad från <http://www.boverket.se/sv/byggande/halsa-och-inomhusmiljo/buller/>.
- Per Gunnar Burström. *Byggnadsmaterial*. Studentlitteratur, 2001.
- Byggbasen. Cembrit heavy duty / mineirt concept, 2008.
Hämtad från http://www.byggbasen.com/prod/cembrit_heavy_duty__minerit_concept/1897.html.
- Cembrit. Minerit normal, Mars 2010.
Hämtad från http://www.cembrit.se/Files/Filer/SE/Broschyr/Br_Minerit_Normal.pdf.

- Daigle. Technical assessment of the effectiveness of noise walls. Technical report, The international institute of noise control engineering, September 1999.
- Muller-BBM Eckard Mommertz. *Acoustics and sound insulation*. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, 2008.
- Folksam. Byggmiljöguide, 2012.
Hämtad från http://www.swedwatch.org/sites/default/files/byggmiljoguide_folksam_2012.pdf.
- Google Maps. Karta Göteborg, 2015.
Hämtad från <https://www.google.se/maps/@57.6898794,11.9835796,12z>.
- Government of the Hong Kong SAR. Guidelines on design of noise barriers, January 2003.
Hämtad från http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/noise/guide_ref/files/barrier_leaflet.pdf.
- Göteborgs Stad Trafikkontoret. Bullerskydd, 2013.
Hämtad från [http://th.tkgbg.se/th_20132/sv-se/planering/utformning/utrustning\(v%C3%A4gochgatuutrustning\)/bullerskydd.aspx](http://th.tkgbg.se/th_20132/sv-se/planering/utformning/utrustning(v%C3%A4gochgatuutrustning)/bullerskydd.aspx).
- Hammerglass. Bullerskydd och bullerskärmar för det moderna samhället, 2015.
Hämtad från <http://www.hammerglass.se/affarsomraden/bullerskydd/>.
- Institut Bauen und Umwelt. Environmental product declaration, Mars 2012.
Hämtad från http://www.cembrit.se/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiler%2fSE%2fSakerhetsdatablad_BVD%2fEPD-CEM-2012111-E-Cladding.pdf.
- B. Kotzen. *Environmental Noise Barriers : Guide to their Visual and Acoustic Design*. CRC Press, 1998.
- Naturvårdsverket, 2014.
Hämtad från <http://www.naturvardsverket.se/Amnen/Buller/>.
- Nordicwood. *Bullerskärmar av trä*. Träinformation Sverige AB, 1998.
- Pilkington Floatglas AB. Pilkington glasfakta 2012, 2012.
Hämtad från http://www.pilkington.com/resources/seglasfakta2012_bullerskydd.pdf.
- Daniel R. Raichel. *The Science and Applications of Acoustics*. Springer Science+Business Media, 2006.
- RTA. Noise wall design guidelines, November 2006.
Hämtad från <http://www.rms.nsw.gov.au/documents/projects/planning-principles/urban-design/noise-wall-design-guideline.pdf>.
- Sound Research Laboratories Ltd. *Noise control in industry*. E. F.N. Spon, 1991.

- SP Träteknik. Guiden träskärmar, 2011.
Hämtad från http://www.sp.se/sv/index/research/woodbuild/publications/Documents/SP-INF0%20201150%20Guide_f%C3%B6r_tr%C3%A4sk%C3%A4rmar.pdf.
- Statens Vegvesen. Støyskjermer, December 2008.
Hämtad från http://www.vegvesen.no/_attachment/99460/binary/157658.
- Tegelinformation. Hållbart byggande och tegel, 2009.
Hämtad från <http://www.tegelinformation.se>.
- The architects journal. Fibre cement, 2012.
Hämtad från <http://www.architectsjournal.co.uk/spec/cpd/cpd-fibre-cement/8630648.article>.
- The Nordic Council of Ministers. *Road Traffic Noise: Nordic Prediction Method*. TemaNord, 1996.
- Trafikverket. *Väg- och gatuutrustning 7 Bullerskydd*. VV Publikation, 2004.
- Trafikverket. *Trafikverket och vårt arbete med buller*, volume Upplaga: 2. December 2012.
- Trafikverket. Miljöanpassning av genomsiktliga skärmar för fåglar, Oktober 2013.
Hämtad från http://www.trafikverket.se/PageFiles/101360/temablad_miljo_glasskarmar_sept_2013.pdf.
- Träguiden. Utformning av bullerskärmar, Augusti 2006a.
Hämtad från <http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=2920>.
- Träguiden. Utformning av bullerskärmar, Juli 2006b.
Hämtad från <http://traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=876>.
- Träguiden. Bullerskärmar, September 2006c.
Hämtad från <http://traguiden.episerverhosting.com/planering/planera-ett-trabygge/bullerskarmar/bullerskarmar-och-andra-utomhuskonstruktioner/bullerskarmar/>.
- Träguiden. Utomhuskonstruktioner - generellt, Augusti 2006d.
Hämtad från <http://www.traguiden.se/TGtemplates/popup1spalt.aspx?id=1448>.
- Träguiden. Naturlig beständighet, 2014.
Hämtad från <http://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-egenskaper/bestandighet1/naturlig-bestandighet/>.
- Svenska Kommunförbundet Vägverket. *Vägar och gators utformning*. Vägverket, 2004.
- L. Åkerlöf and U. Byman. *Skönheten och oljudet - handbok i trafikbuller*. Svenska Kommunförbundet 1998, 1999.

Bilagor

A Nordic Prediction Method

Beräkningarna för Nordic Prediction Method (The Nordic Council of Ministers, 1996) är utförda med ingående parametrarna enligt följande: fordonens hastighet v [km/h], antalet lätta och tunga fordon N_{light}, N_{heavy} , mättiden T [s], avståndet till vägkant längs normalen a [m], höjden för mottagaren i förhållande till det reflekterade planet h_m [m], vägens höjd relativt det reflekterade planet h_b [m], den längsta sträckan till vägslut d [m], hård eller mjuk mark, vinkeln för vilken vägen undersöks α [°], gradienten för vägen G [%], halva avståndet mellan de yttre gränserna för de yttre körfälten b [m] och om det finns hus på motstående sida av skärmen. Se bilaga A för fullständig beräkningsgång.

Den ekvivalenta ljudtrycksnivån bestäms enligt The Nordic Council of Ministers (1996) genom

$$L_{Aeq} = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \quad (A.1)$$

där L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 är delmomentens grundläggande ljudnivå, avståndskorrigerig, mark- och skärmkorrigerig, övriga korrigeringar och fasadkorrigerig. Genom dessa delmoment och korrigeringar fås den ekvivalenta ljudtrycksnivån L_{Aeq} enligt Nordic Prediction Method.

L_1

Den grundläggande ljudnivån beräknas genom att ta hänsyn till hastigheten, trafikflödet, fordonstyper och mättid. Det görs två separata beräkningar för lätt och tung trafik som sedan vägs samman i en ljudtrycksnivå. Referensvärden för lätt trafik, $L_{Aeq10light}$, och tung trafik, $L_{Aeq10mheavy}$, tas fram genom

$$\begin{aligned} L_{Aeq10m\text{light}} &= 73.6 + 30 \log_{10} \left(\frac{v}{50} \right) \\ L_{Aeq10m\text{heavy}} &= 81 + 20 \log_{10} \left(\frac{v}{50} \right) \end{aligned} \quad (A.2)$$

där 50 är referenshastigheten enligt The Nordic Council of Ministers (1996). Därefter görs en korrigerig för hur stor andel som är lätt- respektive tung trafik. Detta görs genom följande ekvationer:

$$\begin{aligned} L_{Aeq\text{light}} &= L_{Aeq10m\text{light}} + \log_{10} \left(\frac{N_{light}}{T} \right) \\ L_{Aeq\text{heavy}} &= L_{Aeq10m\text{heavy}} + \log_{10} \left(\frac{N_{heavy}}{T} \right) \end{aligned} \quad (A.3)$$

där $L_{Aeq\text{light}}$ och $L_{Aeq\text{heavy}}$ är det korrigerade värdet. Slutligen vägs detta samman till:

$$L_1 = 10 \log_{10} (10^{L_{Aeq\text{light}}/10} + 10^{L_{Aeq\text{heavy}}/10}) \quad (A.4)$$

som är den grundläggande ljudnivån L_1 .

L_2

Avståndskorrigeringen tar hänsyn till avståndet mellan källan och mottagaren och korrigerar med hänsyn till det totala avståndet mellan mottagare och källa inklusive höjdskillnader.

Vid större avstånd kan vägen ses som en linjekälla (The Nordic Council of Ministers, 1996). Avståndskorrigeringen L_2 beräknas enligt

$$L_2 = -10 \log_{10} \left(\frac{\sqrt{a^2 + (h_m - h_b - 0.5)^2}}{10} \right); \quad (\text{A.5})$$

där det är antaget att källan är 0.5 m över marken enligt The Nordic Council of Ministers (1996).

L₃

Mark- och skärmkorrigerings används för att behandla markens och skärmens inverkan på ljudtrycket (The Nordic Council of Ministers, 1996). I detta fall tas ingen hänsyn till en upphöjd vägbana eller en bullerskärm, detta då det inte finns i något av undersökningsobjekten. Därav räknas endast korrigeringen från marken.

För markens korrigerings används parametrar för källan och mottagarens position samt avståndet från väglut till mottagaren. För beräkningarna på de valda undersökningsobjekten är det ett krav att $h_b \leq 1.5$. Korrigeringen avgörs sedan av marktypen, hård eller mjuk, och faktorn σ som är:

$$\sigma = \frac{d'}{10 \cdot h_m}, \text{ där } d' = d \cdot 10^{-0.3 \cdot h_b} \quad (\text{A.6})$$

där h_m sätts till 2 om $h_m < 2$ och $h_b \geq 0$ m.

Korrigeringen bestäms sedan enligt The Nordic Council of Ministers (1996) av:

$$\begin{aligned} L_m &= 0, \text{ för hård mark} \\ L_m &= -6 \log_{10} \left(\frac{\sigma^2}{1 + 0.01 \cdot \sigma^2} \right), \text{ för mjuk mark, } \sigma > 1 \\ L_m &= 0, \text{ för mjuk mark, } \sigma \leq 1 \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

där L_m blir L_3 .

L₄

De övriga korrekctionerna kan delas in i nio olika fall. Dessa läggs sedan ihop till L_4 enligt:

$$L_4 = \Delta L_\alpha + \Delta L_{ts} + \Delta L_{st} + \Delta L_{ka} + \Delta L_r + \Delta L_{mg} + \Delta L_{ms} + \Delta L_g + \Delta L_b \quad (\text{A.8})$$

där ΔL_α är korrigerings för hur mycket av vägen som är synlig, ΔL_{ts} är korrigerings för tjock skärm, ΔL_{st} är korrigerings för vägens gradient, ΔL_{ka} är korrigerings för om mottagaren är nära vägen, ΔL_r är korrigerings för reflektion från en ensam yta, ΔL_{mg} är korrigerings för multipel reflektion mellan byggnader, ΔL_{ms} är korrigerings för multipla reflektioner i sidogata, ΔL_g är korrigerings för reflektioner i innegårdar och ΔL_b är korrigerings för villor.

Enligt antaganden som gjorts om miljön och situationerna där beräkningarna utförs har ΔL_{ts} , ΔL_r , ΔL_{ms} , ΔL_g och ΔL_b satts till noll.

En korrigerings för hur stor del av vägen som är synlig görs genom att den viktas mot om hela vägen var synlig, med andra ord 180° (The Nordic Council of Ministers, 1996). Detta görs genom följande ekvation:

$$\Delta L_\alpha = 10 \log_{10} \left(\frac{\alpha}{180} \right) \quad (\text{A.9})$$

där α är vinkeln för det som är synligt av vägen i grader.

Gradienten på vägen bidrar till en ökad ljudnivå oavsett om den lutar uppåt eller neråt. Lutar den uppåt är det ett förhöjt motorljud som bidrar och lutar den neråt är det hastigheten. Korrigeringen för detta beräknas enligt:

$$\Delta L_{st} = \frac{2 \cdot G}{180} + \frac{3 \cdot G}{180} \cdot \log_{10}(1 + p) \quad (\text{A.10})$$

där G är gradienten i promille och p är andelen tung trafik i procent som beräknas enligt

$$p = N_{heavy} / (N_{heavy} + N_{light}).$$

Om mottagaren befinner sig nära vägen så kommer det akustiska centrumet enligt The Nordic Council of Ministers (1996) att flytta sig närmre mottagaren då den närmre vägen dominerar. Detta korrigeras med faktorn:

$$\Delta L_{ka} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{2 \cdot b} \sqrt{a^2 + (h_m - h_b - 0.5)^2} \cdot \ln \frac{a + b + \sqrt{(a + b)^2 + (h_m - h_b - 0.5)^2}}{a - b + \sqrt{(a - b)^2 + (h_m - h_b - 0.5)^2}} \right] \quad (\text{A.11})$$

om $2b > a > b$.

Är vägen omgiven av hus måste reflektionen från dessa korrigeras för. Det gör genom att endast räkna på reflektionen från motstående sida. Om det inte finns några hus sätts $\Delta L_{mg} = 0$ samt om $0.35 < (a/b) < 0.75$ ej uppfylls. Korrigeringen beräknas enligt:

$$\begin{aligned} \Delta L_{mg} &= \frac{h_m}{3 \cdot a}, & \Delta L_{mg} &\leq 2 \\ \Delta L_{mg} &= 2, & \Delta L_{mg} &> 2 \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

för reflektionen från motstående fasad.

L₅

Faktorn L_5 beskriver fasadens inverkan på ljudnivån då mottagaren befinner sig i ett hus. Eftersom alla mätningar har utförts utomhus så har denna faktorn satts till noll.

B Kostnadsberäkningar

Alla kostnader är beräknade per kvadratmeter och tjocklek.

Trä:

Pris: 18.45 [kr/lpm]
Mått: 22·120 [mm]
Höjd: $1/0.12=8.34$ [st]
Bredd: $1/1 = 1$ [st]
Djup: $0.022 \cdot 2 \rightarrow 2$ [st]
Antal brädor: $8.34 \cdot 2 = 16.68$ [st]
Totalkostnad: $16.68 \cdot 18.45 = 308$ [kr/m²]

Fibercementskivor:

Pris: 811 [kr/st]
Mått: 8·1195·2600 [mm]
Höjdled: $1/1.195=0.84$ [st]
Bredd: $1/2.5=0.4$ [st]
Djup: $0.008 \cdot 2 \rightarrow 2$ [st]
Antal skivor: $0.4 \cdot 0.84 \cdot 2=0.67$ [st]
Totalkostnad: $0.67 \cdot 811 = 543$ [kr/m²]

Glas:

Pris: 2095 [kr/st]
Mått: 900·1025 [mm]
Höjdled: $1/0.9=1.11$ [st]
Bredd: $1/1.025=0.977$ [st]
Djup: 1 [st]
Antal tegelstenar: $0.977 \cdot 1.11=1.0845$ [st]
Totalkostnad: $1.0845 \cdot 2095=2272$ [kr/m²]

Tegel:

Pris: 13.90 [kr/st]
Mått: 250·120·62 [mm]
Höjdled: $1/0.062=16.13$ [st]
Bredd: $1/0.12=8.34$ [st]
Djup: $0.25/0.25=1$ [st]
Antal tegelstenar: $16.13 \cdot 8.34=134.5$ [st]
Totalkostnad: $16.13 \cdot 8.34 \cdot 13.9=1869$ [kr/m²]

C Resultat fältmätningar

Nedanstående tabell visar samtliga resultat från fältmätningarna. Under kommentarer står (x/y) för (antal personbilar/antal tunga fordon).

Resultat av fältmätningar

Filnamn	Kommentar	L_Aeq1	L_Aeq2	A dämpning	L_eq1	L_eq2	dämpning
glas_1	(20/4)	33,4452	69,8636	36,4184	40,7616	78,2064	37,4448
glas_2	(13/5)	33,6447	70,8489	37,2042	40,5178	77,8662	37,3484
glas_3	(14/4)	34,062	73,7649	39,7028	39,9552	77,482	37,5267
glas_4	vid krossad ruta (21/2)	72,5921	83,5665	10,9744	78,6779	90,1988	11,5208
glas_5	vid springa (21/1)	33,3712	70,8079	37,4367	38,9201	74,6737	35,7536
fiber_1	(29/3)	66,2642	81,4221	15,1579	72,2552	84,6523	12,3972
fiber_2	högt upp (33/5)	72,7186	45,9364	26,7822	77,3046	54,5084	22,7962
fiber_3	fel fel	fel	fel	fel	fel	fel	fel
fiber_4	nere vid kant (20/2)	65,4138	75,6635	10,2498	75,2291	84,216	8,9869
fiber_5	vid hål (20/1)	71,0731	72,6993	1,6263	78,3917	78,4652	0,0735
fiber_6	1 m över hål (28/3)	66,2666	82,6569	16,3903	75,6716	88,4994	12,8278
tegel_1	(8/0)	45,3763	92,0738	46,6976	53,7444	96,8755	43,1311
tegel_2	(3/0)	49,4992	98,2019	48,7027	56,9764	98,8348	41,8584
tegel_3	(3/2)	51,1706	98,7961	47,6255	60,4128	101,455	41,0422
tegel_4	(6/0)	86,4374	94,284	7,8466	87,8846	99,8883	12,0037
tra_1	(15/2)	64,4188	74,7427	10,3239	76,7679	81,4944	4,7265
tra_2	anslutning skiva pelare, en bil på andra sidan (14/0)	81,3835	87,0856	5,7022	90,9856	96,5211	5,5355
tra_3	2.9 m högt (19/1)	56,4985	65,6384	9,1398	66,8063	73,9494	7,1431
tra_4	nere vid fäste mark (15/1)	52,8371	62,3284	9,4913	67,6857	74,9723	7,2866
tra2_1	mellan två hål (14/0)	69,4565	79,4773	10,0208	75,0239	81,3709	6,3471
tra2_2	(9/1)	65,0487	74,9835	9,9349	77,4457	82,2438	4,7981
tra2_3	vid hål (12/1)	92,7166	86,3197	6,3969	100,3472	100,0959	0,2514

D Matlab-skript

```
1 %~~~~~
2 % Recording
3 %~~~~~
4 % Script for recording sound for examination of noise and how screens
5 % effect it.
6 %     spectrogram
7 %
8 % Parts of the script are from a script, 'isv.m', written by Patrik Hstmad
9 % former
10 % Andersson and are used with promition including the function file.
11 % The sections which are from 'isv.m' are marked with the
12 % comment: 'isv.m PA'.
13 %~~~~~
14 clear all
15 close all
16 clc
17 %~~~~~
18 % User defined parameters
19 %~~~~~
20 prompt={'Recording time [sec]:',...
21         'A-weighted (1=yes / 0=no):',...
22         'Number of recordings:',...
23         'Name of recordings:'};
24 name='Recording';
25 numlines=1;
26 def = {'30','1','10','rec_%d'};
27 answer=inputdlg(prompt,name,numlines,def);
28 recTime=eval(char(answer(1))); % length of recording in seconds
29 flag_Aweight=eval(char(answer(2))); % A-weighting of the spectrogram (0='no' /
30     l='yes')
31 recnumber=eval(char(answer(3))); % number of savings
32 recname=char(answer(4)); % names of the savings
33 pref=20e-6; % Reference pressure 20 micro Pa
34 Lpshift1 = 94.4-49.78; % Calibration factor in dB black
35 Lpshift2 = 94.4-33.18; % blue 66.48
36
37 for k = 1:recnumber % for-loop for number of recordings
38     start = sprintf('Recording %d',k);
39     disp(start)
40 %~~~~~
41 % Record signal 'isv.m PA'
42 %~~~~~
43 fs = 44100; % sampling frequency [Hz]
44
45 recObj = audiorecorder(fs,16,2); % create an AUDIORECORDER object
46
47 pause(0.5) % initial pause
48 disp('Start of recording.')
49 recordblocking(recObj, recTime); % records for length of time, recTime
50 disp('End of recording.');
```

```
51 s=getaudiodata(recObj,'double'); % extract the recorded data
```

```

52 %~~~~~
53 % Save all the data in the workspace, as user input
54 %~~~~~
55
56     c = {sprintf(recname,k)};
57     str = sprintf('save %s.mat',c{:});
58     eval(str);
59     if k < recnumber
60         disp('Press any key to continue')
61         pause
62     end
63 end

```

```

1 %~~~~~
2 % Calibration
3 %~~~~~
4 % Script that calculates and calibrates the recorded sound.
5 %
6 % cali_1 134.1 dB(A)
7 % cali_2 101.3 dB(A)
8 %
9 % Parts of the script are from a script, 'isv.m', written by Patrik Hstmad
   former
10 % Andersson and are used with promition including the function file
11 % 'R_Aweight.m'. The sections which are from 'isv.m' are marked with the
12 % comment: 'isv.m PA'.
13 %~~~~~
14 clear all
15 close all
16 clc
17 %~~~~~
18 % Load the recording
19 %~~~~~
20 prompt={'Recording name: '};
21 name='Load Recording';
22 numlines=1;
23 def = {'rec_1'};
24 answer=inputdlg(prompt,name,numlines,def);
25 c = {char(answer(1))};
26 str = sprintf('load %s',c{:});
27 eval(str);
28
29 %~~~~~
30 % Calibration – input values 'isv.m PA'
31 %~~~~~
32 pref=20e-6; % Reference pressure 20 micro Pa
33 Lpshift2 = 94.4-(72.93); % Calibration factor in dB black 49.78 %%72.93
34 Lpshift1 = 94.4-(56.72); % blue 66.48 %%56.72
35
36 %~~~~~
37 % Time vector
38 %~~~~~
39 dt = 1/fs; % time step 'isv.m PA'
40 t = [0:length(s)-1]*dt; % time vector 'isv.m PA'
41 s1 = s(:,1);
42 s2 = s(:,2);
43 %~~~~~
44 % Correcting signal with calibration factor
45 %~~~~~
46 calfact1=10^((Lpshift1)/20); % The scale factor from dB to linear quantity
47 calfact2=10^((Lpshift2)/20); % 'isv.m PA'
48 % From voltage signal s to sound pressure p 'isv.m PA'
49 p1 = s1.*calfact1;
50 p2 = s2.*calfact2;
51 valj=1; % 1 = isolation of recording
52 tid1=6; % start time
53 tid2=16; % stop time
54 if valj == 1
55 p1 = p1(find(t==tid1):find(t==tid2));

```

```

56 p2 = p2(find(t==tid1):find(t==tid2));
57 t = t(find(t==tid1):find(t==tid2));
58 end
59 %~~~~~
60 % Spectraum and level 'isv.m PA'
61 %~~~~~
62 Pd1=fft(p1)/length(p1); % Spectrum by FFT, scaled to amplitude spectrum
63 P1=[Pd1(1); 2*Pd1(2:round(length(p1)/2))]; % From double sided to single sided
    spectrum
64
65 df=fs/length(Pd1); % Frequency resolution
66 f=(0:length(P1)-1)*df; % Frequency vector
67 %~~~~~
68 % A-weight 'isv.m PA'
69 %~~~~~
70 pressA1=R_Aweight(f).*P1';
71 Lp1=20*log10(abs(pressA1)./pref);
72 Lptot1=0;
73 %Aweight plot
74 for i=1:length(Lp1)
75     Lptot1=10*log10(10^(Lptot1/10) + 10^(Lp1(i)/10) );
76 end
77
78 %~~~~~
79 % Spectraum and level 'isv.m PA'
80 %~~~~~
81 Pd2=fft(p2)/length(p2); % Spectrum by FFT, scaled to amplitude spectrum
82 P2=[Pd2(1); 2*Pd2(2:round(length(p2)/2))]; % From double sided to single sided
    spectrum
83
84 df2=fs/length(Pd2); % Frequency resolution
85 f2=(0:length(P2)-1)*df2; % Frequency vector
86 %~~~~~
87 %A-weight 'isv.m PA'
88 %~~~~~
89 pressA2=R_Aweight(f).*P2';
90 Lp2=20*log10(abs(pressA2)./pref);
91 Lptot2=0;
92 %Aweight plot
93 for i=1:length(Lp2)
94     Lptot2=10*log10(10^(Lptot2/10) + 10^(Lp2(i)/10) );
95 end
96 %~~~~~
97 % Save all the data in the workspace, as user input
98 %~~~~~
99
100     str = sprintf('save %s_cali.mat',c{:});
101     eval(str);
102     stp = sprintf('%s_cali',c{:});
103 disp('Calibration Done for ')
104 disp(stp)

```

```

1 function RA=R_Aweighth(f)
2
3 % R_Aweighth, values for A-weighting
4 % R_Aweight(f) gives the linear A-weighting values for
5 % each frequency specified by f, e.g.
6 %
7 % pressA=R_Aweight(freq).*press;
8 %
9 % applies the A-weighting to the pressure spectrum 'press'
10 % and its corresponding frequency vector 'freq'
11 %
12 % the levels in dB(A) is plotted as
13 %
14 % plot(f,20*log10(abs(pressA./pref)))
15 %
16 % A program by Patrik Hstmad former Andersson
17 % PA 021101
18
19 if nargin==1
20     RA=12200^2*f.^4./((f.^2+20.6^2).*(f.^2+12200^2).*sqrt(f.^2+...
21         107.7^2).*sqrt(f.^2+737.9^2))./(12200^2*1000.^4./...
22         ((1000.^2+20.6^2).*(1000.^2+12200^2).*sqrt(1000.^2+107.7^2).*sqrt
23             (1000.^2+737.9^2)));
24 else
25     disp('To many or few input arguments')
26 end

```



```

1 %~~~~~
2 % Plots
3 %~~~~~
4 % Script that plots the recorded sound.
5 %
6 %
7 %~~~~~
8 clear all
9 clf
10 close all
11 clc
12 valj = 1;
13 %~~~~~
14 % Load the recording
15 %~~~~~
16 prompt={'Recording name: '};
17 name='Load Recording';
18 numlines=1;
19 def = {'tra2_2_cali'};
20 answer=inputdlg(prompt,name,numlines,def);
21 cc = {char(answer(1))};
22 strc = sprintf('load %s',cc{:});
23 eval(strc);
24
25 if sum(p1>0)>sum(p2>0)
26     plot11 = real(20*log10((p1./pref)));
27     plot12 = real(20*log10((p2./pref)));
28     plot21 = p1;
29     plot22 = p2;
30 else
31     plot11 = real(20*log10((p2./pref)));
32     plot12 = real(20*log10((p1./pref)));
33     plot21 = p2;
34     plot22 = p1;
35 end
36
37 %~~~~~
38 % Equivalent sound pressure level
39 %~~~~~
40 disp('Ekvivalent A-viktad ljudtrycksniv')
41 disp('L_Aeq1:')
42 disp(Lptot1)
43 disp('L_Aeq2:')
44 disp(Lptot2)
45 disp('D mpning:')
46 disp(abs(Lptot2-Lptot1))
47
48 pref = 20*10^(-6);
49 L1 = 20*log10(abs(p1/pref));
50 L2 = 20*log10(abs(p2/pref));
51 L_eq1 = 10*log10(1/(length(L1))*sum(10.^(L1./10)));
52 L_eq2 = 10*log10(1/(length(L2))*sum(10.^(L2./10)));
53 disp('Ekvivalent total ljudtrycksniv')
54 disp('L_eq1:')
55 disp(L_eq1)
56 disp('L_eq2:')

```

```

57 disp(L_eq2)
58 disp(' Dmpning : ')
59 disp(abs(L_eq2-L_eq1))
60 %~~~~~
61 % Figures
62 %~~~~~
63 %
64 % Sound pressure p(t)
65 %~~~~~
66
67 stt = sprintf(' %s ',cc{:});
68 stt(stt=='_')=' ';
69
70 figure(1)
71 hold on
72 plot(t,plot11,'red')
73 plot(t,plot12,'blue')
74 set(gca,'FontName','Times')
75 set(gca,'FontSize',16)
76 xlabel('Time t [s]')
77 ylabel('Sound Pressure Level SPL(t) [dB]')
78 legend('red','blue')
79 title(stt);
80
81 figure(2)
82 hold on
83 plot(t,plot21,'red')
84 plot(t,plot22,'blue')
85 set(gca,'FontName','Times')
86 set(gca,'FontSize',16)
87 xlabel('Time t [s]')
88 ylabel('Sound Pressure p(t) [Pa]')
89 legend('red','blue')
90 title(stt);

```

```

1 %~~~~~
2 %           The Nordic Prediction Method calculation program
3 %
4 %   The program consist of a function file which do all the calculations
5 %   and the script is used to call the function. It is also here that the
6 %   paramerers are put in.
7 %
8 %   The result of the program is a ekvivalent sound pressure level , L_Aeq,
9 %   for the given case.
10 %
11 %   Input parameters
12 %   - v, The speed of the vehicles
13 %   - N_light, The number of light vehicles
14 %   - N_heavy, The number of heavy vehicles
15 %   - T, The duration time
16 %   - a, The distance along the normal to the road
17 %   - hm, The hight of the receiver relative the plane of reflection
18 %   - hb, The hight of the road relative the palne of reflection
19 %   - d, The longest distance of calculations to the end of the road
20 %   - ground, 1='hard', 0='soft'
21 %   - alpha, The angel of which the road is under study
22 %   - G, The gradient of the road in per mille "0/00"
23 %   - b, Half the distance between the outer bondarries of the outer lanes
24 %   - house, is there buildings on the opposite side 1=yes, 0=no
25 %~~~~~
26 clear all
27 clf
28 close all
29 clc
30
31 prompt={...
32 'The speed of the vehicles "km/h":' ,...
33 'The number of light vehicles:' ,...
34 'The number of heavy vehicles:' ,...
35 'The duration time "sec":' ,...
36 'The distance along the normal to the road "m":' ,...
37 'The hight of the receiver relative the plane of reflection "m":' ,...
38 'The hight of the road relative the palne of reflection "m":' ,...
39 'The longest distance of calculations to the end of the road "m":' ,...
40 'Ground type, 1="hard", 0="soft":' ,...
41 'The angel of which the road is under study "deg":' ,...
42 'The gradient of the road in per mille "0/00":' ,...
43 'Half the distance between the outer bondarries of the outer lanes "m":' ,...
44 'Is there buildings on the opposite side? 1 = yes 0 = no'};
45 name='The Nordic Prediction Method';
46 numlines=1;
47 def = {'50','20','5','30','5','2','1','20','1','180','0','2','1'};
48 answer=inputdlg(prompt,name,numlines,def);
49 v = eval(char(answer(1)));
50 N_light = eval(char(answer(2)));
51 N_heavy = eval(char(answer(3)));
52 T = eval(char(answer(4)));
53 a = eval(char(answer(5)));
54 hm = eval(char(answer(6)));
55 hb = eval(char(answer(7)));
56 d = eval(char(answer(8)));

```

```

57 ground = eval(char(answer(9)));
58 alpha = eval(char(answer(10)));
59 G = eval(char(answer(11)));
60 b = eval(char(answer(12)));
61 house = eval(char(answer(13)));
62
63 [L_Aeq]=nordicpredictionmethod(v,N_light,N_heavy,T,a,hm,hb,d,ground,...
64     alpha,G,b,house);
65
66 disp('The ekvivalent sound pressure is:')
67 disp(L_Aeq)

```

```

1 function [L_Aeq]=nordicpredictionmethod(v,N_light,N_heavy,T,a,hm,hb,d,ground,
    alpha,G,b,house)
2 %~~~~~
3 %% Nordic Prediction Method, nordicpredictionmethod.m
4 %
5 % This function calculates with the Nordic Prediction Method the values of
6 % the equivalent sound pressure level and the maximal sound pressure level.
7 %
8 % The outgoing values are:
9 %   - L_Aeq, The equivalent sound pressure level
10 %
11 % The ingoing values are:
12 %   - v, The speed of the vehicles
13 %   - N_light, The number of light vehicles
14 %   - N_heavy, The number of heavy vehicles
15 %   - T, The duration time
16 %   - a, The distance along the normal to the road
17 %   - hm, The hight of the receiver relative the plane of reflection
18 %   - hb, The hight of the road relative the palne of reflection
19 %   - d, The longest distance of calculations to the end of the road
20 %   - ground, 1='hard', 0='soft'
21 %   - alpha, the angel of which the road is under study
22 %   - G, tha gradient of the road in per mille "0/00"
23 %   - b, half the distance between the outer bondaries of the outer lanes
24 %
25 % Definition of variables/steps:
26 %   - L1, Basic nois level
27 %   - L2, Distance correcctions
28 %   - L3, Ground and barrier correction
29 %   - L4, Other corrections
30 %   - L5, Facade correction
31 %
32 %
33 %
34 %
35 %~~~~~
36
37 %~~~~~
38 %% The Basic Noise Level
39 % L1
40 %
41 % Variables
42 %   - L_Aeq10mlight, The reference value for light vehicles
43 %   - L_Aeq10mheavy, The reference value for heavy vehicles
44 %   - v, The speed of the vehicles
45 %   - L_Aeqlight, The correction for light vehicles
46 %   - L_Aeqheavy, The correction for heavy vehicles
47 %   - N_light, The number of light vehicles
48 %   - N_heavy, The number of heavy vehicles
49 %   - T, The duration time
50 %~~~~~
51
52 % Reference value for speeds v=[50 90]
53 L_Aeq10mlight = 73.6 + 30*log10(v/50);
54 L_Aeq10mheavy = 81 + 20*log10(v/50);
55 % Correction for number of light and heavy vehicle

```

```

56 L_Aeqlight = L_Aeq10mlight + log10(N_light/T);
57 L_Aeqheavy = L_Aeq10mheavy + log10(N_heavy/T);
58 L1 = 10*log10(10^(L_Aeqlight/10)+10^(L_Aeqheavy/10));
59
60 %~~~~~
61 %% The Distance Correction
62 % L2
63 %
64 % Variables
65 % - a, The distance along the normal to the road
66 % - hm, The height of the receiver relative the plane of reflection
67 % - hb, The height of the road relative the plane of reflection
68 %~~~~~
69
70 L2 = -10*log10(sqrt(a^2+(hm-hb-0.5)^2)/10);
71
72 %~~~~~
73 %% The Ground and Barrier Correction
74 % L3
75 %
76 % Variables
77 % - d, The longest distance of calculations to the end of the road
78 % - dprim, formula
79 % - ground, 1='hard', 0='soft'
80 %
81 %
82 % This program do not calculated with an elevated road or with a screen,
83 % for it is only used to calculated the sound at the screen.
84 %~~~~~
85
86 if hb <= 1.5
87     dprim = d*10^(-0.3*hb);
88     if hm < 2
89         sigma = dprim/(10*2);
90     else
91         sigma = dprim/(10*hm);
92     end
93     if ground == 1
94         Lm = 0;
95     elseif ground == 0
96         if sigma > 1
97             Lm = -6*log10(sigma^2/(1+0.01*sigma^2));
98         else
99             Lm = 0;
100         end
101     end
102 else
103     disp('road is elevated, use another script')
104 end
105 L3 = Lm;
106 %~~~~~
107 %% Other Corrections
108 % L4
109 %
110 % Variables
111 % -

```

```

112 %~~~~~
113 %      Correction for angel of view
114 %      Lalpha
115 %
116 %      Variables
117 %      - alpha, the angel of which the road is under study
118 %~~~~~
119 Lalpha = 10*log10(alpha/180);
120 %~~~~~
121 %      Correction for thick screen
122 %      Lts
123 %      zero due to no screen
124 %~~~~~
125 Lts = 0;
126 %~~~~~
127 %      Correction for road gradient
128 %      Lst
129 %
130 %      Variables
131 %      - G, tha gradient in per mille "0/00"
132 %      - p, proportion of heav vehicles in percent "0/0"
133 %~~~~~
134 p = N_heavy/(N_heavy+N_light);
135 Lst = (2*G)/180+((3*G)/180)*log10(1+p);
136 %~~~~~
137 %      Correction for short distance to the road
138 %      Lka
139 %
140 %      Variables
141 %      - a, as in L2
142 %      - b, half the distance between the outer bondaries of the outer
143 %      lanes
144 %      - hm and hb, as in L2
145 %~~~~~
146 if a < 2*b
147     Lka = 10*log10((1/(2*b))*sqrt(a^2+(hm-hb-0.5)^2)...
148         *log((a+b+sqrt((a+b)^2+(hm-hb-0.5)^2))/...
149         ((a-b+sqrt((a-b)^2+(hm-hb-0.5)^2))));
150 else
151     Lka = 0;
152 end
153 %~~~~~
154 %      Correction for reflection from a singel surface
155 %      Lr
156 %      Assume there is no singel reflex surface
157 %~~~~~
158 Lr = 0;
159 %~~~~~
160 %      Correction for multiple reflections between buildings
161 %      Lmg
162 %
163 %      Variables
164 %      - a and b, same as Lka
165 %      - hm, same as L2
166 %~~~~~
167 if house == 1

```

```

168     if 0.35 < (a/b) < 0.75
169         Lmg = hm/(3*a);
170         if Lmg > 2
171             Lmg = 2;
172         end
173     else
174         Lmg = 0;
175     end
176 elseif house == 0
177     Lmg = 0;
178 end
179 %~~~~~
180 %      Correction for multiple reflections in side streets
181 %      Lms
182 %      Assume no reflections in side street
183 %~~~~~
184 Lms = 0;
185 %~~~~~
186 %      Correction for multiple reflections in court yards
187 %      Lg
188 %      Assume no reflections from court yards
189 %~~~~~
190 Lg = 0;
191 %~~~~~
192 %      Correction for screening and scattering among detached houses
193 %      Lb
194 %      Assume no detached houses
195 %~~~~~
196 Lb = 0;
197
198 L4 = Lalpha+Lts+Lst+Lka+Lr+Lmg+Lms+Lg+Lb;
199
200 %~~~~~
201 %% The Facade Correction
202 % L5
203 % Assume no facade
204 %~~~~~
205 L5 = 0;
206 %~~~~~
207 %% The Equivalent Sound Pressure
208 % L_Aeq
209 %~~~~~
210
211 L_Aeq = L1+L2+L3+L4+L5;
212
213 end

```