

2017 • 2018
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Luchtdichtheid: onderzoek naar een akoestische schattingsmethode

PROMOTOR :
Prof. Jelle LANGMANS

COPROMOTOR :
Prof. dr. ir. Herve DEGEE

PROMOTOR :
ir. Jan LODDEWYKX

Andrea Belien, Dries Jehoul

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

De transnationale Universiteit Limburg is een uniek samenwerkingsverband van twee universiteiten in twee landen: de Universiteit Hasselt en Maastricht University.



Universiteit Hasselt | Campus Diepenbeek | Agoralaan Gebouw D | BE-3590 Diepenbeek
Universiteit Hasselt | Campus Hasselt | Martelarenlaan 42 | BE-3500 Hasselt



2017 • 2018

Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterthesis

Luchtdichtheid: onderzoek naar een akoestische schattingsmethode

PROMOTOR :

Prof. Jelle LANGMANS

PROMOTOR :

ir. Jan LODDEWYKX

COPROMOTOR :

Prof. dr. ir. Herve DEGEE

Andrea Belien, Dries Jehoul

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde



KU LEUVEN

VOORWOORD

Deze masterproef werd geschreven in het kader van ons afstuderen aan de gezamenlijke opleiding Industriële Ingenieurswetenschappen Bouwkunde aan de Universiteit Hasselt in samenwerking met de Katholieke Universiteit Leuven en in opdracht van het bedrijf Belemco nv, hetgeen deel uitmaakt van de BESIX-groep.

In de eerste plaats bedanken we Prof. dr. ing. J. Langmans en Prof. dr. ir. H. Degée, respectievelijk de promotor en copromotor van deze masterproef, voor hun aangereikte deskundigheid, interessante denk pistes en kritische vragen.

Voorts wensen we ir. J. Loddewyckx, de externe promotor van deze masterproef, te bedanken voor zijn bereidwilligheid om interne informatie met ons te delen en de onafgebroken steun doorheen het onderzoeksproces.

Daarnaast danken we ing. W. Bruyninckx voor de vakkundige assistentie tijdens de geluidsmetingen, het kosteloos aanleveren van professionele meetapparatuur en het permanente enthousiasme.

Tevens bedanken we ing. P. Tryhou voor het vrijmaken van tijd om een uitgebreid werfbezoek te doen, hetgeen ons enorm heeft geholpen met het schrijven van deze masterproef.

Tenslotte willen we graag familie en vrienden bedanken voor hun steun gedurende de laatste inspanningen. In het bijzonder gaat onze dank uit naar Saar Peeters, Anouck Stabel, Wouter Verdickt en uiteraard onze ouders.

SAMENVATTING

In de energieprestatie van gebouwen is luchtdichtheid essentieel. Tegenwoordig wordt de luchtdichtheid bepaald met een pressuratie-test, maar deze proef is vrij duur, weersafhankelijk en wordt typisch uitgevoerd na de afwerkingsfase. Hierdoor wordt het moeilijk om de luchtdichtheid indien nodig te verbeteren. Recente publicaties stellen voor om via geluidsmetingen de luchtdichtheid te schatten [1] [2], hetgeen leidde tot de onderzoeksvraag: zijn geluidsmetingen voldoende nauwkeurig om de luchtdichtheid van een wand te schatten? Om een antwoord te formuleren op deze vraag wordt een tweeledig experiment uitgevoerd, bestaande uit pressuratie-testen en geluidsmetingen met zowel professionele apparatuur als een mobiele applicatie. Na een grondige studie van de relevante aspecten inzake luchtdichtheid en akoestiek in het eerste deel en een analyse van de huidige luchtdichtheidsmaatregelen in het tweede deel, worden in het derde deel van deze masterproef twee akoestische schattingsmethodes geïntroduceerd die de luchtdichtheid van een wand schatten, hetzij op een andere manier, met een gemiddelde afwijking van respectievelijk 0,58% en 21,65%. Hoewel de tweede schattingsmethode behoorlijke afwijkingen vertoont, is dit niet te wijten aan de nauwkeurigheid van de geluidsmetingen. Er wordt vastgesteld dat geluidsmetingen met professionele apparatuur inderdaad voldoende nauwkeurig zijn om de luchtdichtheid van een wand te schatten, hetgeen niet het geval is bij geluidsmetingen met de mobiele applicatie.

ABSTRACT

Airtightness is essential within the context of the energy performance of buildings. Currently, it is measured with a fan pressurisation test. However, this test is quite expensive, weather dependent and carried out after construction, hence lowering the possibility to improve the airtightness if necessary. Recent publications suggest estimating airtightness through acoustics measurements [1] [2], which has led to the following research question: are acoustic measurements sufficiently accurate to estimate the airtightness of a wall? To answer this question a dual experiment is carried out, consisting of fan pressurisation measurements and acoustic measurements with professional equipment as well as a mobile application. After thoroughly studying the relevant aspects of airtightness and acoustics in the first part of this master's thesis and analysing the current airtightness measures in the second part, two estimation methods are introduced that estimate the airtightness of a wall with a deviation of respectively 0,58% and 21,65%. Although the second estimation method deviates considerably, this is not caused by the accuracy of the acoustic measurements. Therefore, it is concluded that acoustic measurements with professional equipment are indeed sufficiently accurate to estimate the airtightness of a wall. However, the acoustic measurements with the mobile application are not.

INHOUDSOPGAVE

LIJST VAN TABELLEN	XI
LIJST VAN FIGUREN.....	XIII
LIJST VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN.....	XVII
1 INLEIDING	1
1.1 Probleemstelling	1
1.2 Onderzoeksvraag.....	2
1.3 Doelstelling en onderzoeksmethode	2
2 LITERATUURSTUDIE	3
2.1 Het belang van luchtdichtheid.....	3
2.1.1 Regelgeving.....	3
2.1.2 Energie.....	5
2.1.3 Comfort	6
2.2 Sleutelconcepten	6
2.2.1 Begrippen	7
2.2.2 Luchtdicht bouwen	9
2.2.3 Luchtstroming door een opening.....	13
2.2.4 Luchtdichtheidsmeetsystemen.....	15
2.2.5 Parameters	17
2.2.6 Standaardisatie.....	21
2.2.7 Prognostische modellen.....	22
2.3 De relatie tussen gebouwakoestiek en luchtdichtheid	24
2.3.1 Akoestische begrippen	24
2.3.2 Transmissiepaden	27
2.3.3 Analytisch verband.....	28
2.3.4 Akoestische toepassingen met betrekking tot luchtinfiltratie	29
Tussentijdse conclusie	32
3 CASESTUDY	33
3.1 Inleiding.....	33
3.1.1 Projectgegevens.....	33
3.1.2 Doel en methode.....	33
3.2 Luchtdichtheid.....	33

3.2.1	Opgelegde eis	33
3.2.2	Blowerdoortest	35
3.2.3	Gehanteerde luchtdichtheidsmaatregelen	36
	Tussentijdse conclusie	44
4	ONDERZOEK	45
4.1	Inleiding.....	45
4.2	Pressuratiemetingen en geluidsmetingen	45
4.2.1	Meetruimte	45
4.2.2	Pressuratiemetingen.....	47
4.2.3	Geluidsmetingen.....	58
4.3	Experimentele akoestische schattingsmethode	68
4.3.1	Gelijktijdige variatie.....	68
4.3.2	Fysische correlatie	70
4.3.3	Experimentele schattingsmethode versus metingen	71
4.4	Theoretische akoestische schattingsmethode	72
4.4.1	Handleiding	73
4.4.2	Schijnbare geluidverzwakkingsindex	73
4.4.3	Theoretische geluidverzwakkingsindex (dubbele wand)	84
4.4.4	Theoretische geluidverzwakkingsindex (enkelvoudige wand).....	90
4.4.5	Invloed van het raam	96
4.4.6	Bepalen van lekoppervlakte, debiet en ventilatievoud	97
4.4.7	Theoretische schattingsmethode versus metingen.....	98
4.5	Discussie	99
4.5.1	Pressuratiemetingen en geluidsmetingen	100
4.5.2	Experimentele akoestische schattingsmethode.....	100
4.5.3	Theoretische akoestische schattingsmethode	101
	Tussentijdse conclusie	103
5	CONCLUSIE	105
	BIBLIOGRAFIE	107
	BIJLAGES	115
	Bijlage A: Positie technische installaties.....	115
	Bijlage B: Plannen project Puurs.....	117
	Bijlage C: Verslag werfbezoek Infiltra.....	120

Bijlage D: Blowerdoorraapport Infiltro.....	124
Bijlage E: Technische fiche Illbruck.....	130
Bijlage F: Blowerproof Liquid	134
Bijlage G: Berekeningen theoretische schattingsmethode.....	137

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Onderscheid 'Luchtdicht' en 'Geluidsdicht'	6
Tabel 2: Vergelijking kubussen.....	11
Tabel 3: Meetmethodes voor luchtdichtheid	17
Tabel 4: Statistische verdeling van de luchtdichtheidsprestaties van de 300 laatste in het laboratorium onderzochte schrijnwerkelementen	18
Tabel 5: Invloedparameters luchtdichtheid	21
Tabel 6: Regularisatie met betrekking tot de luchtdichtheid in Europa	22
Tabel 7: Projectgegevens casestudy	33
Tabel 8: Verwachte lekdebiet o.b.v. de minimale vereiste verluchting	34
Tabel 9: v50-waardes van verschillende metselwerktypes.....	36
Tabel 10: Gegevens meetruimte.....	46
Tabel 11: Resultaten luchtdichtheidsmetingen bij 50 Pa	58
Tabel 12: Geluidsmeting binnen – Stilte	61
Tabel 13: Geluidsmeting binnen – Normale situatie.....	62
Tabel 14: Geluidsmeting binnen – Maatregel 1	63
Tabel 15: Geluidsmeting – Maatregel 2	64
Tabel 16: Geluidsmeting binnen – Maatregel 3	65
Tabel 17: Geluidsmeting buiten	66
Tabel 18: Geluidsmetingen – overzicht.....	68
Tabel 19: Samenvatting metingen.....	70
Tabel 20: Samenvatting metingen.....	72
Tabel 21: Absorptiecoëfficiënt per materiaal	74
Tabel 22: NRC per materiaal.....	74
Tabel 23: Absorptieoppervlakte per materiaal (NRC)	75
Tabel 24: Bepalen equivalente absorptiecoëfficiënt (persoon)	76
Tabel 25: Equivalente absorptiecoëfficiënt per materiaal	77
Tabel 26: Absorptie oppervlakte per materiaal (α_w)	77
Tabel 27: Schijnbare geluidverzwakkingsindex per situatie	79
Tabel 28: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (normale situatie)	81
Tabel 29: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (maatregel 1)	82
Tabel 30: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (maatregel 2)	83
Tabel 31: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (maatregel 3)	84
Tabel 32: Gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex per situatie	84

Tabel 33: Schatting oppervlaktemassa	86
Tabel 34: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (dubbele wand).....	88
Tabel 35: Bepalen gewogen waarde geluidverzwakkingsindex (dubbele wand).....	89
Tabel 36: Eigenschappen van de onderdelen	92
Tabel 37: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (enkelvoudige wand).....	94
Tabel 38: Bepalen gewogen waarde geluidverzwakkingsindex (enkelvoudige wand)	95
Tabel 39: Resultaten berekening lekoppervlakte, debiet en ventilatievoud	98
Tabel 40: Vergelijking schatting versus meting	99
Tabel 41: Positie technische installaties	116

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Beschikbare statistieken gebouwenpark in België op de luchtdoorlatendheidschaal	5	
Figuur 2: Onafscheidelijk trio	5	
Figuur 4: Oorzaken van luchtinfiltratie	7	
Figuur 5: Meestvoorkomende plaatsen van luchtlekken	8	
Figuur 6: Categoriëatie luchtpaden.....	9	
Figuur 7: Beschermd volume - Schematische weergave.....	10	
Figuur 8: Vergelijking kubussen	10	
Figuur 9: Positionering leidingen binnen beschermd volume	12	
Figuur 10: Isofoonlijnen.....	25	
Figuur 11: Transmissiepaden	28	
Figuur 12: Schematische weergave functies + plaats waar luchtdichtheidseis van toepassing is	34	
Figuur 13: Aangepast beschermd volume	35	
Figuur 14: Bepfeistering dagkant binnenmuur	37	
Figuur 15: Luchtdichte verbindingen aan de muurvoet.....	37	
Figuur 16: Luchtdichte verbindingen met het schrijnwerk	38	
Figuur 17: Doorsnede bekisting	39	
Figuur 18: Toepassing van een luchtdichte coating	39	
Figuur 19: Toepassing Blowerproof Liquid op betonstenen en ter plaatse gestort beton	39	
Figuur 20: Bevestiging van slabben op een kale muur.....	40	
Figuur 21: Bevestiging van slabben op een bepleisterd muur.....	40	
Figuur 22: Bevestiging van polyethyleenfilm	41	
Figuur 23: Aanbrengen van de folie in de praktijk.....	41	
Figuur 24: Toepassing van PUR	42	
Figuur 25: Aansluiting mantelbuizen m.b.v. luchtdichte mof.....	42	
Figuur 26: Aansluiting mantelbuis in de praktijk.....	43	
Figuur 27: Luchtdichting liftdeuren	43	
Figuur 28: Buitenkant woning	Figuur 29: Binnenkant meetruimte.....	46
Figuur 30: Grondplan meetruimte	46	
Figuur 31: Illustratie buitenkant meetruimte	47	
Figuur 32: Illustratie binnenkant meetruimte	47	
Figuur 33: Plaatsing Blowerdoortoestel in meetruimte	48	
Figuur 34: Tesa® ducttape als luchtdichtheidsmaatregel.....	48	
Figuur 35: Illustratie overdruk	Figuur 36: Illustratie onderdruk	49

Figuur 37: Normale situatie.....	50
Figuur 38: Resultaat – Overdruk (Normale situatie).....	50
Figuur 39: Resultaat - Onderdruk (Normale situatie).....	51
Figuur 40: Maatregel 1	52
Figuur 41: Resultaat – Overdruk (Maatregel 1)	52
Figuur 42: Resultaat - Onderdruk (Maatregel 1).....	53
Figuur 43: Maatregel 2	54
Figuur 44: Resultaat – Overdruk (Maatregel 2)	54
Figuur 45: Resultaat – Onderdruk (Maatregel 2)	55
Figuur 46: Maatregel 3	56
Figuur 47: Resultaat – Overdruk (Maatregel 3)	56
Figuur 48: Resultaat – Onderdruk (Maatregel 3)	57
Figuur 49: Overzicht – Gemiddeld debiet	58
Figuur 50: Illustratie akoestische metingen.....	59
Figuur 51: Meetopstelling van akoestische metingen	59
Figuur 52: Stelling met twee geluidsbronnen (roze ruis)	60
Figuur 53: Geluidsmeting buiten.....	60
Figuur 54: Geluidsmeting binnen – Stilte	61
Figuur 55: Geluidsmeting binnen - Normale situatie	62
Figuur 56: Geluidsmeting binnen - Maatregel 1	63
Figuur 57: Geluidsmeting binnen - Maatregel 2	64
Figuur 58: Geluidsmeting binnen - Maatregel 3	65
Figuur 59: Geluidsmeting buiten.....	66
Figuur 60: Gelijktijdige variatie	70
Figuur 61: Fysische correlatie	71
Figuur 62: Verschuiving referentiecurve (persoon)	76
Figuur 63: Meting 1 - Nagalmtijd (Audacity)	77
Figuur 64: Meting 2 - Nagalmtijd (Audacity)	78
Figuur 65: Verschuiving referentiecurve (normale situatie)	80
Figuur 66: Verschuiving referentiecurve (maatregel 1)	81
Figuur 67: Verschuiving referentiecurve (maatregel 2)	82
Figuur 68: Verschuiving referentiecurve (maatregel 3)	83
Figuur 69: Doorsnede wand	85
Figuur 70: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (dubbele wand)	88

Figuur 71: Verschuiving referentiecurve (dubbele wand).....	89
Figuur 72: Staat van het metselwerk	90
Figuur 73: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (enkelvoudige wand)	94
Figuur 74: Verschuiving referentiecurve (enkelvoudige wand).....	95
Figuur 75: Vergelijking van raamkozijnen (aluminium, hout, pvc).....	96

LIJST VAN AFKORTINGEN EN SYMBOLEN

Afkortingen

ACH ₅₀	Air changes per hour
AIVC	Air Infiltration and Ventilation Centre
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BEN	Bijna-energieneutraal
CALE	Construire avec l'énergie
CEN	Europees Comité voor Normalisatie
CFD	Computational Fluid Dynamics
EPBD	Energy Performance of Building Directive
EPB	Energieprestatie en Binnenklimaat
EPC	Energieprestatiecertificaat
ISO	Internationale Organisatie voor Standaardisatie
NAH	Nearfield Acoustic Holography
NBN	Bureau voor Normalisatie
NRC	Noise Reduction Coefficient
NZEB	Nearly Zero Energy Buildings
PUR	Polyurethaan
PVC	Polyvinylchloride
SBR	Stichting Bouwresearch
SENSIVV	Studie van Energieaspecten van Nieuwbouwwoningen in Vlaanderen
STS	Spécifications Techniques/Technische Specificaties
VEA	Vlaams Energieagentschap
WTCB	Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf

Symbolen - Luchtdichtheid

<u>Symbool</u>	<u>Beschrijving</u>	<u>Eenheid</u>
A	Oppervlakte van de opening	m^2
A_t	Verliesoppervlakte	m^2
BV	Beschermd volume	m^3
b	Constante die afhangt van de diameter van de opening	-
C	Compactheid	-
C	Stromingscoëfficiënt	m^3/hPa^n
C_d	Weerstandsgetal	-
C_∞	Weerstandsgetal bij een oneindig groot Reynoldsgetal	-
n	Stromingsexponent	-
n_{50}	Ventilatievoud bij 50 Pa	$1/h$
ΔP	Drukverschil	Pa
ρ	Massadichtheid van lucht $[\frac{kg}{m^3}]$	kg/m^3
Re	Reynoldsgetal	-
\dot{V}	Luchtdebiet	m^3/h
V_{50}	Lekdebiet bij 50 Pa	m^3/h
v_{50}	Referentiedrukverschil bij 50 Pa	$m^3/(h \cdot m^2)$

Symbolen - Akoestiek

<u>Symbol</u>	<u>Beschrijving</u>	<u>Eenheid</u>
A	Totale absorptieoppervlakte van de ruimte	m^2
a	Hoogte van de wand	m
α	Absorptiecoëfficiënt	-
α_w	Europese equivalente absorptiecoëfficiënt	-
b	Lengte van de wand	m
c	Snelheid van geluid in lucht	m/s
C_F	Factor die flankerende transmissie in rekening brengt	dB
C_S	Mechanische compliantie van de wand	m/N
d	Breedte van de spouw	m
E	Elasticiteitsmodulus	N/m^2
f	Frequentie	Hz
f_c	Frequentie van de coincidentiedip of grensfrequentie	Hz
f_r	Resonantiefrequentie	Hz
h	Dikte van de wand	m
Hz	Hertz	s^{-1}
K_S	Stijfheid van de wand	N/m
L_p	Geluiddrukniveau	dB
L_{pz}	Geluiddrukniveau in de zendkamer	dB
L_{po}	Geluiddrukniveau in de ontvangtkamer	dB
L_{zeq}	Gefilterd equivalent geluiddrukniveau	dB
ΔL_p	Geluiddrukniveauverschil	dB
m_{tot}	Totale oppervlaktemassa van samengestelde wand	kg/m^2
m_1	Oppervlaktemassa van metselwerk	kg/m^2
m_2	Oppervlaktemassa van rechterblad	kg/m^2
n_4	Reële ventilatievoud bij 4 Pa	Vol/h
η	Verliesfactor ten gevolge van demping	-
p	Geluiddruk	Pa
p_0	Referentiegeluiddruk voor de gehoordrempel	Pa of dB
ρ	Reflectiecoëfficiënt	-
T	Nagalmtijd	s
τ	Transmissiecoëfficiënt	-
R	Geluidverzwakkingsindex	dB
$R(f_c)$	Geluidverzwakkingsindex bij grensfrequentie bepaald met massawet	dB
R_i	Geluidverzwakkingsindex van elk wandelement i	dB
R_M	Geluidverzwakkingsindex van hele wand volgens massawet	dB
R_w	Theoretische geluidverzwakkingsindex	dB
R'_w	Schijnbare geluidverzwakkingsindex	dB
R_1	Geluidverzwakkingsindex van metselwerk volgens massawet	dB
R_2	Geluidverzwakkingsindex van rechterblad volgens massawet	dB
S	Oppervlakte van de wand	m^2
S_i	Oppervlakte van elk wandelement i	m^2
S_l	Oppervlakte van de opening	m^2
T	Temperatuur	K

V	Volume	m^3
ν	Poisson ratio	-

1 INLEIDING

1.1 PROBLEEMSTELLING

Ten gevolge van de laatste herziening van de *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD) in 2010, om de energiebesparingsdoelstellingen van 2020 in de Europese Unie te behalen, werden de eisen op vlak van ‘Energieprestatie en Binnenklimaat’ (EPB), energieprestatiecertificaat (EPC) en keuring van installaties van gebouwen in België een stuk strenger. Hierdoor is sinds 1 januari 2018 het energiepeil (E-peil) in Vlaanderen op E40 vastgelegd. Daarnaast werd er voor woningen een nieuwe parameter geïntroduceerd, namelijk het schilpeil (S-peil). Het schilpeil, hetgeen momenteel is vastgelegd op S31, drukt de energie-efficiëntie van een gebouw uit en vervangt het K-peil en de maximaal toegelaten netto-energiebehoefte voor verwarming in die zin dat ze een einde maakt aan hun gebreken. Dit S-peil wordt berekend aan de hand van een aantal parameters die een invloed hebben op de energieverliezen van een gebouw, zoals de luchtdichtheid. Het thema luchtdicht bouwen is dan ook onontbeerlijk geworden inzake de energieprestatie van gebouwen [3] [4].

Tot op heden zijn er in het Vlaamse Gewest en het Waalse Gewest, in tegenstelling tot het Brussels Hoofdstedelijk Gewest waar sinds 1 januari 2018 voor elk nieuw gebouw de passiefnorm is ingevoerd, echter nog geen concrete eisen in de EPB-reglementering gesteld met betrekking tot de luchtdichtheid van een gebouw. In de praktijk betekent dit dat wanneer een gebouw geen aantoonbare maatregelen neemt ter verbetering van de luchtdichtheid, deze een luchtdichtheidswaarde krijgt bij ontstentenis in het kader van de EPB-aangifte, hetgeen op zijn beurt resulteert in het verlies van kostbare E-peil punten. De enige mogelijkheid om aan te tonen dat het luchtdichtheidsresultaat de waarde bij ontstentenis overtreft, is het laten uitvoeren van een pressuratie-test door een bedrijf dat daarvoor gecertificeerd is. Een pressuratie-test is een drukproef die de luchtdichtheid van een gebouw meet door dit gebouw in een statische onderdruk te brengen en de snelheid te meten waarmee de druk in het gebouw zich herstelt door het aanzuigen van buitenlucht. Deze pressuratie-test heeft echter een aantal nadelen: 1) bij grotere gebouwen is de test nogal tijdrovend; 2) het inhuren van een gecertificeerd bedrijf is behoorlijk duur en dus zullen er niet snel meerdere tussentijdse testen worden uitgevoerd; 3) de test eigenhandig uitvoeren is moeilijk wegens de nodige technische voorkennis en 4) de test is weersafhankelijk, met name de windsnelheid speelt een rol bij de meting [5] [6].

Hieruit vloeit de noodzaak om een alternatieve methode te ontwikkelen die het mogelijk maakt voor de uitvoerder om de luchtdichtheid van een gebouw continu te evalueren inzake de haalbaarheid van de door de architect opgelegde luchtdichtheidseis. Deze methode zou goedkoop, makkelijk, snel uitvoerbaar en onafhankelijk van het weer moeten zijn. Tot dusver bestaat een dergelijke methode nog niet, hetgeen ons interessant lijkt om te onderzoeken.

1.2 ONDERZOEKSVRAAG

In deze masterproef wordt er dan ook een antwoord gezocht op de volgende onderzoeksvraag: zijn geluidsmetingen voldoende nauwkeurig om de luchtdichtheid van een wand te schatten? Vooraleer er echter een antwoord geformuleerd kan worden op deze hoofdonderzoeksvraag, zullen we beurtelings de onderstaande sub-vragen trachten te beantwoorden.

(A) Welke aspecten spelen een belangrijke rol bij de luchtdichtheid van een gebouw en wat is de link met akoestiek?

(B) Op welke manier wordt er in de praktijk omgegaan met luchtdichtheid op vlak van regelgeving en huidige luchtdichtheidsmaatregelen?

1.3 DOELSTELLING EN ONDERZOEKSMETHODE

Deze masterproef heeft als doel een akoestische methode te ontwikkelen die de luchtdichtheid van een façade kan schatten op basis van geluidsmetingen. De uitvoerder van een gebouw zou op die manier tussentijdse geluidsmetingen kunnen uitvoeren zonder afhankelijk te zijn van een BlowerDoortest – en dus een extern bedrijf – om de haalbaarheid van een vooraf opgelegde luchtdichtheidseis continu te evalueren.

De structuur van het onderzoek dat we in deze masterproef zullen uitvoeren, verloopt analoog aan de volgorde van de hierboven gestelde sub-vragen. In het eerste deel van de masterproef zullen we een literatuurstudie uitvoeren die in de eerste plaats als doel heeft om het concept luchtdichtheid in zijn totaliteit in kaart te brengen. Hierbij zal er niet enkel gesproken worden over het belang van luchtdicht bouwen inzake comfort en energie, maar zullen we evenzeer de belangrijkste deelaspecten van luchtdichtheid behandelen. Verder zal er in deze literatuurstudie reeds een brug worden gemaakt tussen akoestiek en luchtdichtheid.

Het tweede deel van deze masterproef betreft een casestudy van een project dat momenteel in uitvoering is door Belemco. In deze casestudy wordt er nagegaan op welke manier er precies wordt omgegaan met de door de architect opgelegde luchtdichtheidseis. Daarnaast wordt vooral de nadruk gelegd op de huidige ingrepen die Belemco neemt voor het verkrijgen van een luchtdicht gebouw. Hierbij zullen ook de belangrijkste aandachtspunten besproken worden waar tijdens de uitvoering op gelet moet worden. De praktische uitvoering zullen we daarna vergelijken met de aanbevelingen zoals deze beschreven worden door het WTCB.

In het derde deel van deze masterproef zullen we onderzoeken hoe geluidsmetingen kunnen gebruikt worden om de luchtdichtheid van een façade te schatten. Hierbij zullen we een tweeledig experiment in situ uitvoeren, bestaande uit pressuratiemetingen en akoestische metingen. Verder zal een experimentele schattingsmethode worden geïntroduceerd die de correlatie tussen akoestiek en luchtdichtheid gebruikt via een mathematische expressie om de luchtdichtheid van de specifieke façade in het experiment te schatten. Vervolgens zullen we een tweede schattingsmethode introduceren die meer theoretisch is en die bijgevolg toegepast kan worden om de luchtdichtheid van elke façade te schatten, ongeacht of deze gelijkaardig is aan de façade in het experiment.

In de eindconclusie van deze masterproef worden de belangrijkste bevindingen uit de hierboven vermelde delen samengebracht in een bondig slotbesluit.

2 LITERATUURSTUDIE

2.1 HET BELANG VAN LUCHTDICHTHEID

De almaar strenger wordende eisen van de Europese Unie omtrent de energieprestatie van gebouwen heeft geleid tot het toepassen van steeds betere thermische isolatie. Hierdoor winnen de energieverliezen, veroorzaakt door infiltratie en exfiltratie, van lucht aan belang. Naast het aandeel van luchtinfiltratie aan de energieprestatie van gebouwen, is een luchtdicht gebouw onontbeerlijk om een leefbare omgeving te creëren. Het thema luchtdichtheid is bijgevolg niet meer weg te denken in de wereld van duurzaam bouwen. Integendeel, het wordt steeds een belangrijker aspect in elke fase van het bouwproject.

2.1.1 Regelgeving

Om te kunnen voldoen aan de eisen en normen van BEN-gebouwen tegen 2021, dient er grote aandacht besteed te worden aan de parameter luchtdichtheid in het kader van een EPB-aangifte. De luchtdichtheid van een gebouw heeft dan ook een significante invloed op de score van het E-peil en, bij woningen, op het S-peil. Het onderscheid tussen deze twee factoren, de meeteenheden voor luchtdichtheid en de huidige regelgeving omtrent luchtdichtheidseisen dienen bijgevolg nader te worden bekeken.

2.1.1.1 E-peil en S-peil

E-peil. Het energiepeil is een globale score die de energieprestatie en de installaties in standaardomstandigheden van een gebouw aangeeft. Dit energiepeil is zowel geldig voor niet-residentiële gebouwen als voor woningen, hoewel er verschillende normen van toepassing zijn op beide categorieën. De Vlaamse Overheid legt stapsgewijs een verstrenging op met verplichte energieprestatieniveaus die in Vlaanderen tegen 2021 dienen gehaald te worden. De eis omtrent BEN-wooneenheden staat voor 2021 vast op E30. De ongecontroleerde verliezen van koude (of warme) lucht, veroorzaakt door een slechte luchtdichtheid, hebben dan ook een grote impact op het E-peil van een gebouw. Om de luchtdichtheid van een gebouw in rekening te brengen met het oog op een betere energieprestatie, moet de bouwheer een luchtdichtheidstest laten uitvoeren. In het geval dat de bouwheer dit niet doet, wordt er een luchtdichtheidswaarde bij ontstentenis ($v50 = 12 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) ingerekend. Een betere energieprestatie heeft, naast een ecologische impact, een aantal financiële voordelen: kleine onroerende voorheffing, subsidies van netbeheerders en een kleinere kans op boetes. Zo kan, afhankelijk van het bouwtype, de mate van luchtdichtheid het E-peil beïnvloeden met 10 tot 15 punten [7] [8].

S-peil. In tegenstelling tot het energiepeil, is het schilpeil geen globale score, maar drukt deze parameter de energie-efficiëntie van een woning uit (en dus niet van gebouwen in het algemeen). Het S-peil toetst als het ware alle energetische kwaliteiten van de gebouwschil in verhouding met de vormefficiëntie van het gebouw. In die zin vervangt deze nieuwe parameter het K-peil en de toegelaten netto-energiebehoefte voor verwarming. Deze verouderde parameters, die gebaseerd zijn op de compactheid, worden namelijk gecombineerd in het nieuwe S-peil, hetgeen tot 2021 is vastgelegd op S31, maar daarna verstrengd zal worden tot S28. Met de invoering van het schilpeil in 2018 wordt, naast het K-peil en de toegelaten netto-energiebehoefte voor verwarming, ook de maximale U-eis afgeschaft, hetgeen een maat is voor de thermische isolatie. Het S-peil legt bijgevolg niet zozeer de nadruk op de gebruikte technieken, maar beoogt des te meer de kwaliteit van de gebouwschil zelf in rekening te brengen [9] [10].

2.1.1.2 Meeteenheden in België (v50 en n50)

In het kader van de EPB-regelgeving wordt de mate waarin een gebouw luchtdicht is, uitgedrukt door middel van het *lekdebiet* dat door de gebouwschil passeert per vierkante meter verliesoppervlakte onder invloed van een drukverschil van 50 Pa tussen de binnen- en buitenomgeving van een gebouw. Het lekdebiet bij een referentiedrukverschil van 50 Pa wordt aangeduid als v50, met als eenheid $\text{m}^3/(\text{h.m}^2)$ [11]. De grootheden van de v50-waardes liggen in de praktijk tussen de $2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ en de $12 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$, respectievelijk gaande van een zeer goede tot een zeer slechte luchtdichtheid. Deze term mag echter niet verward worden met de V50-waarde – dewelke het gemeten lekdebiet voorstelt – uitgedrukt in m^3/h .

De n50-waarde, daarentegen, drukt het luchtvolume uit dat per uur vernieuwd wordt bij eenzelfde drukverschil van 50 Pa en wordt om die reden dan ook het *luchtverversingsdebiet* of *ventilatievoud*¹ genoemd. Het ventilatievoud kan uitgedrukt worden aan de hand van twee eenheden, namelijk 1/h of vol/h. In die zin zijn de twee meeteenheden aan elkaar gelinkt; de v50-waarde wordt bekomen door de n50 waarde te delen door de totale verliesoppervlakte van het gebouw [12]. Echter, de n50-waarde is, in tegenstelling tot de v50-waarde, geen vereiste om het E-peil te berekenen. De n50-waarde wordt in België voornamelijk gebruikt in het kader van passiefbouw, waarbij deze waarde kleiner of gelijk moet zijn aan 0,6/h om te voldoen aan het passief label. Ingeval men spreekt over een lage energiewoning, wordt er gericht op een n50-waarde van 2/h. Deze eis wordt verstrengd naar 1/h bij de aanwezigheid van een ventilatiesysteem D.

Hedendaagse woningen die gebouwd worden zonder veel luchtdichtheidsmaatregelen, hebben gemiddeld een v50-waarde begrepen tussen 6 en $12 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$. Om een betere waarde, bijvoorbeeld begrepen tussen 2 en $6 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ te bereiken, moeten er bijkomende maatregelen getroffen worden en is een doordacht ontwerp van het gebouw vereist. Het bekomen van een v50-waarde lager dan $2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ vereist veel expertise, waarbij zowel aandacht aan het ontwerp als de uitvoering moet worden besteed [13].

2.1.1.3 Luchtdichtheidseis

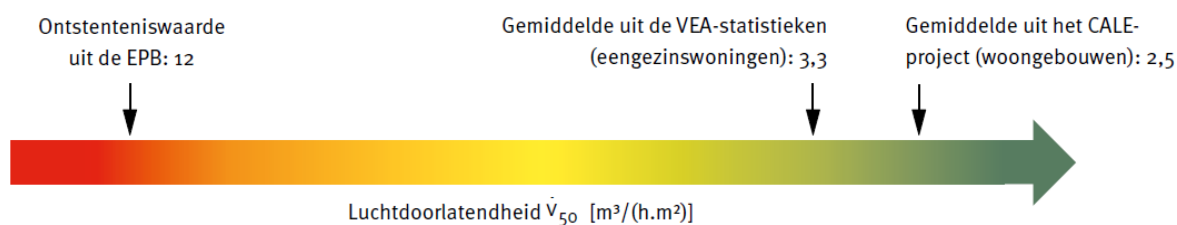
Opgelegde eis. Tot op heden is er geen minimale v50-waarde opgelegd met betrekking tot een verplichte graad van luchtdichtheid. Wel worden er door verschillende instanties aanbevelingen gedaan welke v50-waarde dient gehaald te worden om aan een bepaalde E-peil eis te voldoen. Hoewel er door de overheid geen specifieke luchtdichtheidseis wordt opgelegd, kan de architect – alvorens de start van een bouwproject – wél een minimale luchtdichtheidseis (v50) opleggen in het lastenboek. De architect heeft namelijk als taak om het beschermd volume en de juiste positionering van het luchtscherm te bepalen tijdens het ontwerpproces. Hierbij is de architect (uiteraard in samenspraak met de uitvoerder) eveneens verplicht de ingrepen te bevelen die noodzakelijk zijn om de beoogde luchtdichtheid te kunnen realiseren. Dit impliceert dat architecten geen onbelangrijke rol hebben in het behalen van een goede luchtdichtheid [14].

Minimale eis. Het toenemend belang van luchtdichtheid doet de vraag rijzen of deze parameter een afzonderlijke verplichting dient te worden, in plaats van een van de opties te zijn die bouwheren in staat stelt een bepaald E-peil te realiseren. Om deze vraag te beantwoorden, heeft het VEA een studie uitgevoerd die de relevante stakeholders met betrekking tot dit onderwerp bevroegde. Deze studie toont aan dat er geen unanimititeit bestaat over de hierboven gestelde vraag. Echter, alvorens een wettelijke verplichting tot stand zou kunnen komen, moet er een specifiek controle- en handhavingsbeleid worden

¹ In deze masterproef zullen we stevast de benaming *ventilatievoud* gebruiken.

opgesteld, hetgeen een maatschappelijk draagvlak en nieuw ontwikkelde, betrouwbare meet- en controleprocedures behoeft. Dit zou kunnen leiden tot complexe situatie, waardoor het VEA bevestigd heeft dat een specifieke eis voorlopig niet aan de orde is. Men zou echter terecht de kritische vraag kunnen stellen of het opleggen van een (matige) luchtdichtheidseis, bijvoorbeeld van de grootteorde $v_{50} = 3 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, een motiverend effect zou kunnen hebben, hetgeen ook wordt aangegeven door enkele stakeholders [15] [16].

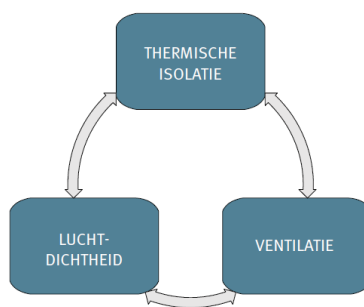
Huidige prestaties. In het algemeen is er in België, naast het project CALE en de statistieken van het VEA, weinig informatie beschikbaar met betrekking tot de energieprestatie van het bestaande bouwepark. Daarenboven wordt in de beschikbare data slechts een bepaald onderdeel van gebouwen behandeld, waardoor deze gegevens niet als representatief kunnen worden beschouwd voor de volledige bouwsector. De onderstaande figuur geeft een overzicht weer van de gemiddeld behaalde luchtdichtheidsprestatie in het kader van de statistieken die voorhanden zijn; de ontstenteniswaarde van $12 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ is evenzeer toegevoegd om de twee gemiddelde waarden te vergelijken [17].



Figuur 1: Beschikbare statistieken bouwepark in België op de luchtdoorlatendheidschaal [17]

2.1.2 Energie

Het is duidelijk dat een goede luchtdichtheid onontbeerlijk is geworden inzake de energiebesparing van een gebouw. In de literatuur worden er verschillende studies gevonden die aantonen dat verregaande luchtdichtheidsmaatregelen een significante invloed hebben op het beperken van energieverliezen, en dit is niet onlogisch. Een slechte luchtdichtheid zorgt namelijk voor infiltratie en exfiltratie van lucht, hetgeen op zijn beurt resulteert in een daling van de effectiviteit van de thermische isolatie. Het stelselmatig verhogen van de hoeveelheid thermische isolatie heeft dan ook geen enkel nut wanneer er onvoldoende aandacht wordt besteed aan de luchtdichtheid van de gebouwschil [18]. Voldoende aandacht aan luchtdichtheid schenken, impliceert het toevoegen van weloverwogen luchtdichtheidsmaatregelen. Hierdoor stijgt echter de behoefte aan mechanische ventilatie om steeds een goede luchtkwaliteit binnen het gebouw te kunnen verzekeren. Het is bijgevolg belangrijk om te streven naar een evenwicht tussen een luchtdicht, efficiënt geventileerd en thermisch geïsoleerd gebouw [19]. Dit maakt dat deze drie aspecten onafscheidelijk aan elkaar zijn gekoppeld.



Figuur 2: Onafscheidelijk trio [20]

Het belang van luchtdichtheid wordt nader beduid door middel van het verband tussen de druk en het lekdebiet dat door een opening (luchtlek) kan passeren. Voor een opening met een oppervlakte van 1 cm², zal er bij een drukverschil van 50 Pa een lekdebiet van ongeveer 2 m³/h zich voordoen. Ingeval hetzelfde drukverschil zich voordoet bij een opening van 5 cm² (oppervlakte van een 2 euro muntstuk) zal er een lekdebiet van om en bij de 10 m³/h optreden [17].

2.1.3 Comfort

Naast de besparingen op energetisch vlak, zorgt een goede luchtdichtheid eveneens voor een hoger comfortniveau binnen het gebouw. Het risico op condensatie wordt door een goede luchtdichtheid namelijk gevoelig beperkt. In een gebouw dat, daarentegen, weinig luchtdicht is, vergroot de kans op contact tussen warme (binnen)lucht en de koude zijde van de thermische isolatie, hetgeen resulteert in een verhoogde kans op condensatie met mogelijke vochtplekken en beschadiging van de isolatie als gevolg. Daarnaast zorgt een performante luchtdichtheid ervoor – ingeval er een efficiënt ventilatiesysteem aanwezig is – dat er geen ongecontroleerde luchtuitwisseling plaatsvindt om zodoende een goede binnenluchtkwaliteit te bewerkstelligen. In die zin kan een goede luchtdichtheid de gebruikers van het gebouw afschermen tegen een externe luchtvervuiling, afkomstig van een chemisch ongeval of zelfs een brand. In dat geval spreekt het voor zich dat het ventilatiesysteem uitgeschakeld dient te worden [20].

Een ander aspect van comfort in een woning betreft akoestisch comfort. Vermits een luchtlek ook geluid zal doorlaten, mag er aangenomen worden dat een goede luchtdichtheid het akoestische comfort verhoogt. Hoewel een luchtlek zo goed als altijd een akoestisch lek is, mogen de theoretische betekenissen van deze twee begrippen niet door elkaar gehaald worden. Een luchtlek verwijst immers naar de luchtdoorlatendheid van de gebouwschil, terwijl een akoestisch lek duidt op de aanwezigheid van geluidstransmissiewegen. Tabel 1 geeft een aantal voorbeelden weer om het verschil tussen beide begrippen te duiden [17].

Criteria		Luchtdicht	
		Ja	Nee
Geluidslektheid	Ja	Siliconenkitvoeg, Bepleistering	Akoestisch Gedempt Ventilatioerooster
	Nee	Dunne folie, PUR- Opschuiming	Open spleten, Poreus metselwerk

Tabel 1: Onderscheid 'Luchtdicht' en 'Geluidsdicht' [17]

2.2 SLEUTELCONCEPTEN

Opdat men zou begrijpen wat luchtdichtheid betekent in de context van constructies en opdat we een antwoord zouden kunnen formuleren op de eerste sub-vraag, dient men tenminste notie te hebben van het gros van de basisconcepten die betrekking hebben tot luchtdichtheid. Deze basisconcepten worden om die reden dan ook eerst besproken, alvorens dieper in te gaan op de link tussen de akoestische prestatie van een constructiedeel en diens capaciteit om de infiltratie van lucht tegen te gaan.

2.2.1 Begrippen

In het komende hoofdstuk zullen we de belangrijkste begrippen definiëren die nodig zijn om het concept luchtdichtheid te begrijpen. Hierbij dient evenwel meteen opgemerkt te worden dat we ons zullen beperken tot de begrippen die relevant zijn in het kader van deze masterproef, dat wil zeggen dat we niet verder gaan dan het concretiseren van de werkelijke definitie van luchtdichtheid – en de verwarring die soms bestaat tussen luchtdichtheid en luchtinfiltratie –, het beschrijven van de fenomenen die luchtinfiltratie tot gevolg hebben en het aanduiden en categoriseren van luchtpaden waarlangs lucht mogelijks kan infiltreren.

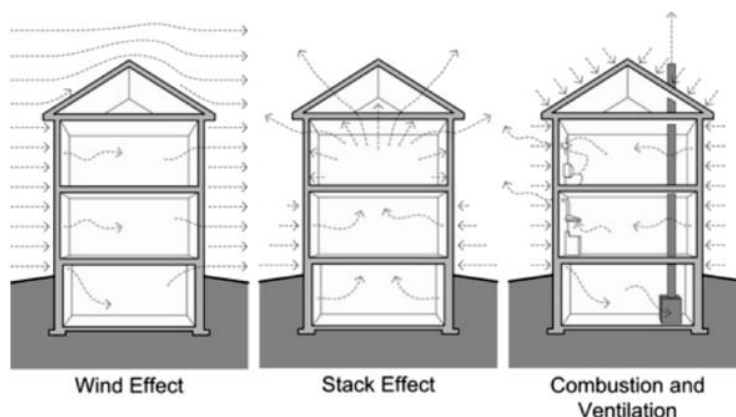
2.2.1.1 Luchtdichtheid

Het is niet ongebruikelijk om luchtdichtheid en luchtinfiltratie (of luchtpermeabiliteit) met elkaar te verwarren. De luchtpermeabiliteit van een oppervlak is de eigenschap van dat oppervlak om lucht door te laten bij een *natuurlijke* druk. Deze eigenschap is afhankelijk van externe factoren (zoals windsnelheid en buitentemperatuur) en verandert in functie van de tijd. Daarentegen is luchtdichtheid – ook luchtlekage genoemd - de hoofdkwaliteit van de gebouwschil die een invloed heeft op infiltratie en wordt gedefinieerd als de stroming van lucht die het gebouw infiltreert bij een *gegeven*² drukverschil [21] [22] [23].

Hoewel luchtlekage en luchtinfiltratie niet hetzelfde zijn, bestaat er een eenvoudige correlatie tussen deze twee begrippen. Wanneer men namelijk de n-waarde bij 50 Pa (n50) deelt door een factor 20, wordt bij benadering de luchtinfiltratie bij een natuurlijke druk bekomen. Dit is echter een zeer vereenvoudigde aanpak die een groot aantal factoren van het infiltratieproces negeert. Toch geeft deze eenvoudige expressie aanvaardbare resultaten wanneer jaarlijkse gemiddelden worden beschouwd [24] [25].

2.2.1.2 Luchtinfiltratie

Dit fenomeen wordt beschreven als het proces waarbij luchtmassa door barsten (of andere openingen) *accidenteel* de gebouwschil indringt bij een natuurlijke druk [26] [21]. Wanneer luchtinfiltratie optreedt, betekent dit dat er tegelijk luchtinfiltratie plaatsvindt op een andere plaats in het gebouw. Er zijn verschillende oorzaken die dit fysisch fenomeen verklaren, namelijk de wind, het schoorsteeneffect en mechanische elementen in het gebouw [27] [28] [29].



Figuur 3: Oorzaken van luchtinfiltratie [28]

² In België wordt meestal een gegeven drukverschil van 50 Pa gebruikt.

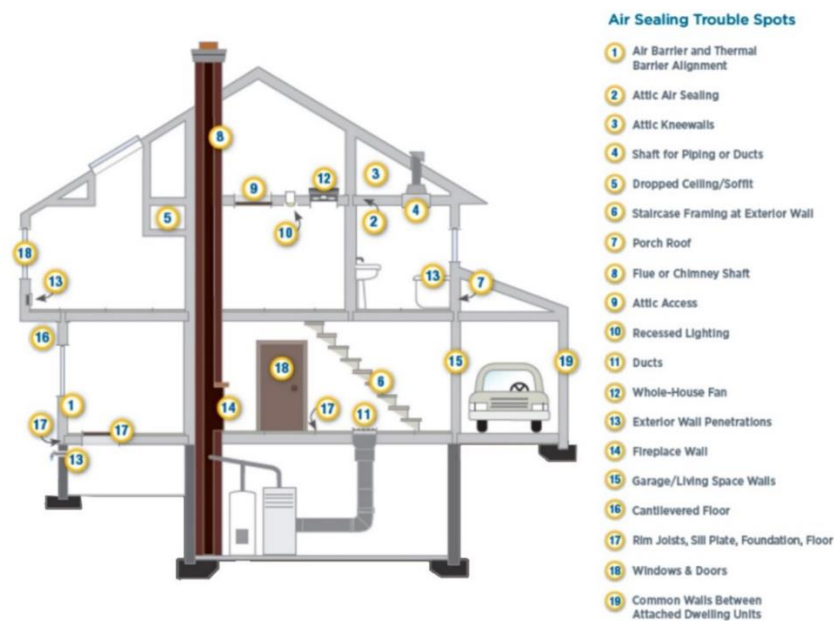
Wind. Een luchtstroom verhoogt de druk op de zijde van het gebouw dat naar deze luchtstroom gericht is waardoor er een drukverschil – een drukverschil wordt als positief beschouwd als het een infiltratiedebiet veroorzaakt – ontstaat tussen deze gevel en de overige gevels. Het drukverschil wordt veroorzaakt door een verandering van de snelheid van het fluïdum. Dit zorgt ervoor dat er infiltratie optreedt aan de loefzijde van het gebouw en exfiltratie aan de lijzijden. Deze effecten kunnen echter sterk variëren naargelang de omringende omgeving en de aanwezigheid van struiken of bomen [28] [29].

Schoorsteeneffect. Dit fenomeen treedt op wanneer er luchtstromingen zijn in een gebouw die veroorzaakt worden door het verschil tussen binnen- en buitentemperatuur. Het temperatuurverschil leidt tot een verschil in luchtdichtheid – en dus een drukverschil – waardoor er verticale luchtstromingen van koude lucht naar warme lucht ontstaan. De zin van deze beweging is afhankelijk van het seizoen en wisselt naargelang de binnentemperatuur hoger (in de herfst en de winter) of lager (in de lente en zomer) is dan de buitentemperatuur. Tijdens de koudere periode komt infiltratie voor onderaan het gebouw (maaiveld) en exfiltratie bovenaan het gebouw. In de lente en de zomer gebeurt juist het omgekeerde [28] [29].

Mechanische onderdelen van een ventilatiesysteem. Deze componenten (zoals waaiers, blazers en zelfs sommige huishoudelijke apparaten) kunnen aanleiding geven tot een luchtbeweging in een gebouw, hetgeen op zijn beurt resulteert in een drukverschil. Wanneer er meer lucht wordt geëxfiltreerd dan geïnfiltreerd, ontstaat er een negatieve druk in het gebouw waardoor er een luchtstroming op gang wordt gebracht van het hogedrukgebied (buiten) naar het lagedrukgebied in het gebouw [28].

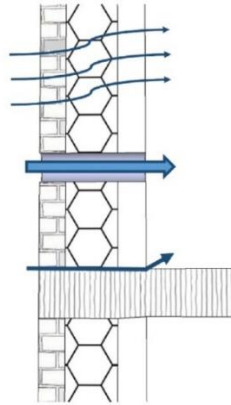
2.2.1.3 Luchtpaden

Het indringen van lucht in een gebouw door luchtinfiltratie geschiedt door openingen en scheuren die (hoogstwaarschijnlijk) ontstaan zijn tijdens de constructiefase. De grootte en de stroomkarakteristiek van dergelijke openingen is onder andere afhankelijk van het voegtype, het gebruikte materiaal en het vakmanschap van de uitvoering. Hierdoor kan het zijn dat vrij gelijkaardige openingen toch zeer verschillende infiltratiekarakteristieken vertonen [30]. De volgende afbeelding geeft een idee van de probleempunten waaraan aandacht moet geschonken worden.



Figuur 4: Meestvoorkomende plaatsen van luchtlekken [28]

Het is mogelijk om de verschillende luchtpaden te categoriseren in drie klassen: 1) luchtstroming door oppervlakken (daken, muren en vloeren); 2) luchtstroming door lijnvoegen (aansluiting van twee wanden, wand-vloer, wand-raam, wand-dak, etc.) en 3) luchtstroming door individuele punten (penetraties in de bouwschil door leidingen). De volgende afbeelding geeft een duidelijke schets van deze categorisatie [26].



Figuur 5: Categorisatie luchtpaden [26]

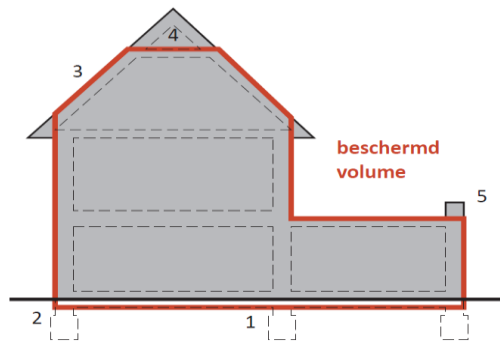
Daarnaast kan het voorkomen dat een luchtpad tot meer dan één klasse behoort en als het ware hybride is. In dit geval zal men het luchtpad moeten categoriseren naargelang het meest dominante gedrag dat wordt vertoond [26].

2.2.2 Luchtdicht bouwen

De luchtdichtheidsprestatie van een gebouw wordt bepaald door de totale lekkage op het einde van het constructieproces. Om te voldoen aan de voorgeschreven luchtdichtheidseis van een gebouw moeten de betrokken partijen reeds in de ontwerpfase voldoende aandacht schenken aan luchtdichtheid. Daarnaast speelt de uitvoeringskwaliteit tijdens de constructie een zeer grote rol. Het is namelijk niet mogelijk om een slechte luchtdichtheid op een bepaalde plaats in het gebouw recht te zetten door op een andere plaats in het gebouw de luchtdichtheid te gaan verbeteren. Het is daarom belangrijk om de volgende deelaspecten in acht te nemen wat betreft het luchtdicht ontwerpen van een gebouw.

2.2.2.1 Beschermd volume

Het bepalen van het beschermd volume is een cruciale beslissing in het luchtdicht maken van een constructie. Het beschermd volume omvat namelijk alle ruimten in een gebouw die thermisch gescheiden zijn van de buitenomgeving, de grond en alle overige aangrenzende ruimten die niet deel uitmaken van het beschermd volume en die direct of indirect verwarmd moeten worden. Dit beschermd volume is (uiteraard) eveneens het volume dat luchtdicht dient gemaakt te worden en vormt bijgevolg de basis voor het ontwerp en de positionering van het luchtscherm. De volgende afbeelding schetst het concept van het beschermd volume [31].



Figuur 6: Beschermd volume - Schematische weergave [31]

Een belangrijk onderdeel in de ontwerpfase is de positionering van de technische installaties ten opzichte van het beschermd volume; een deel van de installaties zal bij voorkeur binnen het beschermd volume liggen, terwijl een ander deel beter erbuiten geplaatst wordt. Dit is te wijten aan het feit dat er voor bepaalde installaties permanente, niet-afsluitbare luchttoevoeropeningen in de gebouwschil bevestigd moeten worden. De keuze van het toestel en de plaatsing ervan binnen of buiten het beschermd volume heeft dus een significante invloed op de luchtdichtheidsprestatie van het gebouw in kwestie [32]. In bijlage A bevindt zich een samenvatting van de aanbevelingen voor technische installaties op vlak van luchtdichtheid.

2.2.2.2 Compactheid versus vormefficiëntie

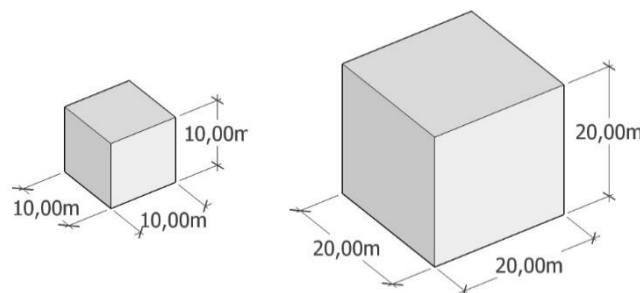
Compactheid. De compactheid C van een gebouw wordt gedefinieerd als de verhouding van het beschermd volume BV over de totale verliesoppervlakte A_t . De compactheid wordt bijgevolg gegeven door de volgende formule [33]:

$$\text{Compactheid} = \frac{BV}{A_t} [-] \quad (1)$$

Vormefficiëntie. De vormefficiëntie wordt gedefinieerd als de verhouding van de equivalente boloppervlakte over de totale verliesoppervlakte A_t [34].

$$\text{Vormefficiëntie} = \frac{4\pi\left(\frac{3V}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}}}{A_t} [-] \quad (2)$$

Het verschil tussen de compactheid en de vormefficiëntie wordt het makkelijkst duidelijk gemaakt aan de hand van een voorbeeld. De onderstaande figuur toont twee kubussen: een kubus met ribben van 10 meter en een kubus met ribben van 20 meter. De bijhorende tabel geeft de resultaten van de voorgaande uitdrukkingen.



Figuur 7: Vergelijking kubussen

	Kleine kubus	Grote kubus
Ribbe [m]	10	20
BV[m ³]	1000	8000
At [m ²]	600	2400
Eq. Bolopp. [m ²]	483,6	1934,4
Compactheid [-]	1,67	3,33
Vormefficiëntie [-]	0,806	0,806

Tabel 2: Vergelijking kubussen

Hoewel beide figuren dezelfde kubusvorm hebben – hetgeen kan beschouwd worden als een zeer compacte vorm –, is er wel degelijk een aanzienlijk verschil in compactheid; de kleinste kubus heeft een compactheid van 1,67 en de grootste kubus heeft een compactheid van 3,33.

Om de impact van de compactheid op een gebouw te illustreren, is het nodig om de n50- en v50-waarden uit het voorgaande hoofdstuk duidelijker te definiëren, namelijk:

$$n50 = \frac{v50}{BV} \left[\frac{Vol}{h} \right] \quad (3)$$

$$v50 = \frac{v50}{A_t} \left[\frac{m^3}{h \cdot m^2} \right] \quad (4)$$

Wanneer men beide formules nader bekijkt, dan kan de volgende relatie opgesteld worden door de compactheid van het gebouw te introduceren:

$$v50 = n50 \cdot compactheid$$

Wanneer we veronderstellen dat bovenstaande figuren gebouwen zouden zijn en vervolgens de passiefnorm ($n50 = 0,6/h$) zouden toepassen, dan kan de v50-eis per gebouw op deze wijze berekend worden:

$$v50 (1) = 0,6 \cdot 1,67 \approx 1,00 \frac{m^3}{h \cdot m^2} \quad (5)$$

$$v50 (2) = 0,6 \cdot 3,33 \approx 2,00 \frac{m^3}{h \cdot m^2} \quad (6)$$

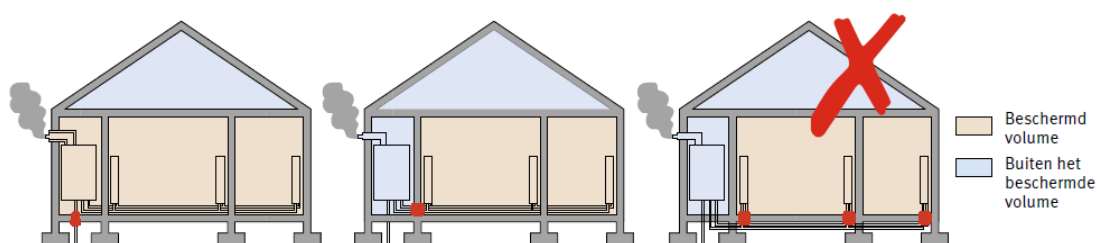
Verder kan hieruit worden opgemaakt dat bij toepassing van de passiefnorm een klein gebouw aan een strengere v50-waarde dient te voldoen dan een groter gebouw met dezelfde vorm. Dit betekent impliciet dat een gebouw met grotere afmetingen een groter maximaal lekdebiet mag hebben alvorens de v50-waarde wordt overschreden. Dit is niet het geval bij kleine gebouwen. Integendeel, hoe kleiner de dimensies van een gebouw, hoe kleiner de foutenmarge wat betreft de uitvoering van de luchtdichtheid. Er kan geconcludeerd worden dat de compactheid geen al te beste maatstaf is om de efficiëntie van geometrieën te toetsen. Hieruit volgt de noodzaak om gebouwen op een gelijkaardige manier te kunnen vergelijken in functie van hun vorm. Om die reden werd de vormefficiëntie geïntroduceerd. De vormefficiëntie blijft namelijk voor beide kubussen gelijk, ongeacht de grootte ervan. Hierdoor zullen kleinere gebouwen niet benadeeld worden in het kader van luchtdichtheid.

2.2.2.3 Luchtscherm

Er worden door verscheidene fabrikanten allerlei materialen aangeboden die ze zelf betitelen als luchtdicht. Echter mag een materiaal als luchtdicht bestempeld worden wanneer de luchtdoorlatendheid minder is dan $0,1 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ bij een drukverschil van 50 Pa (en dat is niet altijd het geval). De architect bepaalt de materiaalkeuze van het luchtscherm om de luchtdichtheid van de gebouwschil te garanderen. Hierbij kan het gaan om [11]:

- dampschermen (voor hout dragende constructies en voor skeletbouw);
- pleisterwerk (voor muren uit metselwerk);
- panelen (voor houtskeletbouw);
- ter plaatse gestorte beton;
- geïndustrialiseerde systemen.

Bij voorkeur wordt het dampscherm aan de binnenzijde van de isolatie aangebracht. Luchtdichte lagen hebben namelijk een hogere diffusieweerstand, waardoor de plaatsing aan de warme zijde van de isolatie essentieel is om inwendige condensatie te vermijden. Dit wil niet zeggen dat het luchtscherm steeds in hetzelfde vlak als de thermische isolatie dient te liggen; dit is namelijk afhankelijk van de situatie. De positionering van het dampscherm dient – nog meer dan de thermische isolatielaag – zonder onderbrekingen rondom het beschermd volume te worden geplaatst. In het algemeen dienen de uitvoeringsdetails van een luchtscherm – onafhankelijk uit welk materiaal dit luchtscherm bestaat – zo eenvoudig mogelijk te zijn om de plaatsing ervan in de praktijk vlot te laten verlopen en uitvoeringsfouten te vermijden. Bijgevolg dienen doorboringen van het luchtscherm binnen het beschermd volume zoveel als mogelijk vermeden worden. De leidingen van de installaties kunnen dan ook best binnen het beschermde volume worden opgenomen om onnodige doorboringen te voorkomen, zoals te zien in onderstaande figuur [17] [35].



Figuur 8: Positionering leidingen binnen beschermd volume [17]

Bovendien is de communicatie tussen de verschillende betrokken partijen in het bouwproject van groot belang om duidelijk te maken waar de luchtdichte laag zich bevindt. Zodoende kan er belet worden dat er in de buurt van de luchtdichte laag onvoorzichtig gewerkt wordt en verloopt de aansluiting van deze laag met zo weinig mogelijk fouten. In het geval dat de luchtdichte laag onderbroken wordt, heeft dit dramatische gevolgen voor de luchtdichtheid van het gebouw als een geheel [17].

2.2.2.4 Uitvoeringskwaliteit

Het vakmanschap van de plaatsing van het luchtscherm speelt een cruciale rol bij het verkrijgen van een luchtdicht gebouw, ongeacht de keuze van het bouwsysteem. Hoewel elk bouwsysteem wordt gekenmerkt door zijn eigen specifieke voor- en nadelen, valt de keuze van het bouwsysteem niet rechtstreeks te linken aan een bepaalde luchtdichtheidsprestatie. Uit verschillende studies is gebleken dat luchtdichtheidsprestaties nogal verschillend kunnen zijn bij eenzelfde systeem; andersom kunnen er gelijkaardige luchtdichtheidsprestaties voorkomen bij verschillende bouwsystemen. De deskundigheid

en het vakmanschap van de uitvoerders in kwestie speelt dan ook een doorslaggevende rol in het verkrijgen van een luchtdicht gebouw [23] [36].

Daarnaast is het zelfs bewezen dat educatieve sessies omtrent uitvoeringskwaliteit een significante invloed hebben op het verbeteren van de luchtdichtheid van een gebouw. Een dergelijke sessie heeft een tweeledig doel: ten eerste wordt er geambieerd om werklieden bewust te maken van het belang van luchtdichtheid – en de problemen die ermee gepaard gaan –, hetgeen ervoor zorgt dat er een soort van verantwoordelijkheidsgevoel wordt gecreëerd door aan te tonen dat een arbeider een grote rol kan spelen in het verkrijgen van een luchtdicht gebouw; ten tweede heeft een educatieve sessie – het woord zegt het eigenlijk al zelf – als doel om de kennis van de werklieden met betrekking tot het verkrijgen van een luchtdicht gebouw te verhogen. Bij voorkeur is deze educatieve sessie gebaseerd op probleemgestuurd leren.³ Echter, de context waarin deze sessie plaatsvindt, is evenzeer belangrijk. Het is namelijk niet nuttig om een scholing te doen op een locatie ver weg van de eigenlijke werkplek. Integendeel, deze sessie wordt het best gegeven op de werkplek zelf. Op deze manier kan de theorie meteen worden omgezet in de praktijk, hetwelk resulteert in gemotiveerde werklieden die de opgedane kennis gebruiken en goed begrijpen [37].

2.2.3 Luchtstroming door een opening

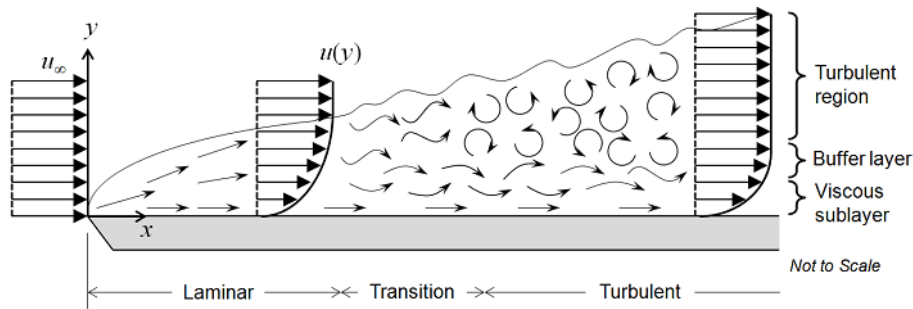
Het fysisch verschijnsel van een luchtstroming door een opening treedt op vanwege een drukverschil tussen beide kanten van deze opening. Deze relatie kan op verschillende manieren worden uitdrukt, maar de meest voorkomende verhouding vindt men in de vorm van een machtswet – tevens de algemene stromingsvergelijking – waarbij het debiet (\dot{V}) en het drukverschil (ΔP) op de volgende manier gerelateerd zijn [27] [24] [38].

$$\dot{V} = C(\Delta P)^n \quad (7)$$

Waarbij: \dot{V} = luchtdebiet [$\frac{m^3}{h}$]
 C = stromingscoëfficiënt [$\frac{m^3}{hPa^n}$]
 ΔP = drukverschil [Pa]
 n = stromingsexponent [-]

De stromingsexponent n heeft, naargelang het stromingsregime in de opening – en dus het Reynoldsgetal van de stroming –, een waarde van $n = 1$ (voor een laminaire stroming met een laag Reynoldsgetal < 2300) of $n = 0,5$ (voor een turbulente stroming met een hoog Reynoldsgetal > 4000). In tegenstelling tot smalle openingen, waar turbulentie enkel voorkomt bij zeer hoge drukverschillen, treft men in een brede opening vaker turbulente stromingen aan. Een stroming is evenwel nooit volkomen laminair of volkomen turbulent. Bijgevolg heeft de stromingsexponent steeds een waarde die begrepen ligt tussen de extreme grootheden van 0,5 en 1. In de praktijk ligt de waarde van de stromingsexponent vaak tussen 0,60 en 0,70 of wordt – bij gebrek aan kennis over de aard van de stroming – een gemiddelde waarde van $n = 0,65$ gebruikt [24] [27].

³ Probleemgestuurd leren betekent dat er wordt vertrokken van een probleem om aan te tonen waarom een oplossing nodig is.



Figuur 4, Laminaire en turbulente stroming [39]

De stromingscoëfficiënt C is een constante grootheid die eigen is aan de opening. Deze coëfficiënt is afhankelijk van de geometrie van de opening en stelt het luchtdebiet door deze opening voor bij een drukverschil van 1 Pa. In de algemene stromingsvergelijking is de stromingscoëfficiënt echter (en de stromingsexponent evenzeer) onafhankelijk van de geometrie van de opening, maar is deze gerelateerd aan het interval waarover men het element beschouwt [23] [27].

De algemene stromingsvergelijking (7) is niettemin slechts benaderend. Een meer correcte relatie vindt men in de vorm van de volgende formule die daartegenover minder eenvoudig toepasbaar is in vergelijking met de algemene stromingsvergelijking [26] [27].

$$\dot{V} = AC_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (8)$$

Waarbij: \dot{V} = luchtdebiet $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
 A = oppervlakte van de opening $[m^2]$
 C_d = weerstandsgetal [-]
 ΔP = drukverschil $[Pa]$
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Het weerstandsgetal C_d wordt geïntroduceerd in de vergelijking omdat het debiet van de stroming vermindert door de contractie in de opening. De waarde van het weerstandsgetal van een opening kan in het algemeen benaderend bepaald worden als zijnde [25]: $\frac{\pi}{\pi+2} = 0,611$. Wanneer een hogere graad van nauwkeurigheid gewenst is, kan het weerstandsgetal op de volgende wijze bepaald worden [40]:

$$C_d = C_\infty + \frac{b}{Re^n} \quad (9)$$

Waarbij: C_d = weerstandsgetal [-]
 C_∞ = weerstandsgetal bij een oneindig groot Reynoldsgetal [-]
 b = constante die afhangt van de diameter van de opening [-]
 Re = Reynoldsgetal [-]
 n = stromingsexponent [-]

Daarnaast heeft men in sommige gevallen te maken met kruipende stromingen. Dit zijn stromingen doorheen een dunne muur met een zeer laag Reynoldsgetal. Hiervoor kan de volgende experimentele relatie vastgesteld worden [25]:

$$\dot{V} = A \sqrt{\frac{Re}{12\pi}} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (10)$$

Waarbij: \dot{V} = luchtdebiet $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
 A = oppervlakte van de opening $[m^2]$
 Re = Reynoldsgetal [-]
 ΔP = drukverschil $[Pa]$
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Tot slot moet er worden opgemerkt dat de stromingsvergelijkingen geen rekening houden met wrijvingsverliezen. Dit zou in rekening kunnen worden gebracht door een extra term toe te voegen, maar dit wordt in de praktijk bij luchtdichtheidsmetingen niet gedaan [25].

2.2.4 Luchtdichtheidsmeetsystemen

Er zijn een aantal systemen voorhanden om de luchtdichtheid van een gebouw te bepalen of om luchtlekken doorheen een gebouw (of ruimte) te lokaliseren. In de volgende hoofdstukken worden de belangrijkste systemen besproken die in de bouwsector courant gebruikt worden, alsook worden deze systemen vergeleken in functie van de meest significante parameters die voor de bouwsector van toepassing zijn. Deze samenvattende vergelijking wordt teruggevonden in tabel 3.

2.2.4.1 Pressuratietest

Bij een pressuratietest wordt de luchtdichtheid van een bestaande woning of gebouw gemeten met behulp van een ventilator. Dit gekalibreerd toestel brengt het gebouw in over- en/of onderdruk bij een drukverschil van 50 Pa, hetgeen kan vergeleken worden met een windsnelheid van 32 km/u oftewel een winddruk van 4 à 5 beaufort, wat overeenkomt met een lichte storm [41]. De pressuratietest heeft in het algemeen een tweeledig doel voor ogen. Enerzijds beoordeelt de pressuratietest de kwaliteit van de luchtdichte afwering en anderzijds bekomt men een meetwaarde van de luchtdichtheid die – in het geval dat deze lager is dan de waarde bij ontstentenis – gebruikt kan worden om het E-peil te verlagen [42].

Om het resultaat van een pressuratietest te mogen gebruiken in de EPB-aangifte, is het sinds 1 januari 2015 verplicht dergelijke test uit te voeren volgens STS-P 71-3. Een belangrijke voorwaarde hierbij is dat de uitvoerder van deze test erkend wordt door de kwaliteitsorganisatie. Bovendien is het verplicht dat elke meting beschikt over een conformiteitsverklaring [43]. Wanneer niet aan deze voorschriften wordt voldaan, mogen de bekomen resultaten van de pressuratietest niet worden gehanteerd in de EPB-aangifte van het gebouw. In dat geval wordt er voor de waarde bij ontstentenis gekozen ($v_{50} = 12 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) of er wordt een nieuwe pressuratietest verwezenlijkt die wel aan alle voorschriften beantwoordt [44].

2.2.4.2 Puls

De pulsmethode is een alternatief meetsysteem om luchtdichtheidsmetingen uit te voeren. Het toestel bestaat uit een compressor die opgeladen wordt en hierna snel achter elkaar een geweten luchtvolume vrijgeeft in het gebouw bij een lage luchtdruk. Hierdoor wordt er een ogenblikkelijke drukstijging gegenereerd die zich al snel in een ‘quasi-vaste’ toestand zal bevinden. De drukverschillen in het gebouw worden gemeten en daarna gebruikt om een correlatie tussen de luchtlekken en de druk vast te stellen. De scherpe toename en afname van lucht kan grafisch weergegeven worden, waarbij de steilheid van de grafiek de luchtlekkage bepaalt [45] [46].

De pulsmethode is een relatief nieuwe methode en wordt bijgevolg (nog) niet veel gebruikt in de praktijk. Het grote nadeel bij dit systeem is dat de luchtlekken niet kunnen gelokaliseerd worden, waardoor het moeilijk wordt om de luchtdichtheid van de gemeten ruimte in kwestie te verbeteren. Deze techniek kan eventueel gecombineerd worden met rookdetectie, thermografie of thermo-anemometers om op die manier de gemeten luchtlekken te lokaliseren. Dit zal in veel gevallen minder efficiënt werken, gezien het gebouw niet in onderdruk kan gebracht worden, waardoor eventuele luchtlekken zich minder sterk aftekenen.

2.2.4.3 Tracergas

Tracergas wordt voornamelijk gebruikt om de plaatsen waar zich luchtinfiltratie in het gebouw voordoet te lokaliseren. In tegenstelling tot de pressuratietest, wordt deze methode niet gebruikt om de mate van luchtdichtheid van een gebouw te meten. In het algemeen is deze methode – op vlak van lokalisatie van luchtlekken – een stuk accurater dan de pressuratietest. De tracergasmethode geeft geen antwoord op de spreiding van de lekken en is afhankelijk van de meteorologische omstandigheden. Daarenboven is het moeilijk om verschillende resultaten onderling te vergelijken. Hoewel de pressuratietest een beter middel is voor het vergelijken van de mate van luchtdichtheid tussen verschillende gebouwen bij een over- of onderdruk van 50 Pa, kan het ook nuttig zijn om de luchtinfiltratie te weten bij normale luchtdrukomstandigheden. In dit laatste geval kan de tracergasmethode een antwoord bieden [47].

In de praktijk worden de pressuratietest en de tracergasmethode bijgevolg gecombineerd om zowel een meetwaarde van de luchtdichtheid, alsook een precieze lokalisatie van de luchtlekken te bekomen. In de literatuur worden evenzeer methodes beschreven waarbij – met behulp van de tracergasmethode – het ventilatievoud bepaald kan worden. Hierbij gaat de voorkeur naar het gas koolstofdioxide, daar dit gas vaak wordt gebruikt om de binnenluchtkwaliteit van een gebouw te beoordelen en om luchtlekken te lokaliseren [26] [48] [49].

2.2.4.4 Rookdetectie

Een rookfles of rookpen wordt gebruikt om luchtlekken visueel op te sporen. Door kleine hoeveelheden dichte, witte rook uit te stoten, zal de luchtstroom doorheen kieren of spleten zichtbaar worden. Deze techniek kan gecombineerd worden met een pressuratietest en met de pulsmethode. In combinatie met de pressuratietest wordt het gebouw in onderdruk gebracht, waardoor de rook door aanwezige kieren en spleten naar binnen wordt gezogen. Wanneer de rook snel beweegt door een opening, geeft dit aan dat deze opening verbonden is met een lagere drukzone [50] [51].

2.2.4.5 Thermo-anemometer

Thermo-anemometers kunnen luchtbewegingen lokaliseren door het invoegen van een elektrisch verwarmd sonde-element. De luchtsnelheid wordt op die manier afgeleid uit de toename in verwarmingsvermogen dat nodig is om de sonde op een bepaalde temperatuur te houden. Deze apparaten kunnen luchtpaden opsporen en kunnen bovendien telkens opnieuw gebruikt worden. Dit is een groot voordeel ten opzichte van rookstiften, die meestal slechts één keer kunnen gebruikt worden [50].

2.2.4.6 Thermografie

Een infraroodcamera kan de oppervlaktetemperatuur meten; zowel bij constructieonderdelen, aparte ruimtes en volledige gebouwen. Net zoals rookdetectie, wordt deze methode toegepast voor de lokalisatie van luchtlekken en wordt deze techniek in veel gevallen evenzeer toegepast in combinatie met een pressuratietest. Ten gevolge van de onderdruk van de ventilator wordt er koude lucht via de aanwezige kieren en spleten naar binnen gezogen, waardoor er zich een groter temperatuurverschil

aftekent tussen de binnen- en buitenruimte. Er is echter wel een minimum temperatuurverschil van 5 °C vereist tussen de binnen- en buitenomgeving om de meting nauwkeurig te kunnen uitvoeren [52].

		Pressuratietest	Puls	Tracer gas	Rook	Anemometer	Thermografie
Standaardisatie	Nationaal	x	-	x	x	-	x
	Internationaal	-	-	x	-	-	x
	EPB-conform	x	-	-	-	-	-
Doel	Lokaliseren	-	-	-	x	x	x
	Meten	x	x	x	-	-	-
Bouwfase	Tijdens bouw	x	-	-	x	x	x
	Nieuw gebouw	x	x	x	x	x	x
	Bestaand gebouw	x	x	x	x	x	x
Meetruimte	Constructie-onderdelen	-	-	-	x	x	x
	Aparte ruimtes	x	x	x	x	x	x
	Volledig gebouw	x	x	x	x	x	x
Eenheid		Vol/h	m ²	Vol/h	-	Vol/min	°C
Normalisatie	Volume	x	-	x	-	-	-
	Verliesoppervlakte	x	-	-	-	-	-
Nauwkeurigheid		95%	-	90-95%	-	?	-
Technologische complexiteit	Laag	-	x	-	x	-	-
	Medium	-	-	x	-	x	x
	Hoog	x	-	-	-	-	-
Kostprijs	Laag	-	-	-	x	x	x
	Medium	x	-	-	-	-	-
	Hoog	-	-	-	-	-	-

Tabel 3: Meetmethodes voor luchtdichtheid [51]

2.2.5 Parameters

De aanwezigheid van een aantal factoren in een gebouw spelen een aanzienlijke rol in het verhogen van de moeilijkheid om een luchtdichte constructie te bewerkstelligen. Hoewel er in de literatuur onenigheid bestaat over de significantie van deze parameters met betrekking tot de luchtdichtheid – sommige studies tonen aan dat een bepaalde factor van belang is, terwijl een ander onderzoek het tegendeel beweert – lukt het om na een grondige studie een rode draad te zien in deze jungle van invloedfactoren. Het blijkt namelijk dat er een simpele onderverdeling kan gemaakt worden tussen zuiver geometrische factoren en factoren die gerelateerd zijn aan de kwaliteit tijdens de uitvoering. Tegelijk kan er een indeling worden gemaakt op basis van de verliezen (luchtpaden) die een parameter zou veroorzaken.⁴ Het is echter belangrijk om te weten dat het overgrote deel van de factoren die worden teruggevonden in de literatuur, geen rekening houden met het al dan niet aanwezig zijn van luchtdichtheidsmaatregelen (zoals een luchtscherm); dit is naar onze mening van cruciaal belang om een luchtdicht gebouw te verkrijgen.

2.2.5.1 Geometrie

Vormefficiëntie. De definitie van de vormefficiëntie werd reeds aangehaald in 2.2.2.2. Vermits een efficiënte vorm van een gebouw impliceert dat de kans op complexe bouwknopen afneemt, resulteert dit tegelijkertijd in een verlaagde kans op luchtdichtheidsfouten. Deze geometrische parameter heeft bijgevolg een aanzienlijke invloed op de luchtdichtheid. In de formule (2) van deze parameter is

⁴ In deze masterproef wordt de voorkeur gegeven aan de indeling op basis van geometrie en kwaliteit; ter volledigheid worden de soorten verliezen wel toegevoegd aan het einde van dit hoofdstuk.

evenzeer de verliesoppervlakte vervat, die omgekeerd evenredig is met de vormefficiëntie. Men kan dan ook stellen dat de verliesoppervlakte indirect gecorreleerd is aan de luchtdichtheid, aangezien een groter verliesoppervlakte een kleinere vormefficiëntie betekent [34].

Aantal verdiepingen. In de literatuur ziet men het aantal verdiepingen in een gebouw als een significante parameter inzake luchtinfiltratie, daar het verhogen van het aantal verdiepingen evenzeer resulteert in meer bouwknopen. Deze parameter wordt in het algemeen onderverdeeld in twee categorieën: gebouwen bestaande uit één verdieping of gebouwen bestaande uit meerdere verdiepingen. Meerdere academici beweren dat gebouwen met één verdieping meer luchtdicht zijn dan gebouwen met meerdere verdiepingen. Er bestaat echter onenigheid in de literatuur of dit daadwerkelijk zo is, daar sommige studies net het omgekeerde beweren [36] [38] [53].

Ramen. Uit een studie van het WTCB, waarbij 5600 gebouwen werden geanalyseerd, komt voort dat er een significant aandeel in de n50-waarde toe te kennen is aan luchtinfiltratie via het buitenschrijnwerk. Bij hoge luchtdichtheidseisen ($n_{50} = 1/h$) zullen de ramen die het best presteren op vlak van luchtdichtheid (buitenschrijnwerk - klasse 4) bij 50% van de gevallen verantwoordelijk zijn voor meer dan 15% van de luchtlekken. In 10% van de gevallen leidt klasse 4 schrijnwerk tot meer dan 20% van de luchtlekken. Deze classificatie van deuren en ramen werd opgesteld door het WTCB volgens de norm NBN EN 1026. Hierbij werden 300 vensters onderworpen aan luchtdichtheidstesten, waaruit blijkt dat 87% van de beproefde ramen behoren tot klasse 4; de best presterende klasse. Dit betekent dat de technologie op vlak van ramen sterk is vooruitgaan, maar dit wil aan de andere kant ook zeggen dat er geen verder kwaliteitsonderscheid kan gemaakt worden tussen de vensterelementen van deze klasse. Derhalve heeft het WTCB voorgesteld twee bijkomende klassen aan de norm toe te voegen. In de onderstaande tabel zijn deze klassen 5 en 6 echter nog niet gewettigd door het CEN (Europees Comité voor Normalisatie) en zodoende nog niet opgenomen in de desbetreffende norm NBN EN 12207 [54].

Klasse	Draaikipvensters en vensters met enkele vleugel	Vensters met dubbele vleugel	Schuiframes (alle types)	Verbonden elementen
2 (maximumdebiet bij 50 Pa: 17 m ³ /(h.m ²))	0,00%	1,50%	0,00%	0,00%
3 (maximumdebiet bij 50 Pa: 5,67 m ³ /(h.m ²))	8,00%	7,60%	18,40%	6,80%
4 (maximumdebiet bij 50 Pa: 1,89 m ³ /(h.m ²))	26,10%	40,90%	34,20%	49,20%
5 (maximumdebiet bij 50 Pa: 0,76 m ³ /(h.m ²))	27,30%	24,20%	36,80%	27,10%
6 (maximumdebiet bij 50 Pa: 0,38 m ³ /(h.m ²))	38,60%	25,80%	10,50%	16,90%

Tabel 4: Statistische verdeling van de luchtdichtheidsprestaties van de 300 laatste in het laboratorium onderzochte schrijnwerkelementen [54]

Het onderzoek naar een verdere classificatie bracht nieuwe inzichten naar voren. Het blijkt namelijk dat draaikipvensters en vensters met enkele vleugel in het algemeen beter bestand zijn tegen luchtinfiltratie dan vensters met een dubbele vleugel. Hoewel de norm NBN B 25-002 een minimumnorm van klasse 3 oplegt, wordt het aanbevolen om – ter tegemoetkoming van de strenge luchtdichtheidseisen – te kiezen voor een klasse 4 [54].

Een andere studie die de invloedfactoren rond luchtdichtheid onderzocht, heeft een lineaire correlatie opgemerkt tussen luchtdichtheidsmetingen bij een drukverschil van 50 Pa en de totale lengte van het

schrijnwerk van alle ramen in de gebouwschil gedeeld door het netto bouwvolume. Deze correlatie komt echter vooral naar voren bij gebouwen die reeds een slechte luchtdichtheid hebben [55].

Aantal perforaties in de bouwschil. In de literatuur wordt er tot nog toe weinig onderzoek verricht naar de correlatie tussen het aantal perforaties in de bouwschil en de luchtdichtheid. In [55] wordt een zwakke, maar nog steeds positieve correlatie waargenomen. Echter, deze studie is slechts gebaseerd op 69 casestudies, waarbij enkel informatie over de perforaties beschikbaar was. Desalniettemin wordt de volledige luchtdichtheid van de schil – en dus tegelijkertijd van het luchtscherp – in belangrijke mate bepaald door de perforaties doorheen de schil en mag deze parameter in geen enkel geval aanzien worden als onbelangrijk.

2.2.5.2 Kwaliteit

Parameters die gelinkt worden aan ‘kwaliteit’ zijn direct gekoppeld aan het vakmanschap van de uitvoering tijdens de constructie. In tegenstelling tot de geometrie van een gebouw, zijn dit elementen waar een uitvoerder wél een significante invloed op heeft. De meeste studies suggereren dat kwaliteitsparameters bijgevolg een stuk doorslaggevend zijn dan geometrische parameters wat betreft de luchtdichtheid van een gebouw [26].

Structuur van de bouwschil. In de literatuur worden verschillende onderverdelingen gemaakt wanneer er wordt gesproken over de structuur van de bouwschil. De meest hanteerbare onderverdeling is gebaseerd op vier veelvoorkomende bouwmaterialen, namelijk beton, metselwerk, hout en staal. Deze categorisatie heeft betrekking op de porositeit van het materiaal. Hoe poreuzer een materiaal, hoe minder luchtdicht dit materiaal is [23]. Sommige studies wijzen uit dat gebouwen met een lichte bouwschil (een poreuzer materiaal) bijgevolg minder luchtdicht zijn dan gebouwen met een zware bouwschil. Andere studies beweren dat constructies uit metselwerk het slechtst scoren wat betreft luchtdichtheid, nog slechter dan woningen geconstrueerd uit een houtskelet. Het blijkt dat woningen die geconstrueerd worden met houtblokken evenzeer laag scoren op luchtdichtheid. De luchtdichtheid van constructies met houtblokken is erg afhankelijk van de gebruikte afsluiting. Het verschil tussen moderne afsluitingen (cellulaire rubber of expanderende naadisotatie) en klassieke afsluitingen bestaande uit minerale wol, vlas en polypropyleen is aanzienlijk [55] [56] [36].

Echter, zoals reeds aangehaald in 2.2.2.4, blijkt dat een aantal studies geen verband opmerken tussen de structuur van de bouwschil en de luchtdichtheidsprestaties van het desbetreffende gebouw. Er kan dan ook geconcludeerd worden dat er onenigheid bestaat in de literatuur wat betreft de significantie van deze parameter [23] [36].

Constructiemethode. De constructiemethode van een gebouw duidt op het al dan niet gebruik maken van geprefabriceerde elementen, in situ geconstrueerde elementen of een combinatie van beide. Er wordt gesuggereerd dat gebouwen die gebruik maken van geprefabriceerde elementen meer kans maken om luchtdicht te zijn dan gebouwen die in situ zijn geconstrueerd. Dit is te danken aan de verkleinde foutenmarge bij prefab [55]. Dit is echter niet het geval bij in situ gegoten betonnen constructies die theoretisch als luchtdicht worden beschouwd. Geprefabriceerde betonnen elementen hebben namelijk steeds een naad die voor problemen kan zorgen [57].

Ventilatiesysteem. Er is met name een verschil tussen een ventilatiesysteem met warmtewinning en andere systemen, zoals een systeem met natuurlijke ventilatie (A) of een mechanisch ventilatiesysteem (B, C, D). Bij het luchtdicht bouwen van gebouwen wordt de voorkeur gegeven aan mechanische ventilatiesystemen met warmtewinning [28]. Deze voorkeur kan verklaard worden vanuit het feit dat de ventilatiekanalen van een mechanisch systeem luchtdicht kunnen worden afgesloten tijdens

luchtdichtheidstesten. Daarenboven zorgt dit systeem voor een gecontroleerd ventilatiedebiet en een minimaal energieverlies door de warmte van de afvoerlucht te gebruiken om de aanvoerlucht op te warmen of af te koelen [28] [58].

De locatie van het ventilatiekanaal heeft evenzeer een invloed op de luchtlekkage uit dat respectievelijke luchtkanaal. Een ventilatiekanaal dat geplaatst wordt in een geconditioneerde ruimte heeft de minste lekkage. Echter, wanneer een ventilatiekanaal zich bevindt in een niet-geconditioneerde zolder of kelder, dan verhoogt dit de lekkage. De grootste lekkage wordt teruggevonden bij ventilatiekanalen die geplaatst worden in een geventileerde kruipkelder [59].

Isolatie. Er wordt geopperd dat woningen waarvan de buitenmuren met ETICS (buitengevelisolatiesysteem met pleisterwerk) zijn geconstrueerd beter op luchtdichtheid scoren dan andere woningen [58]. In een andere studie spreekt men van het beste type isolatie als zijnde polyurethaan dat wordt geplaatst aan de buitenzijde van het dragend metselwerk. Dit suggereert impliciet dat buitenisolatie een minder goede optie is, wanneer luchtdichtheid in acht wordt genomen. Opnieuw betekent dit dat er in de literatuur onenigheid bestaat omtrent deze factor en kunnen we hieruit geen conclusies trekken [26] [56] [36].

Toezicht en vakmanschap. Een aspect dat moeilijker te kwantificeren is – hoewel dit net cruciaal is voor het luchtdicht maken van een gebouw – is het vakmanschap⁵ van de werklieden en het toezicht op de luchtdichtheidswerken door de verantwoordelijken van het project. Daarnaast speelt de luchtdichtheidseis evenwel een belangrijke rol in het verkrijgen van een luchtdicht gebouw. Een gebouw waar geen eis gesteld wordt, zal nooit dezelfde luchtdichtheid bereiken als een passiefhuis met de strengst mogelijke eis. Bijna alle studies zijn het tenslotte eens dat de luchtdichtheid van een gebouw niet enkel afhangt van de gebruikte materialen, maar ook (en eigenlijk zelfs meer) van het vakmanschap van de uitvoering [26] [36] [58].

2.2.5.3 Overzicht

De volgende tabel is een duidelijke weergave van de factoren, teruggevonden in de literatuur, waarvan er met enige zekerheid mag gezegd worden dat ze het proces tot het verkrijgen van een luchtdichte constructie beïnvloeden. Dit overzicht toont niet enkel de onderverdeling tussen geometrische parameters en parameters die gelinkt worden aan de kwaliteit van de uitvoering, maar geeft ook aan welke soort verliezen een dergelijke parameter zou veroorzaken.

Invloedsparameter	Type variabele	Luchtpad
Vormefficiëntie	Geometrie	Oppervlakte-verliezen
Aantal verdiepingen	Geometrie	Lijn-verliezen
Ramen	Geometrie	Lijn-verliezen
Perforaties	Geometrie	Punt-verliezen
Structuur bouwschil	Kwaliteit	Oppervlakte-verliezen
Constructiemethode	Kwaliteit	Lijn-verliezen
Ventilatiesysteem	Kwaliteit	Punt-verliezen
Isolatie	Kwaliteit	Punt-verliezen
Toezicht en vakmanschap	Kwaliteit	Alle verliezen

⁵ Dit werd reeds uitgebreid besproken in 2.2.2.4 en zal niet opnieuw besproken worden in dit punt.

Tabel 5: Invloedparameters luchtdichtheid [26]

2.2.6 Standaardisatie

Het blijkt dat luchtdichtheid een thema is dat terugkomt in diverse onderzoeken uitgevoerd door academici die werden opgeleid in verschillende landen waar andere normen van toepassing zijn. Het mag niet verbazen dat – zoals het geval is in de meeste wetenschappelijke onderzoeken – elke auteur een eigen mening heeft met betrekking tot welke eenheden de luchtdichtheid van een gebouw moet worden uitgedrukt, hetgeen verwarrende situaties kan opleveren. In dit hoofdstuk zullen we de standaardisatie (of het gebrek eraan) inzake luchtdichtheid bondig bespreken.

2.2.6.1 Meeteenheden

Er worden in de literatuur verschillende meeteenheden gebruikt om de luchtdichtheid van een gebouw te beschrijven. De gebruikte meeteenheid is afhankelijk van meerdere factoren, voornamelijk de auteur van het artikel (en de gewoonte die deze heeft), het doel van het onderzoek en het land van uitgifte spelen een belangrijke rol. Zoals reeds vermeld, wordt in België (gewoonlijk) gebruik gemaakt van de n50-, v50- of V50-waarden. Een andere hindernis betreft een verschillende benaming van eenzelfde meeteenheid. Zo gebruikt men in [56] de afkorting ACH_{50} hetgeen in [23] wordt aangeduid als N50. Dit gebrek aan standaardisatie verhoogt de moeilijkheidsgraad om onderzoeksresultaten van diverse auteurs – of onderzoeken uitgegeven in andere landen – met elkaar te vergelijken [26] [60].

2.2.6.2 Normen

Aangezien academici in diverse landen het onderwerp luchtdichtheid behandelen, wordt men in de literatuur geconfronteerd met de afwijkende normen die per land gangbaar zijn. Dit zou echter niet mogen verbazen. Er bestaat immers geen universele bouwtraditie die in de wereld – en zelfs niet in Europa – overheerst. Bovendien zijn er onderlinge verschillen waarop deze normen in de praktijk worden toegepast. In sommige landen, zoals Frankrijk, mag een betere luchtdichtheid van het gebouw worden aangenomen via kwaliteitsmanagement benaderingen. In andere landen mag men enkel een betere luchtdichtheid aannemen als dit effectief wordt bewezen aan de hand van een pressuratietest. Daarnaast hanteren bepaalde landen, zoals Denemarken, een minimumvereiste. Dit is echter niet het geval in Duitsland waar enkel richtlijnen gelden. Kortom, deze regionale verschillen maken standaardisatie een moeilijke, maar noodzakelijke kwestie [26] [61].

2.2.6.3 Overzicht

Een overzicht van de meest voorkomende meeteenheden en normen worden getoond in de onderstaande tabel.

Land	Type gebouw/installatie	Minimale eis		Meeteenheid
België	Passief	Ja	0,6	n50 [Vol/h]
	Algemeen	Neen, Aanbeveling	/	v50 [$m^3/(h.m^2)$]
Nederland	Algemeen	Ja		[$m^3/(h.m^2)$] bij 10 Pa
Duitsland	Natuurlijke ventilatie	Neen, Aanbeveling	3	n50 [Vol/h]
	Mechanische ventilatie		1,5	

	Passivhaus standard		0,6	
UK	Woningen	Ja	10	v50 [m ³ /(h.m ²)]
Denemarken	Algemeen	Ja	1,5	[l/s.m ²] o.b.v. verwarmde vloerooppervlakte bij 50 Pa
	Lage-energie gebouwen		1	
	BEN- (NZEB) gebouwen		0,5	
Zweden	Woningen	Ja	0,6	[l/s.m ²] bij 50 Pa
Polen	Gebouwen lager dan 55 m	Ja	2,25	[m ³ /(h.m ²)] bij 100 Pa
	Gebouwen hoger dan 55 m		0,75	
	Natuurlijke ventilatie		3	n50 [Vol/h]
	Mechanische ventilatie		1,5	
Finland	Algemeen	Neen Aanbeveling	/	n50 [Vol/h]
Frankrijk	Woningen	Ja	0,6	[m ³ /(h.m ²)] o.b.v. vloerooppervlakte bij 4 Pa
	Appartementen		1	
Italië	Regionale aanpak			

Tabel 6: Regularisatie met betrekking tot de luchtdichtheid in Europa [26] [61]

2.2.7 Prognostische modellen

De steeds strenger wordende luchtdichtheidseisen zorgen ervoor dat een goede kwaliteitscontrole en een efficiënt ontwerp, niet altijd voldoende zijn om de vereiste luchtdichtheid te garanderen. Voorspellingsmodellen of voorspellende tools voor aannemers en architecten zouden daarom goed van pas komen. In dit hoofdstuk zullen we de bestaande voorspellingsmodellen bondig beschrijven, en in het bijzonder welke nadelen er aan deze modellen gekoppeld zijn, daar deze modellen in de praktijk amper toegepast worden.

2.2.7.1 Theoretische modellen

Theoretische voorspellingsmodellen worden gekalibreerd aan de hand van de stromingsvergelijking door een opening. Het is mogelijk om deze vergelijkingen (7) en (8) toe te passen op individuele openingen om deze apart te modelleren, maar de stromingsvergelijking kan evenzeer toegepast worden op een heel gebouw. Vermits een gebouw kan beschouwd worden als een aaneenschakeling van meerdere deelopeningen, is dit realiseerbaar.

Bovendien is er de mogelijkheid om deze modellen zeer nauwkeurig te maken door elke aanwezige opening apart te modelleren, maar dit is niet altijd nodig. Om tijd te besparen kunnen alle aparte openingen ook gecumuleerd worden tot één grote opening, hetgeen vanzelfsprekend minder nauwkeurig is [26] [62]. Een veelgebruikte methode om (redelijk) nauwkeurige prognostische theoretische modellen te bekomen, is via de numerieke oplossingen van de stromingsvergelijkingen – Navier-Stokes door middel van *Computational Fluid Dynamics* (CFD) – door elke opening inderdaad apart te modelleren. Daarnaast heeft deze methode een wijdverspreid gebruik binnen de wetenschappelijke wereld om complexe elektrische velden, luchtstromingen, warmteoverdrachten en massaoverdrachten te modelleren na een voorgaande discretisatie van het te onderzoeken probleem [63] [64] [65]. Echter, het nadeel van de numerieke modellen is de lange rekentijd en de benodigde rekenkracht, hetgeen ervoor

zorgt dat theoretische modellen in de praktijk weinig worden toegepast als een instrument om voorspellingen uit te voeren met betrekking tot de luchtdichtheid van een gebouw.

De extra moeilijkheid bij het gebruik van voorspellende theoretische modellen is het noodzakelijk schatten van enkele waarden die doorgaans uit metingen worden gehaald. Zo is het niet makkelijk om zonder een meting het weerstandsgetal C_d , de stromingscoëfficiënt C en de stromingsexponent n te bepalen. Daarenboven is het, zelfs met een meting, niet altijd evident om de oppervlakte van een opening te achterhalen. Het schatten van deze waarden gebeurt, bij gebrek aan een recent bijgewerkte database, via variabelen die worden teruggevonden in de literatuur voor een gelijkaardig gebouw op een gelijkaardige locatie gebouwd met een gelijkaardige constructiemethode. Hoewel een dergelijk gebouw vinden in de eerste plaats al niet altijd eenvoudig is, houdt de literatuur op geen enkele wijze rekening met de uitvoeringskwaliteit van de werklieden tijdens de constructiefase. Dit leidt bijgevolg tot een behoorlijke onnauwkeurigheid bij het simuleren van openingen met een theoretisch model [66].

2.2.7.2 Empirische modellen

Empirische voorspellingsmodellen zijn gebaseerd op datasets van voorgaande pressuratiestellen. Er kunnen twee soorten empirische modellen worden onderscheiden: regressieanalyse en artificiële neurale netwerken. Een regressieanalyse is een statistische tool die gebruikt wordt om de relatie tussen verschillende variabelen te evalueren. Tevens kan een regressieanalyse gebruikt worden als een voorspellende tool. Echter, deze soort analyses zijn slechts nuttig voor gebouwen met eigenschappen die niet veel afwijken van de geanalyseerde datasets. Artificiële neurale netwerken, daarentegen, zijn modellen met een menselijke capaciteit, namelijk leren en adapteren. Ze bestaan uit een aantal kleine processorunits en vele connecties. Deze connecties leiden telkens tot modificaties wanneer er nieuwe data binnenkomt. Deze methode heeft een zeker potentieel om een goede voorspellingstool te zijn wanneer de luchtdichtheid van een bepaalde regio of streek moet voorspeld worden [26].

2.2.7.3 Gebouwkarakteristieke modellen

Dit type voorspellingsmodel is het meest geschikt voor architecten. Gebouwkarakteristieke modellen laten namelijk toe om de luchtdichtheid te bepalen op basis van gebouwkenmerken door gebruik te maken van eenvoudige formules. Hierbij wordt het lekdebiet berekend door bepaalde coëfficiënten te vermenigvuldigen, afhankelijk van het type constructie, het type dak, de kwaliteit van het vakmanschap en andere randvoorwaarden. Deze methode werd verder ontwikkeld door, naast de voorgaande coëfficiënten, ook rekening te houden met de gevel en de vorm van het gebouw. Hoewel deze methode een krachtig hulpmiddel zou kunnen zijn voor architecten, is deze niet toepasbaar voor nieuwe gebouwen. Deze methode is namelijk gebaseerd op gegevens uit databases – zoals AIVC en SBR – die ondertussen verouderd zijn (en dus achterhaald). Tevens wordt het verschijnsel luchtinfiltratie niet gekoppeld aan de algemene karakteristieken van het gebouw, hetgeen zorgt voor een inaccuraat voorspelling bij de huidige luchtdichtheidseisen [26].

2.2.7.4 Enkel-component modellen

Enkel-component modellen trachten de luchtdichtheid van specifieke onderdelen – bijvoorbeeld een deur of een aansluiting van een raam – van een gebouw te beschrijven in plaats van de luchtdichtheid van een gebouw als een geheel. De bijdragen van al deze onderdelen aan de totale lekkage in het gebouw wordt gecumuleerd; het resultaat wordt geacht representatief te zijn voor de gehele lekkage van het gebouw. De reden dat deze soort modellen een potentieel vertonen als voorspellingstool, zijn te danken aan het feit dat de ontwerper en de uitvoerder meteen informatie krijgen over de impact van een bepaalde constructiemethode en het nut van specifieke luchtdichtheidsmaatregelen [26].

Deze modellen zijn – zoals de gebouwkarakteristieke modellen – gebaseerd op gegevens uit databases. Voorbeelden van deze databases zijn AIVC, ASHRAE, SENSIVV, SBR en Institut Wohnen und Umwelt. De (meeste) informatie in deze databanken dateert echter van 1982 en 1998 – lang voordat de nieuwe Europese energieregelgeving van kracht werd – wat impliceert dat men gebruik zou maken van verouderde informatie [27] [67] [68] [69].

2.3 DE RELATIE TUSSEN GEBOUWAKOESTIEK EN LUCHTDICHTHEID

De laatste jaren treden er schattingsmethodes op de voorgrond die gebruik maken van geluidsmetingen om de luchtdichtheid van een constructiedeel te bepalen, luchtlekken in een ruimte te lokaliseren en zelfs te kwantificeren. Om een theoretisch kader te verkrijgen voor het verdere onderzoek naar een dergelijke methode, dienen we de link tussen gebouwakoestiek en luchtdichtheid dan ook te verduidelijken, hetgeen zal worden gedaan in dit deel.

2.3.1 Akoestische begrippen

Alvorens er kan worden ingegaan op de relatie tussen gebouwakoestiek en luchtdichtheid, is het echter nodig om een aantal akoestische grootheden toe te lichten. Het is niet onbelangrijk om notie te hebben van de basisconcepten waarmee een onderzoek dat gebruik maakt van akoestische metingen onvermijdelijk in contact zal komen. Hierbij moet vermeld worden dat we ons in deze masterproef zullen beperken tot de begrippen die absoluut noodzakelijk zijn om het verdere onderzoek te begrijpen.

2.3.1.1 Geluiddrukniveau

Het menselijk oor heeft een logaritmische sensitiviteit voor de sterkte van geluid. Dit is de reden dat geluid gemeten wordt aan de hand van een logaritmische schaal, namelijk decibels (dB). Bijgevolg is het gangbaar om logaritmische niveaus te gebruiken in plaats van lineaire grootheden om de geluiddruk, geluidintensiteit en geluidvermogen uit te drukken. De mate van de sterkte van een geluid drukt men uit aan de hand van het geluiddrukniveau L_p .

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB] \quad (11)$$

Waarbij: p_0 = referentiegeluiddruk voor de gehoordrempel $2 \cdot 10^{-5} Pa$ of $0 dB$
 p = geluiddruk [Pa]

Naast de gehoordrempel, bestaat er ook een pijngrens, dewelke $200 Pa$ (bovenop de heersende luchtdruk) bedraagt. Deze pijngrens wordt – door gebruik te maken van logaritmische niveau – herleid naar $140 dB$. Het geluidintensiteitsniveau en het geluidvermogeniveau hebben gelijkaardige uitdrukkingen, maar deze logaritmische grootheden worden in deze masterproef niet besproken, daar ze geen bijdrage leveren aan het verdere onderzoek. Per slot van rekening is het belangrijk om te weten dat men enkel tiendelige⁶ logaritmes gebruikt in akoestische formules [70].

2.3.1.2 Wegingscurven

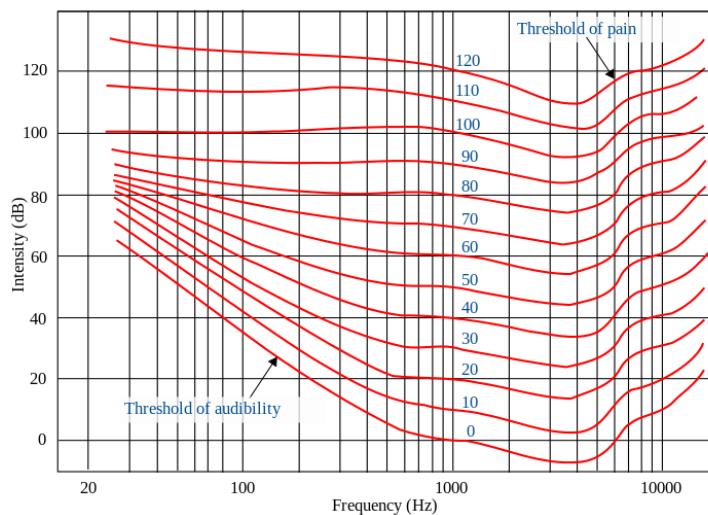
Het blijkt dat er tussen de geluidwaarneming van het menselijk oor en een meting van de geluidsterkte met een sonometer geen makkelijke relatie bestaat. Het is met andere woorden moeilijk om een objectief geluiddrukniveau L_p om te zetten naar een subjectieve luidheidsindruk zoals het gemeten geluid ervaren

⁶ Het sub-script '10' wordt echter zo goed als altijd weggelaten.

wordt door het menselijk oor. Deze luidheidsindruk zou namelijk rekening moeten houden met een aantal bijzonderheden van de menselijke geluidwaarneming:

- Geluid met frequenties tussen 20 en 20000 Hz worden gehoord;
- Logaritmische sensitiviteit (fysisch tienmaal sterker geluid wordt subjectief als tweemaal sterker ervaren);
- Behoorlijk sensitief gehoor (een rimpeling van $2 \times 10^{-5} Pa$ wordt waargenomen bij een statische luchtdruk van $1,013 \times 10^5 Pa$);
- Frequentieafhankelijke gevoeligheid (maximale gevoeligheid treedt op bij 4000 Hz wegens resonantie in het slakkenhuis).

De oplossing wordt gevonden in de vorm van wegingscurven afgeleid uit isofoonlijnen.⁷ Het objectief gemeten geluidrukniveau wordt bijgevolg gecorrigeerd aan de hand van deze wegingscurven. De meest courante correctiecurve is gebaseerd op de isofoonlijn 40 en wordt A-wegingscurve genoemd. Het resultaat wordt doorgaans gerealiseerd door een elektronische filter te plaatsen op een sonometer en heeft een andere eenheid, namelijk $dB(A)$ [71]. De onderstaande figuur geeft de isofoonlijnen grafisch weer.



Figuur 9: Isofoonlijnen [72]

2.3.1.3 Absorptie, reflectie en transmissie

Een invallende geluidsgolf op een oppervlak wordt door datzelfde oppervlak deels geabsorbeerd, deels gereflecteerd en deels doorgelaten. Aangezien de mate waarin deze drie delen voorkomen sterk varieert naargelang het beschouwde materiaal, kan men de absorptiecoëfficiënt (α) als een materiaaleigenschap beschouwen. Bovendien betekent dit dat elk oppervlak – al zij het in sommige gevallen zeer gering – geluid absorbeert, maar dit wil ook zeggen dat er een reflectiecoëfficiënt (ρ) en een transmissiecoëfficiënt (τ) bestaan. Voor deze coëfficiënten gelden de volgende definities:

$$\alpha = \frac{\text{geabsorbeerd geluid}}{\text{invallend geluid}} \quad [-]$$

$$\rho = \frac{\text{gereflecteerd geluid}}{\text{invallend geluid}} \quad [-]$$

⁷ Isofoonlijnen zijn lijnen die eenzelfde luidheidsindruk geven als het referentieniveau van een zuivere toon bij 1000 Hz .

$$\tau = \frac{\text{doorgelaten geluid}}{\text{invallend geluid}} \quad [-]$$

Het zou duidelijk moeten zijn dat er een onderling verband bestaat tussen deze drie dimensieloze grootheden, namelijk: $\alpha + \rho + \tau = 1$.

Aangezien elk oppervlak geluid absorbeert, impliceert dit dat de totale absorptie van een ruimte de som is van de absorptie van elk afzonderlijk oppervlak. De absorptie van geluid in een ruimte gebeurt echter niet ogenblikkelijk; geluid heeft namelijk een bepaalde nagalmtijd vooraleer het verdwijnt. Dit is erg makkelijk om na te gaan; het is onmogelijk om een gesprek te voeren in een ruimte zonder nagalm (het geluid zou meteen uitsterven). De nagalmtijd van een ruimte wordt gedefinieerd als het tijdsinterval waarin het geluidniveau met 60 dB afneemt nadat de geluidsbron stopt met geluid uit te zenden. De nagalmtijd wordt uitgedrukt aan de hand van de volgende formule [73]:

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad [s] \quad (12)$$

Waarbij: $T =$ nagalmtijd [s]
 $V =$ totale volume [m^3]
 $A =$ totale absorptieoppervlakte van de ruimte [m^2]

2.3.1.4 Geluidverzwakkingsindex

De transmissiecoëfficiënt is doorgaans een zeer klein getal.⁸ Omwille van deze reden wordt er een concept geïntroduceerd dat makkelijker is om mee te rekenen, namelijk de geluidverzwakkingsindex. Bovendien maakt deze logaritmische grootheid het eenvoudiger om waarden van verschillende oppervlakken met elkaar te vergelijken. De geluidverzwakkingsindex (of geluidreductie-index) heeft de volgende relatie met de transmissiecoëfficiënt:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad [dB] \quad (13)$$

Waarbij: $R =$ geluidverzwakkingsindex [dB]
 $\tau =$ transmissiecoëfficiënt [-]

Daarnaast is deze index in principe afhankelijk van de invalshoek en de frequentie van het invallend geluid, maar over het algemeen wordt aangenomen dat geluid alzijdig invalt op een wand. Het meten van de geluidverzwakkingsindex (hetzij in situ of in een laboratorium) gebeurt aan de hand van de volgende formule:

$$R = L_{pz} - L_{po} + 10 \log \frac{S}{A} \quad [dB] \quad (14)$$

Waarbij: $L_{pz} =$ geluidniveau in de zendkamer
 $L_{po} =$ geluidniveau in de ontvangstkamer
 $S =$ oppervlakte van de wand
 $A =$ totale absorptieoppervlakte van de ontvangstkamer

Ten slotte komt het echter bijna uitsluitend voor dat een wand niet enkelvoudig is, maar bestaat uit een reeks van verschillende onderdelen (een raam in een voor de rest enkelvoudige wand wordt beschouwd

⁸ Een volledig luchtdicht metselwerkverband heeft een transmissiecoëfficiënt van $\tau = 1,4 \times 10^{-7}$.

als een samengestelde wand). De resulterende geluidverzwakkingsindex van een samengestelde wand wordt als volgt bepaald [74]:

$$R_w = -10 \log \frac{\sum_1^n S_i \cdot 10^{\frac{-R_i}{10}}}{\sum_1^n S_i} [dB] \quad (15)$$

Waarbij: S_i = oppervlakte van elk wandelement i [m^2]
 R_i = geluidverzwakkingsindex van elk wandelement i [dB]

2.3.2 Transmissiepaden

Wanneer geluid doorheen een wand dringt, kan dit gebeuren via verschillende paden. Zo kan het geluid zich bewegen via driekamertransmissie, flankerende transmissie, luchtlekken, het massa-veer-massaprincipe, omloopgeluid en structurele transmissie. Driekamertransmissie, het massa-veer-massaprincipe en structurele transmissie zijn echter minder belangrijk dan de overige paden wanneer men de relatie tussen akoestiek en luchtdichtheid onderzoekt en zullen omwille van deze reden verder niet besproken worden [75].

2.3.2.1 Indirecte transmissie

Omloopgeluid. Wanneer geluid wordt overgedragen via gemeenschappelijke kanalen of gangen, zoals een plenum⁹, dan wordt dit fenomeen omloopgeluid genoemd. Omloopgeluid wordt mogelijk gemaakt door een flankerend luchtvolume van de scheidingswand en kan men beschouwen als indirecte geluidtransmissie [76].

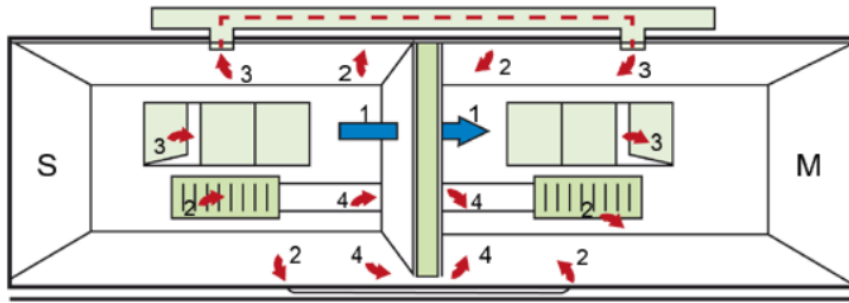
Flankerende transmissie. Geluidsoverdracht via constructieve nevenwegen (zoals een tussenwand die zich bevindt tussen ontvangstkamer en zendkamer) heet flankerende transmissie. Een constructieve nevenweg is een verbinding van meerdere bouwelementen – ook wel bouwknoop genoemd – die trillingen aan elkaar doorgeven. Daarnaast is deze indirecte transmissie omgekeerd evenredig met de oppervlakttemassa van een wand [76].

2.3.2.2 Luchtlekken

Een luchtlek zorgt ervoor dat geluid kan overgebracht worden van de zendkamer naar de ontvangstkamer. Het is zelfs zo dat – net zoals bij luchtdichtheid – geluid erg afhankelijk is van de uitvoeringskwaliteit van de akoestische isolatie. Bijgevolg verlaagt de aanwezigheid van dit akoestisch lek de geluidisolatie aanzienlijk omdat de transmissiecoëfficiënt plaatselijk gelijk wordt aan 1 (of volledige transmissie¹⁰). Het effect is des te meer merkbaar bij wanden waar de geluidverzwakkingsindex groot is (net zoals bij luchtdichtheid waar het effect van een luchtlek groter is bij een zeer luchtdicht gebouw). Dit is logisch omdat zelfs een klein luchtlek een grote invloed kan hebben op een akoestisch goed geïsoleerde wand [77]. Hieruit kunnen we vanzelfsprekend concluderen dat een luchtlek – in de meeste gevallen – evenzeer een akoestisch lek is, daar de geluidsgolven rechtstreeks worden doorgegeven. De onderstaande afbeelding geeft voorgaand besproken transmissiepaden weer: 1) direct geluid; 2) flankerend geluid; 3) omloopgeluid en 4) luchtlek.

⁹ Het plenum is de ruimte die zich bevindt tussen het werkelijk plafond en een systeemplafond.

¹⁰ Volledige transmissie kan vergeleken worden met een raam dat volledig openstaat.



Figuur 10: Transmissiepaden

2.3.3 Analytisch verband

Vermits een luchtlek en een akoestisch lek – in de meeste gevallen – hetzelfde zijn, is de correlatie vanuit een logisch standpunt duidelijk. Een luchtlek laat namelijk, naast lucht, ook geluidsgolven door en vice versa. Er blijkt echter niet direct een eenvoudige analytische relatie te bestaan die deze bouwfysische fenomenen aan elkaar linkt. Het is echter wel mogelijk om de stromingsvergelijking (7) uit te drukken aan de hand van akoestische grootheden. Beschouwt men nu de stromingsvergelijking van een stroming door een opening (8), dan blijkt het dat de lekoppervlakte A evenzeer bepaald kan worden aan de hand van akoestische formules op de volgende wijze [1]:

$$\dot{V} = AC_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (8)$$

Waarbij: \dot{V} = luchtdebiet $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
 A = oppervlakte van de opening $[m^2]$
 C_d = weerstandsgetal [-]
 ΔP = drukverschil $[Pa]$
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Ten eerste bepalen we de theoretische geluidverzwakkingsindex van de samengestelde wand met een opening aan de hand van de volgende formule [1]:

$$R_w = -10 \log \left[\frac{S_1 \cdot 10^{\frac{-R_1}{10}} + S_2 \cdot 10^{\frac{-R_2}{10}} + \dots + S_n \cdot 10^{\frac{-R_n}{10}} + S_l \cdot 10^{\frac{-R_l}{10}}}{S_1 + S_2 + \dots + S_n + S_l} \right] [dB] \quad (16)$$

Waarbij: S_l = oppervlakte van de opening
 R_l = geluidverzwakkingsindex van de opening
 S_1 = eerste deeloppervlakte van de samengestelde wand
 R_1 = geluidverzwakkingsindex van eerste deeloppervlakte van de samengestelde wand
 S_2 = tweede deeloppervlakte van de samengestelde wand
 R_2 = geluidverzwakkingsindex van tweede deeloppervlakte van de samengestelde wand
 S_n = n-de deeloppervlakte van de samengestelde wand
 R_n = geluidverzwakkingsindex van n-de deeloppervlakte van de samengestelde wand

Bovendien kan er (benaderend) gesteld worden dat de geluidverzwakkingsindex van de opening R_l gelijk is aan 0. Er zijn gedetailleerde berekeningsmethoden om de geluidverzwakkingsindex (en bijgevolg het transmissieverlies) van geluid door openingen te bepalen, maar dit valt buiten het bereik van deze masterproef [78].

Ten tweede moet er rekening worden gehouden met flankerende transmissie om de oppervlakte van het lek te bepalen. Dit betekent concreet dat er een verschil is tussen de theoretische (berekend of gemeten in labo) geluidverzwakkingsindex van de wand R_w en de gemeten (of schijnbare) geluidverzwakkingsindex in situ R'_w . De schijnbare geluidverzwakkingsindex kan als volgt uitgedrukt worden [1]:

$$R'_w = R_w - C_F [dB] \quad (17)$$

Waarbij: R'_w = schijnbare geluidverzwakkingsindex van de wand
 R_w = theoretische geluidverzwakkingsindex van de wand
 C_F = factor die flankerende transmissie in rekening brengt

De parameter C_F neemt verschillende waarden aan naargelang het gewicht van het te analyseren bouwelement en zijn flankerende elementen. Algemeen geldt [1]:

- $C_F = 0 - 2 \text{ dB}$ (zware zijconstructies, zoals beton)
- $C_F = 2 - 5 \text{ dB}$ (middelzware zijconstructies)
- $C_F = 5 - 8 \text{ dB}$ (lichte zijconstructies, zoals hout)

Vervolgens kan de uitdrukking voor de schijnbare geluidverzwakkingsindex van een wand met een opening opgesteld worden [1]:

$$R'_w = -10 \log \left[\frac{S_1 \cdot 10^{\frac{-R_1}{10}} + S_2 \cdot 10^{\frac{-R_2}{10}} + \dots + S_n \cdot 10^{\frac{-R_n}{10}} + S_l \cdot 10^{\frac{-R_l}{10}}}{S_1 + S_2 + \dots + S_n + S_l} \right] - C_F [dB] \quad (18)$$

Beschouwen we nu een vrij eenvoudig geval van een samengestelde wand met een totale oppervlakte S , theoretische geluidverzwakkingsindex R_w en schijnbare geluidverzwakkingsindex R'_w . De wand heeft een lekoppervlakte S_l en de opening heeft een geluidverzwakkingsindex R_l (dewelke benaderend gelijk is aan 0). Vermits we veronderstellen dat de opening geen bijdrage levert aan de totale geluidverzwakkingsindex van de samengestelde wand, is het mogelijk om de lekoppervlakte te isoleren aan de hand van de volgende uitdrukking [1]:

$$S_l = \left(\frac{1 - 10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S [m^2] \quad (19)$$

Tot slot kan deze lekoppervlakte ingevuld worden in de stromingsvergelijking en levert dit de volgende empirische formule om de permeantie van lucht te beschrijven:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = \left(\frac{1 - 10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S \cdot C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (20)$$

Deze formule wordt in deze vorm overigens niet teruggevonden in de literatuur.

2.3.4 Akoestische toepassingen met betrekking tot luchtinfiltratie

Hoewel er in de praktijk weinig gebruik wordt gemaakt van de relatie tussen akoestiek en luchtdichtheid, zijn er wel degelijk een aantal academici die akoestische methodes toepassen op luchtdichtheidsproblemen. Zo is het mogelijk om luchtlekken te detecteren en te lokaliseren aan de hand van akoestische metingen, maar kan evenwel de luchtstroom door deze lekken gekwantificeerd worden met geavanceerdere akoestische technieken. Tot slot is er reeds een poging ondernomen om de

luchtdichtheid van een façade te meten door gebruik te maken van een relatief eenvoudige akoestische test [79].

2.3.4.1 Detectie en lokalisatie van luchtlekken

Het is mogelijk om de luchtlekken van een bepaalde component, zoals een deur, te detecteren en lokaliseren aan de hand van akoestische *beamforming* technieken. Dit wordt gedaan met de hulp van een reeks microfoons en een luidspreker die worden geplaatst in de buurt van de component waarvan er een vermoeden heerst dat deze luchtinfiltratie mogelijk maakt. Vervolgens kunnen er metingen worden uitgevoerd met deze opstelling en brengt een softwareprogramma de luchtlekken, waarlangs naast lucht ook geluid naar binnenkomt, in kaart. Bijgevolg werkt *beamforming* vrij gelijkaardig aan de tracergasmethode, maar is deze techniek, in tegenstelling tot de tracergasmethode, niet zo arbeidsintensief. Er wordt geopperd dat het niet nodig is om achtergrondgeluid te elimineren bij deze techniek [80]. Dit moet echter met een korrel zout genomen worden.¹¹

2.3.4.2 Kwantificatie van luchtlekken

NAH is een geavanceerde akoestische techniek die niet enkel wordt gebruikt om luchtlekken te detecteren en te lokaliseren, maar ook om de grootte van deze lekken te kwantificeren. Eenvoudig gezegd, is *Nearfield Acoustic Holography* een methode waarbij een reeks geluiddrukmetingen op een bepaald oppervlak gebruikt worden om dit oppervlak driedimensionaal in kaart te brengen. Tot nog toe is de techniek enkel gebruikt om intentionele scheuren (met een eenvoudige geometrie) te kwantificeren. De opstelling is bij deze methode – hoewel het een geavanceerde techniek betreft – relatief eenvoudig [81].

Ten eerste wordt een luidspreker, die tonen speelt met een frequentie tussen 317 Hz en 5004 Hz, geplaatst voor het te analyseren proefstuk en wordt een tweedimensionaal vlak geplaatst achter ditzelfde proefstuk. Het is dit tweedimensionaal vlak waarop de akoestische metingen zullen worden uitgevoerd. Vervolgens wordt de verzamelde data geanalyseerd met *Nearfield Acoustic Holography*, om onder andere de geluiddruk te reconstrueren nabij het oppervlak, hetgeen een stuk minder vanzelfsprekend is. Er wordt aangetoond dat er een correlatie bestaat tussen het geluiddrukniveau en de grootte van een scheur in een proefstuk. Er wordt namelijk gesteld dat het geluiddrukniveau recht evenredig is met de lekoppervlakte. Tot slot is het noodzakelijk om te beseffen dat er hier geen sprake is van scheuren met een complexe geometrie. In deze scheuren is het namelijk tegensprekelijk dat er geen eenvoudig verband bestaat tussen het geluiddrukniveau en de oppervlakte van de opening [80].

2.3.4.3 Luchtdichtheid van een façade

Op basis van de correlatie tussen akoestische lekken en luchtlekken kan de luchtdichtheid van een façade bepaald worden met behulp van een eenvoudige akoestische meting. Het verband tussen beide fenomenen kan worden bewezen door een tweeledige meting; enerzijds een pressuratietest en anderzijds een akoestische meting met een luidspreker en een aantal sonometers die zowel binnen als buiten worden geplaatst.

Ten eerste is het nodig om de invloed van de luchtlekken te achterhalen door de invloed van de overige akoestische wegen constant te houden tijdens het experiment. Dit is makkelijk te realiseren door steeds dezelfde testruimte te gebruiken met wisselende luchtdichtheidsmaatregelen die enkel de luchtlekken beïnvloeden. Vervolgens moet er rekening worden gehouden met het effect van geluidreflectie in de

¹¹ Achtergrondgeluid dat het geluid uit de luidspreker zou evenaren, vormt wel degelijk een hindernis.

ruimte, hetgeen voor een significante fout zorgt indien dit over het hoofd wordt gezien. Het is echter makkelijk om het direct getransmitteerde geluid te onderscheiden van het gereflecteerde geluid door de nagalmtijd van een ruimte in rekening te brengen. Tot slot kan er, nadat de tweeledige meting is uitgevoerd en de data verzameld is, een mathematische relatie opgesteld worden die het reële ventilatievoud weergeeft in functie van het geluidrukniveaoverschil tussen de ontvangstkamer en de zendkamer door een regressieanalyse uit te voeren. De onderstaande expressie geeft de experimentele formule weer die in [2] werd bekomen:

$$n_4 = -0,0462 \Delta L_p^2 + 2,5413 \Delta L_p - 33,29 \quad (21)$$

Waarbij: n_4 = reële ventilatievoud bij 4 Pa
 ΔL_p = geluidrukniveaoverschil

Het zou duidelijk moeten zijn dat deze relatie niet zomaar gebruikt kan worden voor elke wand. Deze expressie is namelijk enkel geldig voor façades met een gelijkaardige opbouw als de façade gebruikt in dit experiment. Daarbij is het nodig dat het verschil in geluidrukniveau binnen hetzelfde interval valt als de façade in dit experiment [2]. Het is echter wel mogelijk om een dergelijk experiment te herhalen voor andere wanden en zodoende een experimentele formule te verkrijgen voor façades die een afwijkende opbouw hebben.

2.3.4.4 Beperkingen

Ondanks het feit dat akoestische methodes een groot potentieel hebben om gebruikt te worden in het kader van luchtdichtheid, zijn er toch een aantal beperkingen aan deze aanpak. Sommige van deze obstakels kunnen makkelijk vermeden worden, maar enkele hindernissen zijn moeilijker (of onmogelijk) te omzeilen.

Achtergrondgeluid. In elke omgeving is er wel geluid aanwezig. Hoewel achtergrondgeluid niet noodzakelijk een probleem vormt voor elke soort meting, is er toch altijd een zekere invloed waarmee rekening moet worden gehouden. Het is evenwel beter om achtergrondgeluid zoveel als het kan tot een minimum te beperken. Dit is echter niet altijd realiseerbaar op een constructiesite waar er altijd geluid is tijdens de werkuren.

Indirecte transmissie. Bij het uitvoeren van akoestische metingen zal er steeds een storing in de resultaten aanwezig zijn die te wijten is aan indirecte transmissie (hetzij flankerende transmissie of omloopgeluid). Hoewel het mogelijk is om deze extra term te schatten, zal dit echter nooit volledig accuraat zijn. Dit kan evenwel omzeild worden door gebruik te maken van dezelfde meetruimte met verschillende luchtdichtheidsmaatregelen, maar het is niet altijd mogelijk om dergelijke wisselende omstandigheden te creëren.

Totale lekoppervlakte. Hoewel de stromingsvergelijking gebruik maakt van de totale lekoppervlakte, wordt er geen rekening gehouden met de afzonderlijke deelopeningen die bijdragen aan deze oppervlakte. Dit betekent dat deze formule meerdere kleine openingen cumuleert tot één grote opening, hetgeen een foutief beeld geeft ten opzichte van de werkelijkheid. Het is echter wel mogelijk om dit in kaart te brengen met geavanceerdere akoestische meettechnieken (zoals *Nearfield Acoustic Holography*), maar dit is in de praktijk minder haalbaar voor een aannemersbedrijf.

TUSSENTIJDSE CONCLUSIE

Antwoord sub-vraag A. Het blijkt dat luchtstromingen, veroorzaakt door infiltratie en exfiltratie van lucht, niet enkel een aandeel hebben in het comfortniveau van een gebouw, maar dat deze (energie)verliezen ook aan belang hebben gewonnen inzake de energieprestatie van een gebouw. Hierdoor weegt de parameter ‘luchtdichtheid’ sterk door in de resultaten van het schilpeil (bij woningen) en heeft deze een invloed op het energiepeil van een gebouw. Luchtdichtheid mag echter niet verward worden met natuurlijke luchtinfiltratie, maar wordt, daarentegen, bepaald door de luchtinfiltratie bij een *opgelegd drukverschil*. Hoewel er een aantal methodes bestaan om de luchtdichtheid van een gebouw te meten, kan het aantonen van een goede luchtdichtheid conform de EPB-voorschriften tot op heden enkel door het laten uitvoeren van een pressuratietest door een gecertificeerd bedrijf, hetgeen een aantal nadelen met zich meebrengt, waaronder de relatief hoge kost, de weersafhankelijkheid en de lange duur bij grotere gebouwen.

Daarnaast is het realiseren van een luchtdicht gebouw een veelzijdige onderneming die reeds begint in de ontwerpfase, hetgeen betekent dat zowel de architect als de aannemer en de werklieden een voorname rol spelen in dit proces dat duurt tot de afwerkingsfase. Er hangt in die zin veel af van de keuze van het beschermd volume door de architect, de positionering van het luchtscherm en de uitvoeringskwaliteit van de ingrepen ter verkrijging van een luchtdicht gebouw. De meest doorslaggevende parameters die het verkrijgen van een luchtdicht gebouw beïnvloeden, kunnen worden onderverdeeld in twee categorieën. Enerzijds onderscheiden we geometrische parameters die – het woord zegt het al zelf – hoofdzakelijk afhangen van de geometrie van het gebouw. Tot deze categorie behoren onder andere ‘vormefficiëntie’, ‘aantal verdiepingen’, ‘aantal perforaties in de bouwschil’ en ‘totale lengte van de ramen’. Anderzijds onderkennen we kwalitatieve parameters waar, in tegenstelling tot geometrische parameters, een bouwbedrijf enigszins invloed op heeft en dewelke worden gelinkt aan de kwaliteit van de gebruikte materialen, zoals ‘constructiemethode’ en ‘ventilatiesysteem’. De meest cruciale kwalitatieve parameter is echter ‘toezicht en vakmanschap’. In die zin wordt ‘kwalitatief’ letterlijk vertaald naar de uitvoeringskwaliteit tijdens de werken en het toezicht op diezelfde werken door de verantwoordelijken van het project, hetgeen ons doet besluiten dat de menselijke factor een onmiskenbaar aandeel heeft in het verkrijgen van een luchtdicht gebouw. Hier is het ook meteen duidelijk waarom voorspellende modellen in de praktijk niet worden toegepast, het includeren van de uitvoeringskwaliteit in een dergelijk model is namelijk bijzonder moeilijk.

Tot slot wordt er vastgesteld dat een akoestisch lek en luchtlek per definitie vaak hetzelfde zijn. In die zin laat een akoestisch lek, naast geluidsgolven, evenzeer luchtstromingen passeren. Hierdoor wordt het mogelijk om de stromingsvergelijking van een luchtstroming door opening uit te drukken met behulp van akoestische grootheden en alzo een analytische verband te verkrijgen tussen akoestiek en luchtdichtheid. Het blijkt ook dat er reeds een aantal akoestische technieken bestaan met betrekking tot luchtdichtheidstoepassingen, in het bijzonder is het mogelijk om luchtlekken te lokaliseren, luchtlekken te kwantificeren en om zelfs de luchtdichtheid van een façade te bepalen, maar deze methodes hebben wel enkele beperkingen.

3 CASESTUDY

3.1 INLEIDING

In de casestudy zal een vergelijkend onderzoek uitgevoerd worden die de luchtdichtheidsmaatregelen die in de praktijk worden gehanteerd (en de wijze waarop deze worden toegepast), toetst aan de luchtdichtheidsmaatregelen (en hun toepassingswijzen) die worden aanbevolen door het Wetenschappelijk Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB). Het project – waarvan Belemco de hoofdaannemer is – dat zal dienen als onderzoeksplaats, betreft een schoolgebouw gevestigd in de gemeente Puurs (Antwerpen), hetgeen zich momenteel in de afwerkingsfase bevindt.

3.1.1 Projectgegevens

Project	Bouwen van een nieuwe school
Locatie	Kleine Amer 22/Rijksweg N16, 2870 Puurs
Functie	Middelbare school
Opdrachtgever	VZW Sint-Jan Berchmans Instituut
Luchtdichtheidseis	$v50 = 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$
Aannemer	Belemco nv
Architect	Architectenbureau Dewachter Stefan BVBA
Stabiliteit	Ingenieursbureau Arcade nv
Technieken	Ingenieursbureau Arcade nv

Tabel 7: Projectgegevens casestudy

3.1.2 Doel en methode

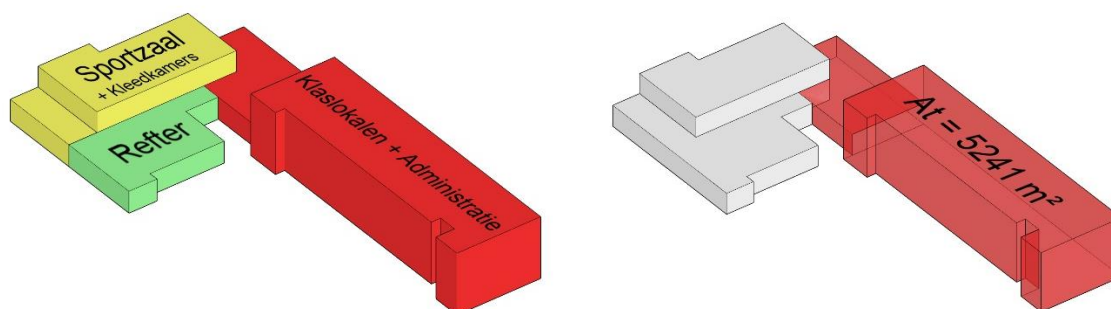
Het doel van deze casestudy is tweeledig. Enerzijds wensen we een overzicht te geven van de ingrepen die Belemco neemt om een luchtdicht gebouw te verkrijgen om zodoende een inzicht te verkrijgen op welke manier er wordt omgegaan met de huidige regelgeving inzake luchtdichtheid. Tegelijk zullen de luchtdichtheidsmaatregelen die tegenwoordig gangbaar zijn in de bouwsector in kaart worden gebracht. Anderzijds zullen we deze ‘praktische luchtdichtheidsmaatregelen’ vergelijken met de theoretische aanbevelingen van het WTCB om als het ware de praktijk te toetsen aan de theorie. Om dit doel te bereiken zullen de eigenschappen van elke uitgevoerde luchtdichtheidsmaatregel grondig worden beschreven. Hierna zal elke luchtdichtheidsmaatregel opgesplitst worden in een theoretische uitvoering en een praktische uitvoering, waarbij de praktische uitvoering wordt toegelicht aan de hand van in situ genomen foto’s, uitvoeringsdetails geleverd door Belemco en illustraties van andere instanties. De theoretische uitvoering, daarentegen, is zowel gebaseerd op aanbevelingen en detailleringen van het WTCB als technische fiches van allerhande fabrikanten die geassocieerd worden met het plaatsen of produceren van materialen die dienen als luchtdichtheidsmaatregelen.

3.2 LUCHTDICHTHEID

3.2.1 Opgelegde eis

Zoals reeds beschreven in de projectgegevens bedraagt de opgelegde luchtdichtheidseis $v50 = 2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$, hetgeen in Vlaanderen – in tegenstelling tot het Brussels Hoofdstedelijk Gewest waar de passiefnorm geldt voor nieuwe gebouwen – als een strenge eis kan beschouwd worden. Dit werd ook bevestigd door de projectleider in kwestie. Deze eis geldt weliswaar niet voor het hele schoolgebouw,

maar is enkel van toepassing op het gedeelte van het gebouw waar zich de administratie en de klaslokalen bevinden. De onderstaande afbeeldingen geven schematisch weer waar de verschillende functies in het gebouw ingedeeld worden (links) en op welk gedeelte van het schoolgebouw de luchtdichtheidseis van toepassing is (het beschermd volume), met inbegrip van de verliesoppervlakte van het desbetreffende deel (rechts).



Figuur 11: Schematische weergave functies + plaats waar luchtdichtheidseis van toepassing is

Hieruit kan bepaald worden dat, met een totale verliesoppervlakte van 5241 m², er een maximaal lekdebiet van 10482 m³ per uur mag plaatsvinden bij deze luchtdichtheidseis. Hoewel dit impliceert dat het toegelaten zou zijn om een lekdebiet van 10482 m³ per uur te hebben, dient er bij een gebouw ook rekening te worden gehouden met ‘gedwongen verliezen’. Deze gedwongen verliezen nemen de verliezen die worden veroorzaakt door verplichte openingen, zoals de verluchttingsopeningen in de liftschaft en de boven- en onderverluchting van het verwarmingssysteem, in acht.

Op basis van de gedwongen verliezen werd reeds met een eerste berekening vastgesteld dat het maximale toegelaten lekdebiet zou overschreden worden met 5838 m³ per uur. Vermits de minimale verluchttingsoppervlakte gekend is, kan met behulp van de stromingsvergelijking van een luchtstroming door een opening het verwachte lekdebiet worden bepaald; in deze berekeningen zal het weerstandsgetal C_d constant worden gehouden met een waarde van 0,63. Hierbij kan opgemerkt worden dat deze waarde afwijkt van de gebruikelijke waarde van het weerstandsgetal, namelijk 0,611. De onderstaande tabel toont de resultaten van deze berekening.

	Minimale vereiste verluchting [m ²]	Verwacht lekdebiet [m ³ /h]
Opening liftschaft	0,066	1320,00
Bovenverluchting middenspanningslokaal gelijkvloers	0,3	6000,00
Onderverluchting middenspanningslokaal gelijkvloers	0,25	5000,00
Bovenverluchting middenspanningslokaal 2de verdieping	0,05	1000,00
Onderverluchting middenspanningslokaal 2de verdieping	0,15	3000,00
Totaal	0,816	16320,00
Maximaal toegelaten lekdebiet		10482,00
	Verschil	-5838,00

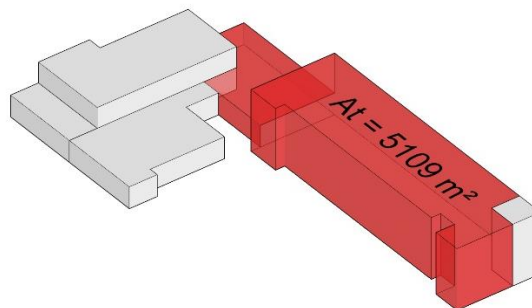
Tabel 8: Verwachte lekdebiet o.b.v. de minimale vereiste verluchting

Vermits preventief werd vastgesteld dat de opgelegde luchtdichtheidseis niet haalbaar is, moesten mogelijke alternatieven overwogen worden in functie van het beoogde E-peil. De volgende twee alternatieven werden voorgesteld:

1. Bijstellen van de luchtdichtheidseis: indien de E-peil-berekening het toelaat, is dit de meest economische oplossing, aangezien er geen verdere luchtdichtheidsmaatregelen moeten getroffen worden. Indien de gestelde luchtdichtheidseis wordt toegepast op het gebouw, exclusief de middenspanningslokalen, mag er bij een $v50 \leq 2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ ongeveer $10000 \text{ m}^3/\text{h}$ verloren gaan. In dit geval moet echter het totale lekdebiëet in acht genomen worden, wat resulteert in een bijgestelde luchtdichtheidseis van $v50 = 3 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$.

2. Aanpassen van het beschermd volume: indien de middenspanningslokalen verwijderd worden uit het beschermd volume, vermindert het verwachte lekdebiëet met $15000 \text{ m}^3/\text{h}$. De overgang van de overgebleven ruimte met de middenspanningslokalen moet in dat geval luchtdicht worden afgewerkt. De middenspanningslokalen uit het beschermd volume halen, impliceert dat de scheidingsmuren (en vloeren) moeten worden geïsoleerd, tenzij er kan geopteerd worden voor de 2% regel; de 2%-regel is een vrijstelling die geldt op de minimale isolatie-eisen op constructiecomponenten van de buitenschil. De luchtdichtheidseis van $v50 \leq 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ kan op die manier behouden worden [82].

Aangezien het verminderen van de eis streng wordt beboet in de score van het E-peil, werd logischerwijs voor de tweede optie gekozen. Dit had als gevolg dat er extra aantal maatregelen moesten genomen worden om de middenspanningslokalen buiten het beschermd volume te plaatsen, hetgeen in het volgend deel zal worden besproken. Onderstaande figuur toont het aangepaste beschermd volume dat door deze beslissing nu herleid wordt naar $A_t = 5109 \text{ m}^2$.



Figuur 12: Aangepast beschermd volume

3.2.2 Blowerdoortest

De definitieve blowerdoortest om de luchtdichtheid van het gebouw te bepalen, werd uitgevoerd op 27 maart 2018. Uit deze test blijkt dat de gemeten $v50$ -waarde $2,17 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ is bij een lekdebiëet van $V50 = 11082 \text{ m}^3/\text{h}$. Ondanks de aanpassingen aan het beschermd volume, werd de opgelegde luchtdichtheidseis dus toch niet behaald. Na een uitvoerig overleg met de architect en de bouwheer van het project werd er besloten om niettemin geen nieuwe luchtdichtheidsmaatregelen toe te passen, maar om de luchtdichtheidseis aan te passen naar de eis die gehaald wordt. Vermits de behaalde $v50$ -waarde niet erg veel afwijkt van de initieel opgelegde $v50$ -waarde, heeft dit een relatief kleine impact op het EPB-rapport. Het is belangrijk om altijd de vraag te stellen of de kost van extra luchtdichtheidsmaatregelen opweegt tegen het bijstellen van de luchtdichtheidseis.

3.2.3 Gehanteerde luchtdichtheidsmaatregelen

De luchtdichtheidsmaatregelen die door Belemco worden toegepast om een luchtdicht gebouw te verkrijgen, werden geïnventariseerd door een uitgebreid werfbezoek te doen (uiteeraard in samenspraak met de aanwezige projectleider). Tijdens deze ‘rondleiding’ konden de volgende ingrepen onderscheiden worden:

- Beploistering;
- Luchtdichte folie (ILLBRUCK ME500 Duo Folie);
- Luchtdichte coating (Blowerproof Liquid);
- Polyurethaanschuim.

3.2.3.1 Beploistering

Beploistering wordt in veel gevallen gebruikt ter afwerking van de binnen- of buitenmuren van gebouwen. Vermits opvoegen van metselwerk niet voldoende is om een grondige luchtdichtheid te bekomen, wordt deze maatregel vaak toegepast om de luchtdichtheid van metselwerk te verhogen. Ten tijde van het werfbezoek zijn er echter nog geen pleisterwerken uitgevoerd, daarom zal in dit geval enkel de theoretische aanbeveling van het WTCB besproken worden.

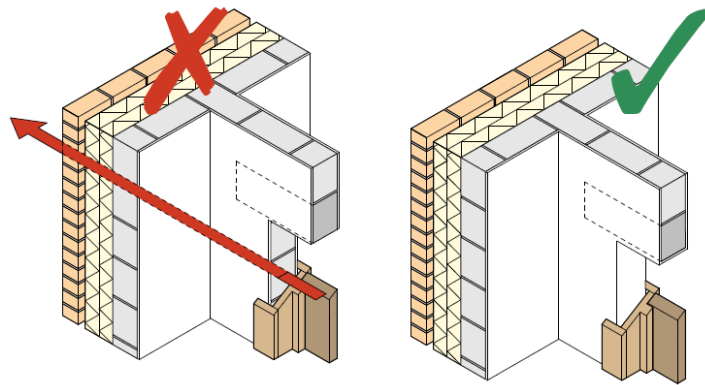
Theorie (algemeen). Een beploistering wordt doorgaans gebruikt om binnenmuren bestaande uit metselwerk luchtdicht te maken. In sommige gevallen wordt er echter geopteerd om de ruwe textuur van een metselwerkwand te behouden, hetgeen resulteert in het achterwege laten van de beploistering. Om evenwel een goede luchtdichtheid te verkrijgen in deze situatie, prefereert men het gebruik van een luchtdichte laag bestaande uit een cementering die geplaatst wordt aan de spouwzijde van het dragende metselwerk. Dit is echter geen ideale oplossing, daar het luchtscherm op meerdere plaatsen doorboord wordt door het toedoen van spouwankers. Daarenboven zal het luchtscherm nadien niet meer toegankelijk zijn voor herstellingen en wordt de aansluiting met schrijnwerk en muurvoeten complexer [35].

De onderstaande tabel van het WTCB toont het belang van beploistering bij de luchtdoorlatendheid van metselwerk aan.

Metselwerk uit betonblokken	Baksteenmetselwerk	Beploisterd metselwerk
1 tot 35	0,2 tot 50	0,02 tot 0,15

Tabel 9: v50-waardes van verschillende metselwerktypes

Uit de tabel kunnen we afleiden dat beploisterd metselwerk gemiddeld 200 keer meer luchtdicht is dan onbeploisterd metselwerk uit betonblokken en 300 keer meer luchtdicht dan onbeploisterd baksteenmetselwerk. De luchtdichtheid van metselwerk is echter niet altijd hetzelfde; in de meeste gevallen hangt de luchtdichtheid af van de uitvoeringskwaliteit, de granulometrie, de vlakheid en de droging. Daarnaast speelt de dikte van de beploistering ook een rol (bij voorkeur dient de dikte meer dan 8 mm te zijn om een duurzaam resultaat te verkrijgen). Dunne beploistering is bovendien kwetsbaarder voor temperatuurschommelingen en vochtigheid, hetgeen resulteert in het sneller optreden van scheuren. Het wordt evenzeer aanbevolen om de dagkant van binnenmuren die dwars op buitenmuren staan te beploisteren om zodoende de luchtlekken die zouden voorkomen te dichten. Dit wordt geïllustreerd in de onderstaande figuur [35].

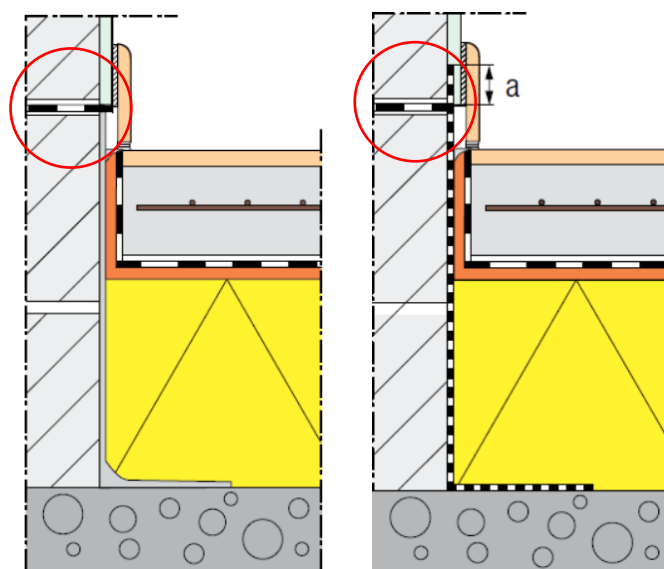


Figuur 13: Bepleistering dagkant binnenmuur [35]

Vermits een juiste uitvoering van de verbindingen tussen verschillende bepleisterde bouwelementen en oppervlakken vaak doorslaggevend is in het bekomen van een goede luchtdichtheid, zullen de belangrijkste verbindingen bondig besproken worden.

Theorie (verbindingen aan de muurvoet). Deze verbindingen zorgen bij massiefbouw in het algemeen voor weinig problemen op het vlak van luchtdichtheid. Er zijn evenwel een aantal aandachtspunten waar rekening mee gehouden dient te worden op vlak van uitvoering. Wanneer er gekozen wordt om geen vochtscherm te plaatsen, wordt er geopteerd de bepleistering door te trekken tot de bovenkant van de vloerplaat. Het pleisterwerk dient hierbij goed gedroogd te zijn alvorens de vloerafwerking wordt aangevat ter voorkoming van schimmels [83].

De hierboven beschreven oplossing wordt doorgaans echter niet aanbevolen, vanwege de langdurige vochtgevoeligheid van het pleisterwerk. Integendeel, in veel gevallen wordt er namelijk wél een vochtscherm geplaatst. De onderstaande figuren geven de twee meest voorkomende luchtdichte opties weer.

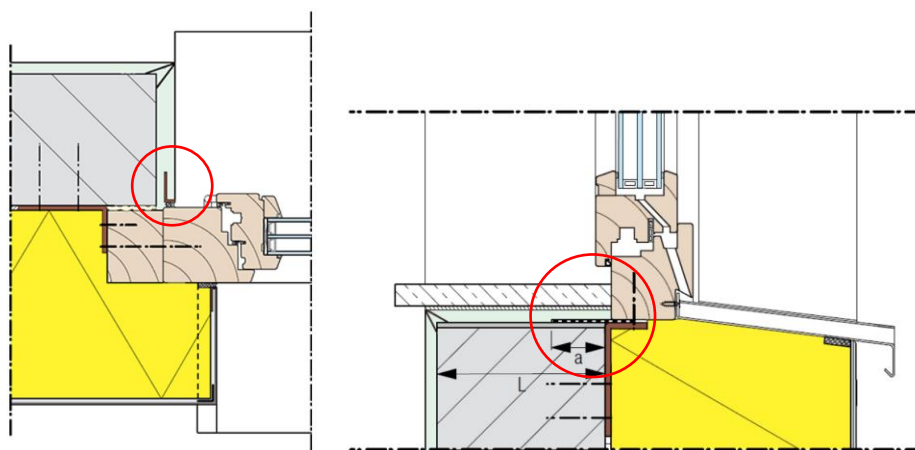


Figuur 14: Luchtdichte verbindingen aan de muurvoet [83]

Bij de eerste optie mag het gipsgebonden pleisterwerk niet verder komen dan het vochtscherm om langdurige vochtigheid van het pleisterwerk te vermijden. Dit wordt ook beschreven in het lastenboek van het project: “De bepleistering mag in geen geval de vochtwerende lagen overdekken”. Er wordt

aangeraden om cementgebonden pleisterwerk te voorzien onder het vochtscherm, hetgeen eveneens voor een deel op de vloerplaat wordt voorzien. Het nadeel hierbij is dat de continuïteit van de luchtdichtheid niet verzekerd is omwille van de onderbreking door het vochtscherm. De tweede optie lost dit probleem op door het verkleven van een luchtdicht membraan op de vloer, waarbij dit membraan ook geïntegreerd wordt in het pleisterwerk (+/- 3 centimeter) [83].

Theorie (verbindingen met het schrijnwerk). In het algemeen zijn er twee opties om de luchtdichtheid door middel van pleisterwerk rondom de raamkozijnen te verzekeren. Enerzijds kan een luchtdichte verbinding worden gerealiseerd door het gebruiken van stopprofielen met een soepele voeg. De uitvoering dient hierbij weliswaar met zorg te gebeuren. Anderzijds kan er een luchtdicht membraan worden gekleefd op het raamkozijn, waarbij dit membraan goed dient aan te sluiten op de ondergrond. De onderstaande figuren geven deze twee opties weer [83].



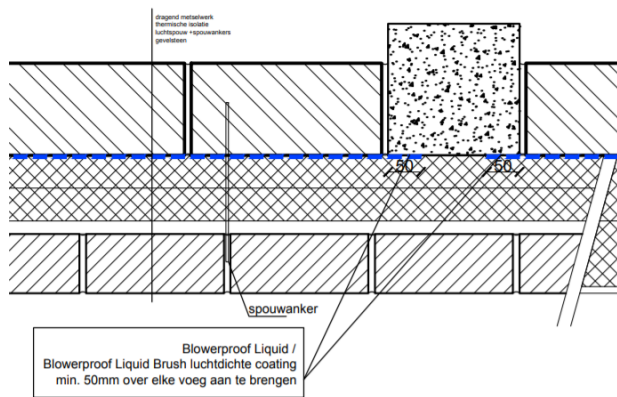
Figuur 15: Luchtdichte verbindingen met het schrijnwerk

In dit project wordt ervoor gekozen om deze laatste optie te gebruiken, hetgeen in detail zal worden besproken in 3.2.3.3.

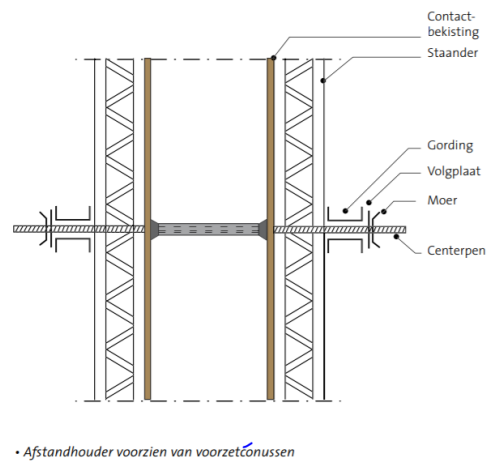
3.2.3.2 Luchtdichte coating (*Blowerproof Liquid*)

Dit is een ‘watergedragen’ polymeeremulsie die wordt aangebracht met *airless* verfspuitapparatuur. Het product droogt vervolgens tot een ‘dampremmende’ en luchtdichte flexibele coating, dewelke min of meer dezelfde eigenschappen heeft als een bitumineuze stof. Bovendien kan deze polymeeremulsie toegepast worden op volledige wanden (zowel binnen- als buitenschil), aansluitingen (wand-wand, wand-vloer, wand-plafond), dakaansluitingen en aansluiting van vliesgevels. Dit product kan bijgevolg zowel gebruikt worden om luchtinfiltratie via oppervlaktes als via aansluitingsvoegen te verminderen [84]. De technische fiche van de *Blowerproof Liquid* is gegeven in bijlage F.

Theorie. De onderstaande (horizontale) doorsnede van een uitvoeringsdetail van een traditionele spouwmuur geeft aan waar de luchtdichte coating dient aangebracht te worden. Op die manier zal de coating functioneren als luchtscherm. Indien de binnenzijde van de dragende muur niet bepleisterd is, kunnen er evenzeer luchtlekken optreden ten gevolge van doorboringen (spouwankers). Bij de uitvoering zal hiermee rekening moeten worden gehouden. De centerpennen bij systeembekistingen kunnen eveneens oorzaken zijn van luchtlekken wanneer deze niet correct behandeld worden. De figuur naast de doorsnede (rechts) toont duidelijk aan dat een centerpengat een kritische doorboring van het luchtscherm (in dit geval ter plaatse gestort beton) kan betekenen.



Figuur 17: Toepassing van een luchtdichte coating



Figuur 16: Doorsnede bekisting

Praktijk. De onderstaande figuren tonen de toepassing van de luchtdichte coating op zowel betonstenen als ter plaatse gestort beton. Vergelijken we het bovenstaande uitvoeringsdetail met de onderstaande foto's, dan kunnen we besluiten dat de coating correct is toegepast.



Figuur 18: Toepassing Blowerproof Liquid op betonstenen en ter plaatse gestort beton

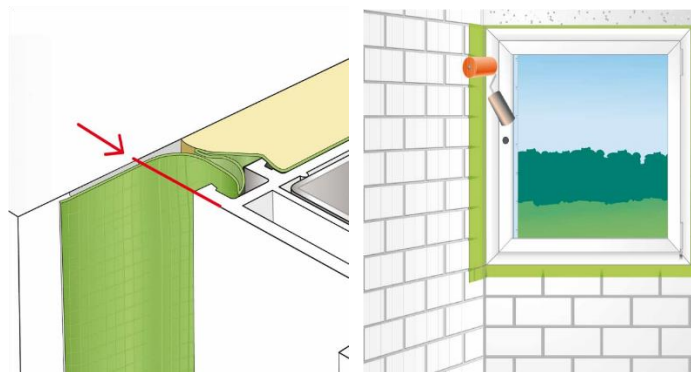
In principe is de luchtdichtheid van ter plaatse gestort beton zeer hoog, waardoor ter plaatse gestort beton in veel gevallen dan ook als luchtscherm functioneert. Er dient echter extra aandacht te worden besteed aan de aanwezige hernemingsvoegen en centerpenningen.

3.2.3.3 Luchtdichte folie (ILLBRUCK ME500 Duo Folie)

Een luchtdichte folie is een combinatie van een copolymeer polyethyleenfilm met een vezelvlies dat voornamelijk wordt gebruikt om ramen luchtdicht te maken. Aan de ene kant heeft het product een dubbelzijdige kleefband en een rubberprofiel dat aansluit op diverse raamprofielen, aan de andere kant beschikt deze luchtdichtheidsmaatregel over een kale folie voor bevestiging met folielijm en een stucgaas voor bevestiging met pleister. Er zijn drie uitvoeringsmogelijkheden wat betreft het plaatsen van luchtdichte folie; volledig langs de buitenkant, volledig langs de binnenkant of een combinatie van binnen en buiten (vooral gebruikt bij schuiframen). Wanneer men echter een combinatie gebruikt van binnen- en buitenuitvoering, bestaat de grootste kans op fouten omdat de aansluitingen volledig moeten

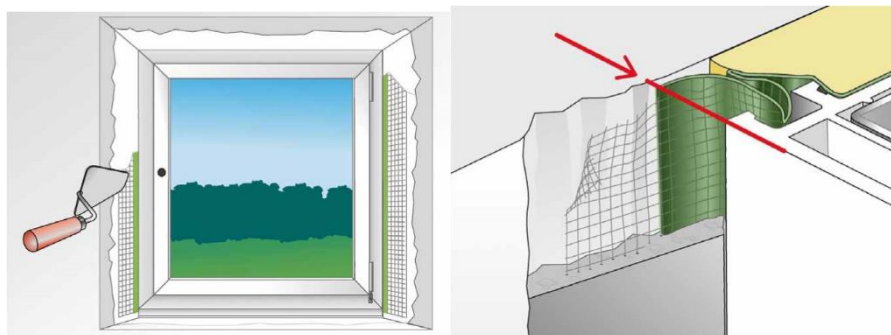
worden gekit. Bovendien is dit product niet waterdicht, maar laat het water door dat eventueel op de folie kan blijven staan. In de praktijk gebeurt dit echter niet snel omdat de folie beschermd wordt door een isolatielaag (en een spouw) [84]. De volgende theoretische uitleg is gebaseerd op de technische fiche van *Illbruck* in bijlage E.

Theorie (stap 1A). In theorie moet de kale folie – ‘slabben’ genoemd in de volksmond – gelijkmatig tussen het raamkozijn en de wand bevestigd worden met folielijm. Hierbij dient de ondergrond droog en vrij van vet, stof en kleefresten te zijn. De onderstaande figuren tonen op welke manier het vlies moet bevestigd worden.



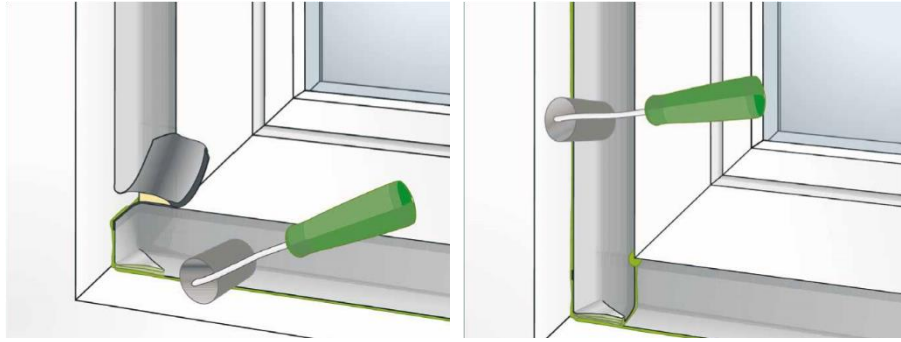
Figuur 19: Bevestiging van slabben op een kale muur

Theorie (stap 1B). Afhankelijk van de manier van afwerking in een project, kan eveneens worden gekozen voor een oplossing met stucgaas. Deze oplossing geeft een grotere garantie op hechting, gezien de folie verwerkt zit in de pleisterlaag. De onderstaande figuren illustreren dit.



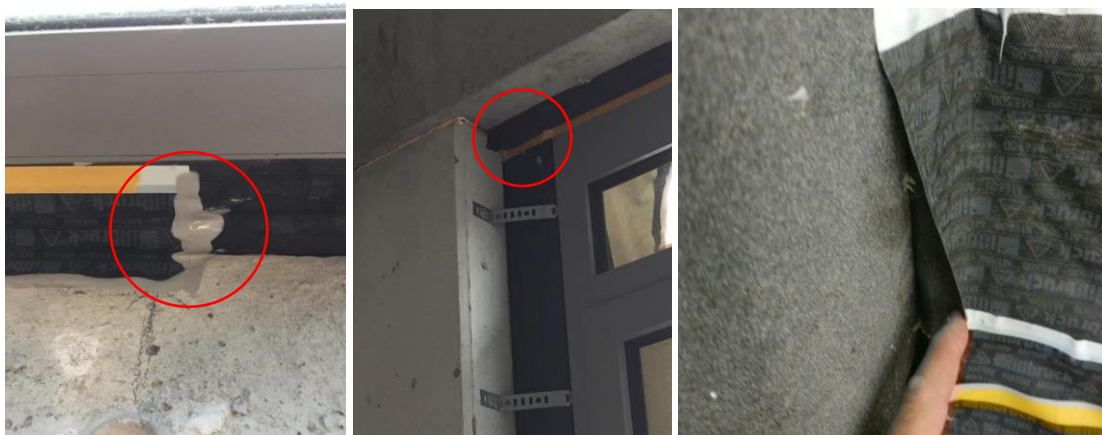
Figuur 20: Bevestiging van slabben op een bepleisterd muur

Theorie (stap 2). De volgende stap is het bevestigen van de polyethyleenfilm om de voeg tussen de muur en het raamprofiel luchtdicht te maken. Vanwege de dubbelzijdige kleefband heeft de folie enerzijds een goede hechting met het raamprofiel en anderzijds dient het vezelvlies gelijmd te worden op de reeds aangebracht slabben met de bijhorende folielijm.



Figuur 21: Bevestiging van polyethyleenfilm

Praktijk. In het project in Puurs worden alle ramen en deuren voorzien van luchtdichte folies. De onderstaande figuren tonen aan dat er voldoende aandacht dient te worden besteed aan de aansluitingen van de polyethyleenfolie met de vooraf aangebrachte slabben. De gele strook die we zien op de figuren is de dubbelzijdige kleefband die reeds besproken werd. De meest rechtse figuur toont dat de folie niet vóór de muur is geplaatst – dit wordt wel aanbevolen door het WTCB –, maar achter de muur (en dus in de spouw). Dit is in feite een logische keuze, gezien beton, in tegenstelling tot metselwerk, reeds luchtdicht is. Hierdoor kunnen we besluiten dat de aansluitingen van de folies in dit project, die werden geïnspecteerd bij het werfbezoek, goed zijn afgewerkt.



Figuur 22: Aanbrengen van de folie in de praktijk

3.2.3.4 Polyurethaanschuim

Polyurethaan (PUR) is een copolymeer dat ontstaat door de reactie van een isocyanaat en meerdere alcoholgroepen. Het is een veelgebruikt thermisch isolatiemateriaal dat, naast schuim, tevens in plaatvorm te verkrijgen is. Daarnaast wordt polyurethaanschuim evenzeer gebruikt om perforaties doorheen de bouwschil luchtdicht te maken en om betonaansluitingen (hoewel dit theoretisch een luchtdicht materiaal is) qua luchtdichtheid te verbeteren [85].

Theorie. Polyurethaanschuim wordt gekenmerkt door goede isolerende eigenschappen. Hierdoor wordt dit materiaal in verschillende bouwfases gebruikt ter opvulling van holtes en spleten. De afmetingen van de op te vullen openingen zijn dan bepalend voor de luchtdichtheidsprestatie; de diepte van de voeg moet namelijk groter zijn dan de breedte. Het is echter belangrijk om te beseffen dat PUR niet altijd luchtdicht is. Dit hangt voornamelijk samen met de densiteit en elasticiteit van het materiaal; een hogere densiteit geeft een beter resultaat en een elasticiteit van meer dan 35% is aangewezen. Door middel van een pistool kan men het schuim aanbrengen op moeilijk bereikbare plaatsen. Het probleem is in dit geval

echter dat er geen visuele controle mogelijk is om de indringing van het PUR te controleren [84].

Praktijk. De toepassing van polyurethaan wordt in dit project veelvuldig toegepast ter opvulling van spleten veroorzaakt ten gevolge van de doorboring van leidingen, maar eveneens de aansluiting tussen betonnen constructies wordt behandeld met PUR. De diepte van de voegen zijn in deze situaties altijd groter dan de breedte, waardoor men kan besluiten dat deze maatregel correct wordt toegepast. De onderstaande figuren geven beide toepassingen weer.



Figuur 23: Toepassing van PUR

3.2.3.5 Aansluiting mantelbuizen

Mantelbuizen worden gebruikt om de doorvoer van telefoonkabels, elektriciteitsleidingen, gas- en waterleidingen te verzekeren. Aangezien een dergelijke leiding doorheen het volledige gebouw gaat, bestaat de kans dat deze op een gegeven moment doorheen de luchtschil moet doorboord worden. Wanneer dit voorvalt, dient er een luchtdicht systeem voorzien te worden om de luchtperforaties tot een minimum te beperken [86].

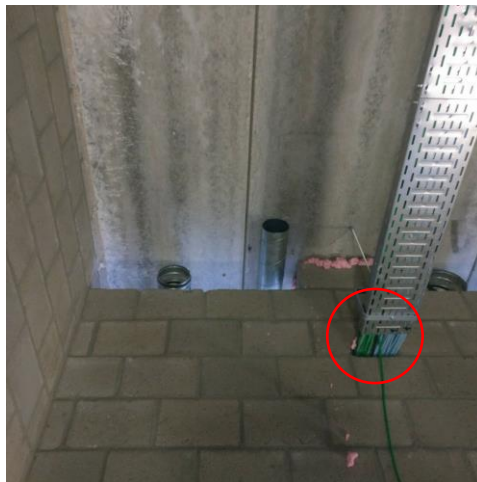
Theorie. De onderstaande figuur geeft weer hoe mantelbuizen met behulp van een mof luchtdicht kunnen worden aangesloten. Dit wordt voornamelijk gebruikt bij aansluitingen naar aanliggende ruimtes die zich niet binnen de luchtdichte schil bevinden [17].



Figuur 24: Aansluiting mantelbuizen m.b.v. luchtdichte mof [17]

Praktijk. De onderstaande figuur toont een situatie die veelvuldig voorkomt op de werf van het schoolgebouw in Puurs. Het is duidelijk dat in dit geval niet gebruik wordt gemaakt van een luchtdichte mof, wat een perforatie van de luchtdichte laag kan betekenen. Bijgevolg dient hier dan ook voldoende

aandacht aan te worden besteed. Daarenboven dienen de ventilatiebuizen, die te zien zijn bovenaan in de afbeelding, luchtdicht te worden afgewerkt wanneer deze een luchtdichte laag kruisen.



Figuur 25: Aansluiting mantelbuis in de praktijk

3.2.3.6 Liftschacht

Theorie. Volgens de regelgeving dienen liftschachten voorzien te zijn van natuurlijke ventilatie met een externe luchttoevoer. De oppervlakte van deze opening moet minimaal 1 tot 4% van horizontale oppervlakte van de schacht zijn. Dit kan tot aanzienlijke luchtlekken leiden wanneer de lift zich binnen het beschermde volume bevindt [87].

Sinds juli 2012 laat de wetgeving een oplossing toe waarbij de brandveiligheid- en luchtdichtheidseisen hand in hand gaan. Deze oplossing bestaat uit een gemotoriseerde klep die automatisch opengaat bij het optreden van een brand of wanneer er nood is aan ventilatie. Zodoende dienen de toegangsluiken en liftdeuren niet luchtdicht afgewerkt te worden [87].

Praktijk. In dit project werd ervoor gekozen om de deuren van de liftschacht wél luchtdicht af te werken. Dit is in de praktijk een vrij moeilijke opgave, daar liftschachten erom bekend staan grote luchtlekken te genereren. Daarom dient er voldoende aandacht besteed te worden aan de aansluitingen tussen de betonnen wanden en de liftdeuren, hetgeen in dit geval wordt behandeld met een luchtdichte coating. Hierbij zou een kosten-batenanalyse een hulp kunnen zijn om de juiste keuze te maken.



Figuur 26: Luchtdichting liftdeuren

TUSSENTIJDSE CONCLUSIE

Antwoord sub-vraag B. In de praxis wordt de luchtdichtheidseis – tenminste wanneer een gebouw niet dient te voldoen aan de passiefnorm – opgelegd door de architect (of de bouwheer) met het oog op het behalen van een bepaald energiepeil (E-peil) of schilpeil (S-peil). De reden dat de luchtdichtheidseis wordt opgelegd door de architect (of de bouwheer) volgt uit het feit dat omtrent dit thema in België (met uitzondering van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest waar de passiefnorm geldt voor elk nieuw gebouw) een specifieke regelgeving nog steeds ontbreekt. Bij het project in kwestie werd een luchtdichtheidseis van $v50 = 2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ opgelegd door de architect, hetgeen de uitvoerder (Belemco) aanschouwt als een vrij strenge eis.

Om deze luchtdichtheidseis te behalen, werden er door de uitvoerder een viertal luchtdichtheidsmaatregelen (bepleistering, luchtdichte folie, luchtdichte coating en polyurethaanschuim) aangewend. Vergelijken we de praktische toepassing van deze ingrepen met de theoretische aanbevelingen van het WTCB, dan kunnen we besluiten dat de praktijk over het algemeen overeenkomt met de theorie, doch niet altijd; de luchtdichte folie wordt op een andere wijze toegepast dan de aanbeveling van het WTCB en bij de aansluiting van de mantelbuizen ontbreekt een mof. Het mag echter niet verbazen dat er soms wordt afgeweken van de theorie, daar dit in bepaalde gevallen een logisch gevolg kan zijn van het ontwerp.

Ondanks de gehanteerde luchtdichtheidsmaatregelen wordt de beoogde luchtdichtheidseis, dewelke $v50 = 2 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ bedraagt, in dit project echter niet gehaald. Zelfs niet nadat, in samenspraak met de architect en de bouwheer, op voorhand reeds werd beslist om het beschermd volume aan te passen en zodoende de kans te verhogen om aan deze vrij strenge eis te voldoen. Uit het definitieve Blowerdoorverslag blijkt namelijk dat de gemeten $v50$ -waarde gelijk is aan $2,17 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$, hetgeen duidelijk de nagestreefde $v50$ -waarde overschrijdt. Na verder overleg met de architect en de bouwheer is er dan ook besloten om geen verdere luchtdichtheidsmaatregelen aan te wenden, maar werd, daarentegen, beslist om de initieel beoogde luchtdichtheidseis bij te stellen naar de behaalde $v50$ -waarde. Deze keuze rechtvaardigen de verantwoordelijken van het project door de relatief kleine impact op het EPB-rapport.

Tot slot kunnen we stellen dat een opgelegde luchtdichtheidseis inderdaad een goede richtwaarde kan zijn voor de uitvoerder, maar dat deze vooropgestelde eis niet noodzakelijk altijd gehaald wordt. Het is daadwerkelijk zo dat op een bepaald moment het rendement van de beoogde energieprestatie niet meer opweegt tegen de extra kosten die bijkomende luchtdichtheidsmaatregelen veroorzaken. In dat geval is het van groot belang een weloverwogen beslissing te maken met de verschillende stakeholders om zo tot een aanvaardbare consensus te komen.

4 ONDERZOEK

4.1 INLEIDING

In dit onderzoek trachten we na te gaan of geluidsmetingen nauwkeurig genoeg zijn om een schattingsmethode te ontwikkelen die gebruikt kan worden om de luchtdichtheid van een façade te schatten. Deze methode zou gebruik maken van de correlatie tussen de akoestische prestatie van een façade en diens luchtdichtheid.¹² Deze correlatie zal vanzelfsprekend eerst worden aangetoond door het uitvoeren van een tweeledig experiment. Enerzijds zullen er luchtdichtheidsmetingen worden uitgevoerd door middel van pressuratietesten (BlowerDoortoestel), hetgeen op dit moment de standaard vormt op internationaal vlak wat betreft het bepalen van de luchtdichtheid van een gebouw. Anderzijds zullen er geluidsmetingen worden uitgevoerd. Tot slot zullen we twee schattingsmethodes introduceren die op basis van geluidsmetingen de luchtdichtheid van een façade kunnen bepalen. Elke methode doet dit echter op een andere wijze.

4.2 PRESSURATIEMETINGEN EN GELUIDSMETINGEN

We veronderstellen dat er een verband is tussen de akoestische prestatie van een façade en diens luchtdichtheid. Om deze veronderstelling te bewijzen, worden er zowel pressuratietesten als geluidsmetingen uitgevoerd op dezelfde façade. De opzet van het onderzoek is als volgt: drie maatregelen ter verbetering van de luchtdichtheid zullen worden aangebracht op de wand, na elke maatregel zal een pressuratietest uitwijzen of de luchtdichtheid (via bepaling van het ventilatievoud) al dan niet verbetert. Tegelijk wordt een geluidsmeting uitgevoerd om te verifiëren dat de akoestische prestatie evenzeer stijgt.

4.2.1 Meetruimte

De metingen worden uitgevoerd in een ruimte die zich bevindt in een vrijstaande woning te Meeuwen-Gruitrode (Limburg). Het betreft een woning van het bouwjaar 1960, dewelke gebouwd is op een traditionele wijze, dat wil zeggen: buitenmuren bestaande uit metselwerk, een luchtspouw en binnenmuren bestaande uit (zelfgemaakte) betonstenen. In de woning bevindt de eigenlijke meetruimte zich op de eerste verdieping. Deze meetruimte heeft een hoogte van 2,37 meter en een volume van 37,9 kubieke meter. De façade die gebruikt wordt in het experiment heeft een lengte van 3,98 meter met inbegrip van een raam. Het raam bestaat uit enkel glas met een omkadering van pvc (polyvinylchloride), waarbij de afmetingen van het raam 130 x 160 centimeter bedragen. De wanden en het plafond zijn afgewerkt met gipspleister (en behangpapier in het geval van de wanden) en de vloer van de kamer bestaat uit linoleum op betonnen welfsels. De onderstaande figuren vatten de belangrijkste gegevens van de meetruimte samen.

Bouwjaar	1960
Locatie	Hensemstraat 75, Meeuwen
Functie	Slaapkamer
Breedte	3,98 m
Lengte	4,02 m
Hoogte	2,37 m

¹² In dit onderzoek zullen we gebruik maken van het ventilatievoud om de luchtdichtheid te beschrijven, hetgeen naar onze mening de beste meeteenheid is.

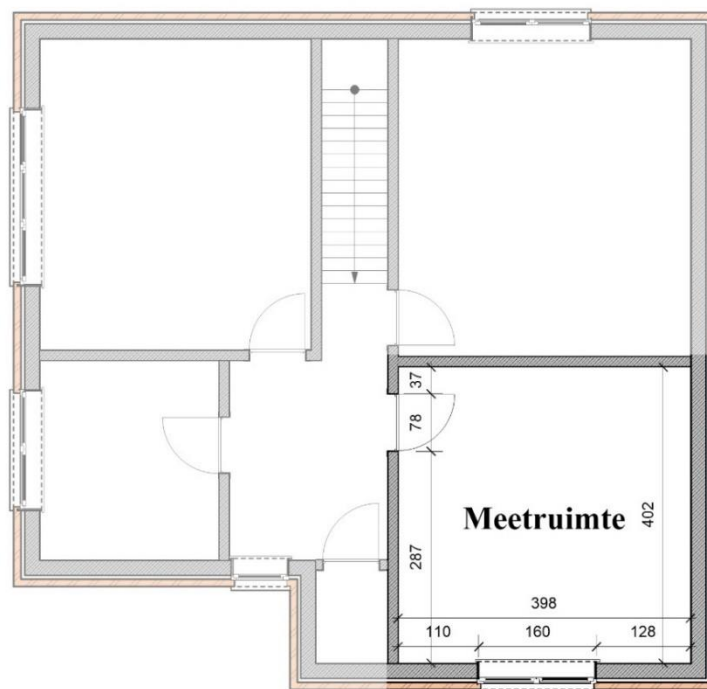
Vloeroppervlakte	15,99 m ²
Volume	37,9 m ³
Afwerking wanden	Gipspleister + behangpapier
Afwerking plafond	Gipspleister + behangpapier
Afwerking vloer	Linoleum
Materiaal raamkader	Polyvinylchloride (pvc)
Type glas	Enkel glas
Hoogte raamkader	130 cm
Lengte raamkader	160 cm

Tabel 10: Gegevens meetruimte



Figuur 27: Buitenkant woning

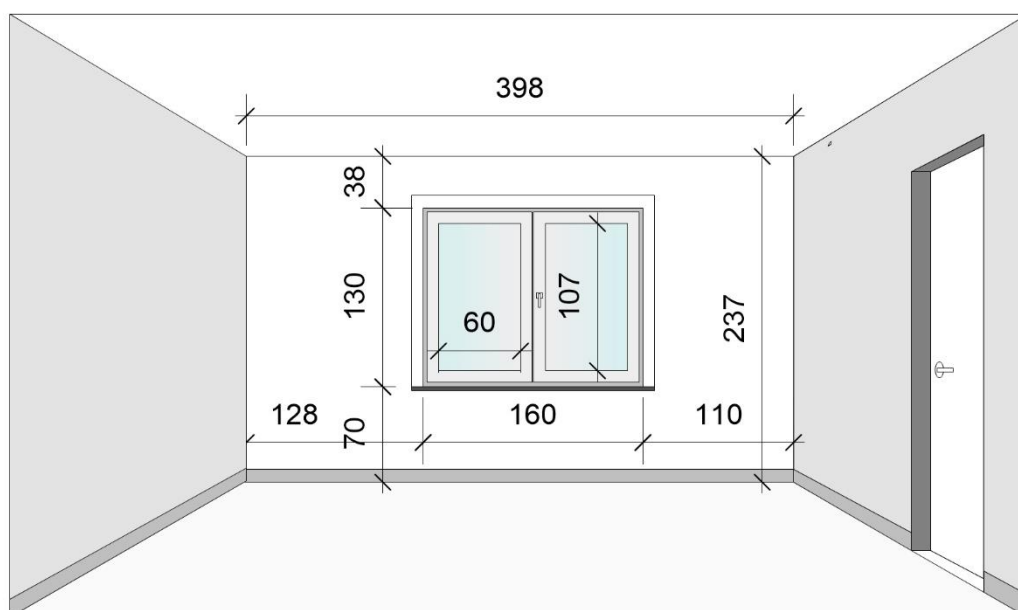
Figuur 28: Binnenkant meetruimte



Figuur 29: Grondplan meetruimte



Figuur 30: Illustratie buitenkant meetruimte

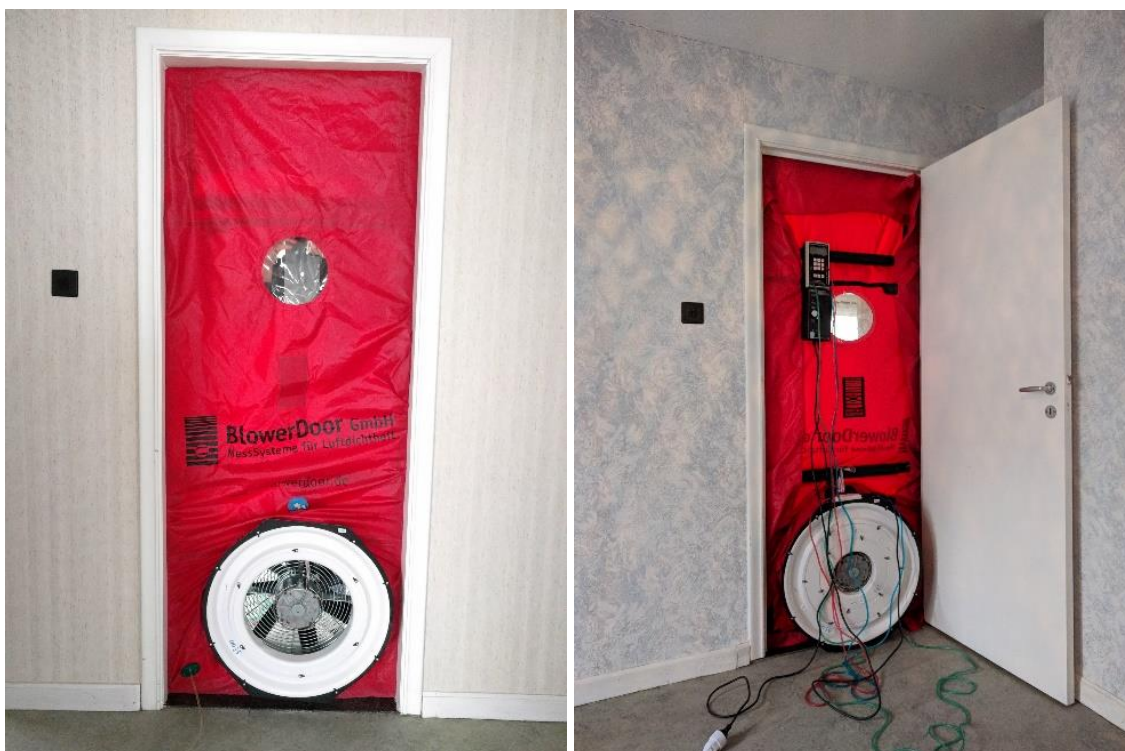


Figuur 31: Illustratie binnenkant meetruimte

4.2.2 Pressuratiemetingen

Traditioneel wordt de luchtdichtheid van een gebouw gemeten door middel van een pressuratietest. Dit is een soort drukproef waarbij er een statische onderdruk (of een statische overdruk) wordt opgelegd over de bouwschil. Vermits de pressuratietest een internationale standaard is geworden, zullen we in dit onderzoek in eerste instantie evenzeer een BlowerDoortoestel gebruiken om de luchtdichtheid van de meetruimte – en dus de façade – te bepalen. Over het algemeen worden de meeste luchtdichtheidsmetingen uitgevoerd door een statische onderdruk op te leggen, maar het wordt aangeraden om eveneens een meting uit te voeren waarbij de bouwschil in overdruk wordt gebracht. De

onderstaande figuren geven weer op welke wijze het BlowerDoortoestel nauwgezet in de deuropening van de meetruimte werd geplaatst.



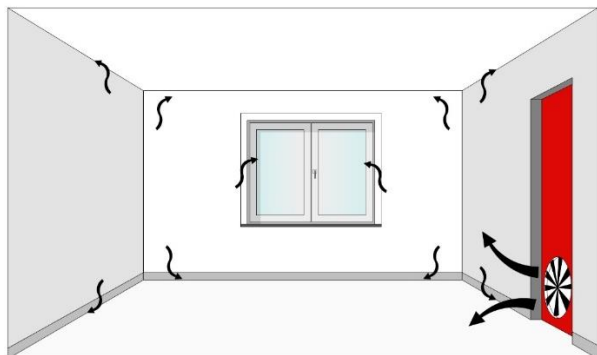
Figuur 32: Plaatsing Blowerdoortoestel in meetruimte

In deze masterproef willen we gebruik maken van de correlatie tussen de akoestische prestatie van een façade en diens luchtdichtheid. Om dit verband te vinden, zullen er systematisch maatregelen worden toegepast om de luchtdichtheid van de wand te verbeteren; nadien zullen er geluidsmetingen worden uitgevoerd die uitwijzen of deze maatregelen, naast een effect op de luchtdichtheid, tevens een invloed op de akoestische prestatie van de façade hebben. Telkens nadat een nieuwe maatregel wordt aangebracht, zullen er twee pressuratiemetingen (zowel onderdruk als overdruk) worden uitgevoerd om na te gaan of de luchtdichtheid van de wand effectief verbetert. Hierbij moeten we opmerken dat er nooit een verbetering zal worden verwijderd; het resultaat van de derde maatregel bestaat dus uit een cumulatie van de eerste maatregel, de tweede maatregel en de derde maatregel. De locatie van de maatregelen wordt bepaald door experimenteel te bepalen waar de luchtlekken zich bevinden; in deze ruimte kon dit zeer eenvoudig gebeuren door het voelen van een luchtstroming met de hand. Er werd vastgesteld dat de volgende elementen een belangrijke rol spelen in het faciliteren van de luchtstroming: 1) aansluiting van het raamkader met het houten schrijnwerk; 2) aansluiting van het houten schrijnwerk met de binnenmuur en 3) aansluiting tussen het dak en de wand. De onderstaande figuur toont het materiaal dat dienstdoet als luchtdichtheidsmaatregel.

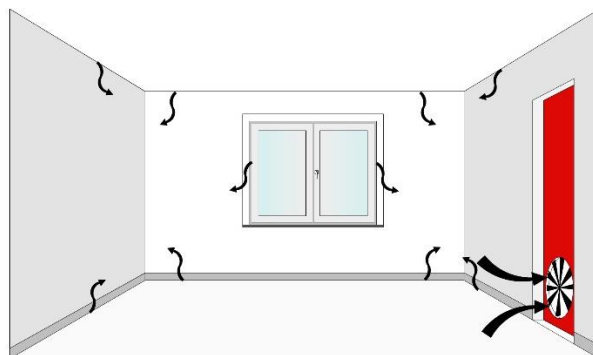


Figuur 33: Tesa® ducttape als luchtdichtheidsmaatregel

Vooraleer de luchtdichtheidsmetingen kunnen worden uitgevoerd, moet eerst het natuurlijk drukverschil bepaald worden. Het is nodig dit drukverschil te kennen omdat dit een invloed heeft op het opgelegde drukverschil gedurende de metingen. Ten tijde van de pressuratietest bedraagt het natuurlijk drukverschil 3 Pa (overdruk). De onderstaande figuren geven schematisch weer hoe de ruimte zich zal gedragen bij respectievelijk overdruk en onderdruk.



Figuur 34: Illustratie overdruk



Figuur 35: Illustratie onderdruk

Wanneer de ruimte in overdruk wordt gebracht, zal de aanwezige lucht in de ruimte zich verplaatsen van het hogedrukgebied (in de kamer) naar het lagedrukgebied (buiten). De lucht wordt dan als het ware naar buiten “geduwd”. Het omgekeerde gebeurt als een onderdruk wordt gerealiseerd in de kamer. In dit geval wordt er lucht in de ruimte “gezogen” via de aanwezige kieren en spleten.

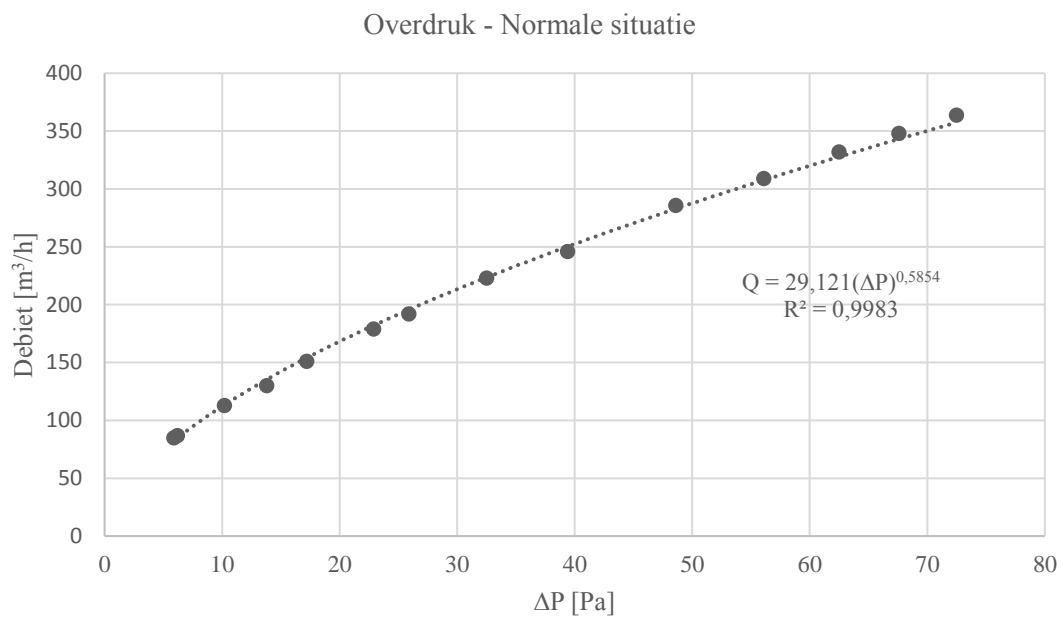
4.2.2.1 Normale situatie

Wanneer we spreken over de normale situatie, dan houdt dit in dat er nog geen maatregelen worden genomen ter verbetering van de luchtdichtheid. Vermits er wordt vermoed dat de raamaansluiting een doorslaggevende rol speelt in het mogelijk maken van de luchtinfiltratie (en luchtexfiltratie), toont de onderstaande figuur de staat waarin het raam zich oorspronkelijk bevindt.

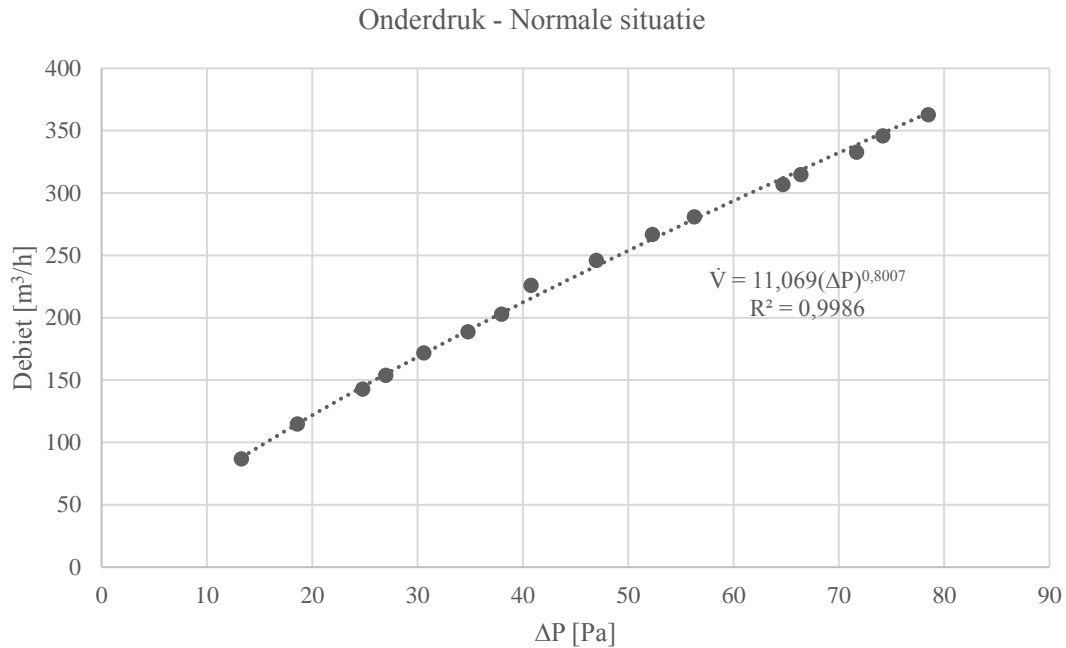


Figuur 36: Normale situatie

Zoals reeds aangehaald, zullen er steeds twee luchtdichtheidsmetingen worden uitgevoerd met het BlowerDoortoestel. Een meting waarbij er een overdruk wordt gerealiseerd en een tweede meting waarbij de ruimte in onderdruk zal worden gebracht. De onderstaande figuren geven de resultaten van deze metingen in de normale situatie weer.



Figuur 37: Resultaat – Overdruk (Normale situatie)



Figuur 38: Resultaat - Onderdruk (Normale situatie)

In België wordt de luchtdichtheid (volgens de n50- of de v50-waarde) van een gebouw bepaald door het luchtdebiet te beschouwen bij een drukverschil van 50 Pa. In deze masterproef zal er overigens enkel gebruik worden gemaakt van het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa (n50-waarde) om de luchtdichtheid te omschrijven. Vermits er in dit onderzoek twee metingen worden uitgevoerd, zal de gemiddelde waarde van beide metingen gebruikt worden om het debiet bij dit drukverschil vast te stellen. Dit wordt gedaan op de volgende wijze:

$$\dot{V} = 29,121 \cdot \Delta P^{0,5854} = 29,121 \cdot (50)^{0,5854} = 287,6 \frac{m^3}{h} \text{ (overdruk)}$$

$$\dot{V} = 11,069 \cdot \Delta P^{0,8007} = 11,069 \cdot (50)^{0,8007} = 253,8 \frac{m^3}{h} \text{ (onderdruk)}$$

$$\dot{V} = \frac{287,6 \frac{m^3}{h} + 253,8 \frac{m^3}{h}}{2} = 270,7 \frac{m^3}{h} \text{ (gemiddelde)}$$

Hieruit volgt dat het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa in de normale situatie gelijk is aan:

$$n_{50} = \frac{\text{gemiddelde debiet}}{\text{volume}} = \frac{270,7 \frac{m^3}{h}}{37,9 m^3} = 7,14 h^{-1}$$

Beschouwen we de resultaten van de metingen in de normale situatie, dan blijkt dat het debiet in overdruk en het debiet in onderdruk niet gelijk zijn aan elkaar.

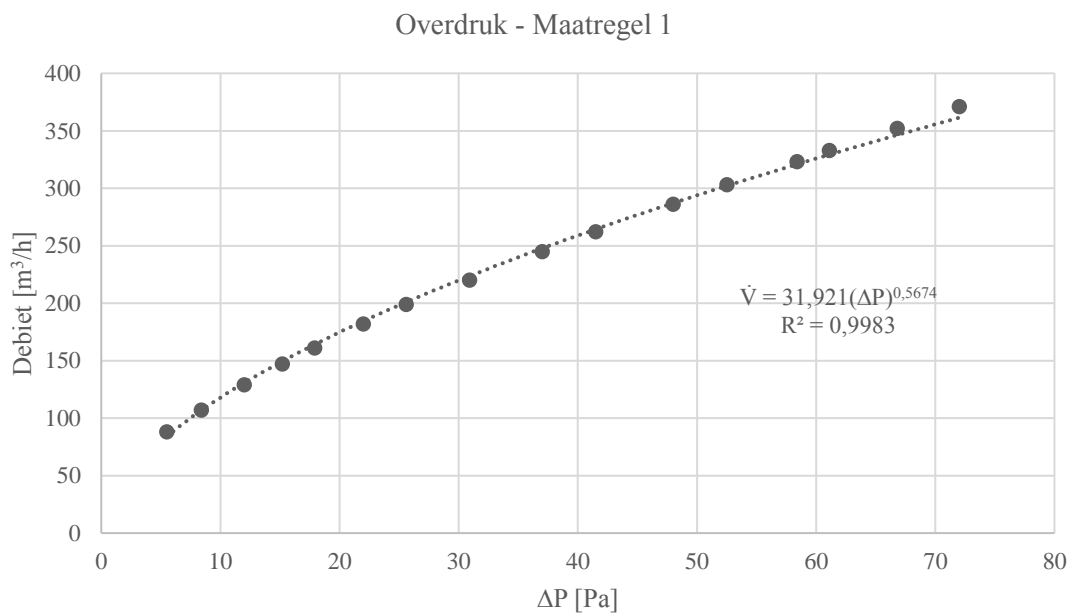
4.2.2.2 Maatregel 1

De eerste maatregel die wordt genomen om de luchtdichtheid van de façade te verbeteren, betreft het afsluiten van de aansluiting van het raamkader met het houten schrijnwerk. Het afsluiten wordt gedaan met een zwarte tape, hetgeen zichtbaar contrasteert ten opzichte van het witte raamkader. Tijdens het aanbrengen van de luchtdichtheidsmaatregel wordt er extra gelet op een goede uitvoering, zodat de (vermoedelijke) lekken effectief worden gedicht. De onderstaande figuur toont de situatie van het raam nadat de eerste maatregel is aangebracht.



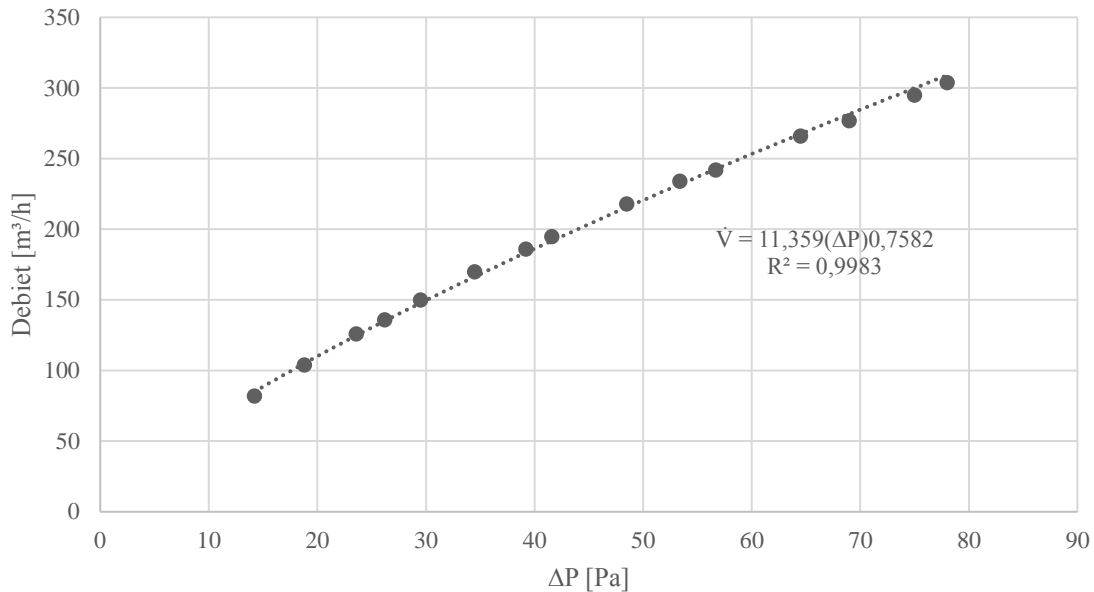
Figuur 39: Maatregel 1

Het bepalen van de luchtdichtheid van de meetruimte nadat de eerste maatregel is toegepast, verloopt volledig analoog aan de normale situatie. De onderstaande figuren tonen de resultaten van de meting in overdruk en de meting in onderdruk.



Figuur 40: Resultaat – Overdruk (Maatregel 1)

Onderdruk - Maatregel 1



Figuur 41: Resultaat - Onderdruk (Maatregel 1)

Opnieuw zullen we het debiet bij een drukverschil van 50 Pa beschouwen om de luchtdichtheid in kaart te brengen. Dit wordt op dezelfde wijze gedaan als voordien:

$$\dot{V} = 31,921 \cdot \Delta P^{0,5674} = 31,921 \cdot (50)^{0,5674} = 293,8 \frac{m^3}{h} \text{ (overdruk)}$$

$$\dot{V} = 11,359 \cdot \Delta P^{0,7582} = 11,359 \cdot (50)^{0,7582} = 220,5 \frac{m^3}{h} \text{ (onderdruk)}$$

$$\dot{V} = \frac{293,8 \frac{m^3}{h} + 220,5 \frac{m^3}{h}}{2} = 257,2 \frac{m^3}{h} \text{ (gemiddelde)}$$

Hieruit volgt dat het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa in de situatie nadat de eerste maatregel is aangebracht gelijk is aan:

$$n_{50} = \frac{\text{gemiddelde debiet}}{\text{volume}} = \frac{257,2 \frac{m^3}{h}}{37,9 m^3} = 6,79 h^{-1}$$

Nemen we de resultaten van de blowerdoormetingen na het aanbrengen van de eerste luchtdichtheidsmaatregel in beschouwing, dan valt meteen het grote verschil op tussen het debiet in overdruk en het debiet in onderdruk ($73,5 \frac{m^3}{h}$). Sterker nog, het blijkt dat het debiet in overdruk zelfs licht is gestegen ten opzichte van de normale situatie. Het debiet bij de meting in onderdruk is echter wel gevoelig gedaald ten opzichte van de normale situatie, waardoor het gemiddelde debiet evenzeer daalt. Bijgevolg kunnen we besluiten dat de luchtdichtheid van de ruimte – en dus de façade – wel degelijk verbeterd is in vergelijking met de voorgaande situatie.

4.2.2.3 Maatregel 2

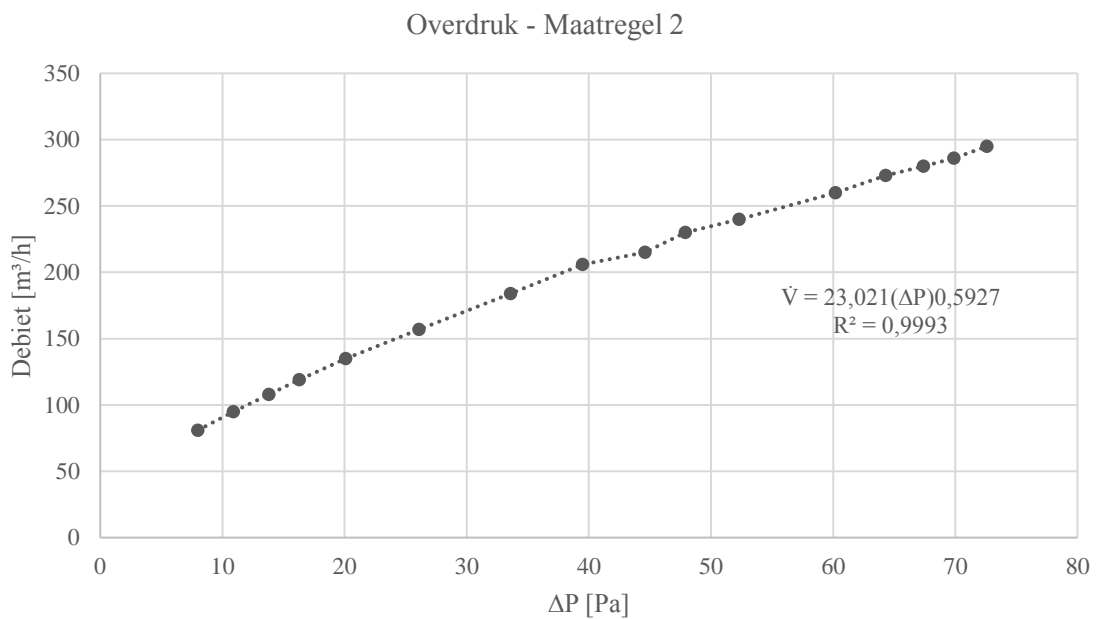
De tweede maatregel die wordt toegepast om de luchtdichtheid van de façade te verbeteren, is het dichten van de aansluiting tussen de binnenmuur en het houten schrijnwerk, waarbij opnieuw dezelfde zwarte tape wordt gebruikt. De onderstaande figuur toont de staat van het raam nadat de tweede

maatregel werd toegevoegd aan de eerste maatregel.

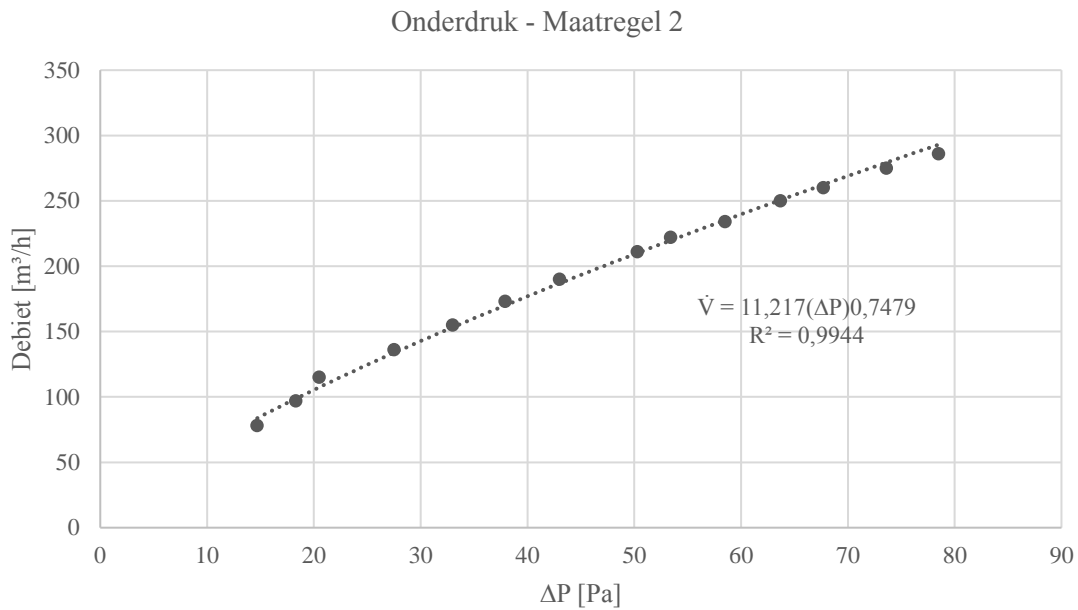


Figuur 42: Maatregel 2

De luchtdichtheidsmetingen in overdruk en onderdruk door middel van de pressurietest worden andermaal volledig analoog uitgevoerd aan de vorige twee situaties. De onderstaande figuren geven de resultaten van deze metingen weer.



Figuur 43: Resultaat – Overdruk (Maatregel 2)



Figuur 44: Resultaat – Onderdruk (Maatregel 2)

Wederom zal het debiet bij een drukverschil van 50 Pa gebruikt worden om de luchtdichtheid van de meetruimte te bepalen op dezelfde wijze als voorgaande situaties:

$$\dot{V} = 23,021 \cdot \Delta P^{0,5927} = 23,021 \cdot (50)^{0,5927} = 233,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (overdruk)}$$

$$\dot{V} = 11,217 \cdot \Delta P^{0,7479} = 11,217 \cdot (50)^{0,7479} = 209,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (onderdruk)}$$

$$\dot{V} = \frac{233,9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} + 209,2 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{2} = 221,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (gemiddelde)}$$

Hieruit volgt dat het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa in de situatie nadat de tweede maatregel wordt toegevoegd aan de eerste maatregel gelijk is aan:

$$n_{50} = \frac{\text{gemiddelde debiet}}{\text{volume}} = \frac{221,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 5,85 \text{ h}^{-1}$$

Het blijkt nu dat de luchtdichtheid van de façade ten gevolge van het toevoegen van de tweede luchtdichtheidsmaatregel opnieuw verbeterd is ten opzichte van de voorgaande situatie. Beschouwen we het resultaat van de meting in overdruk, dan lijkt de tweede maatregel wel een zichtbaar effect te hebben op het lek dat niet kon worden gedicht door de eerste maatregel.

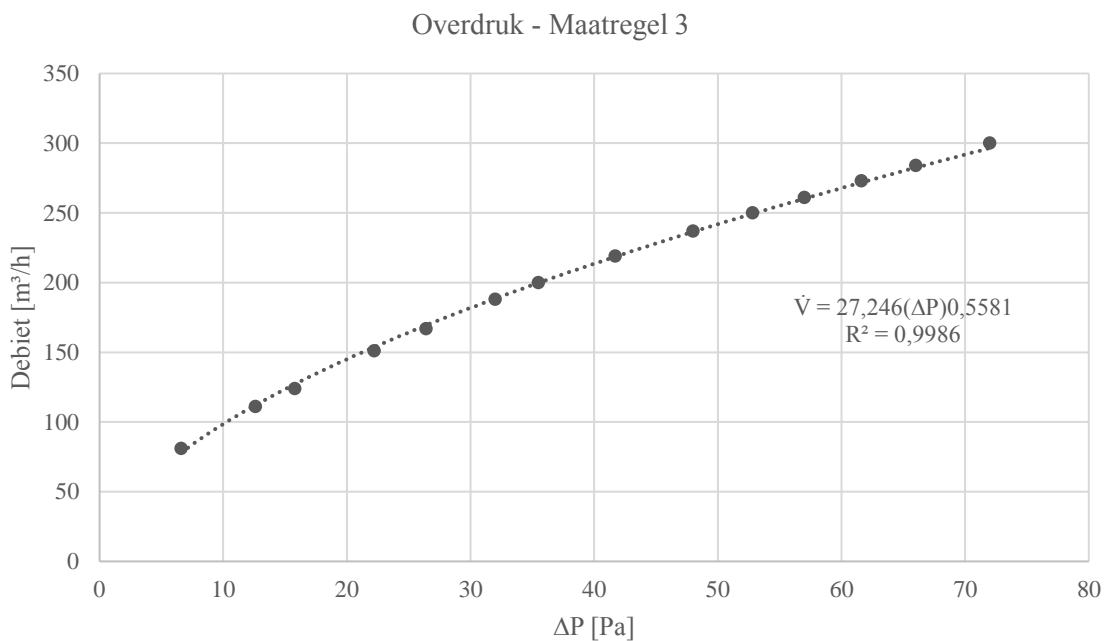
4.2.2.4 Maatregel 3

De derde (en ook laatste) maatregel die wordt aangebracht om een verbetering van de luchtdichtheid te verkrijgen, betreft het afdichten van de aansluiting tussen de muur en het dak. De onderstaande figuur geeft de toevoeging van de laatste maatregel weer.

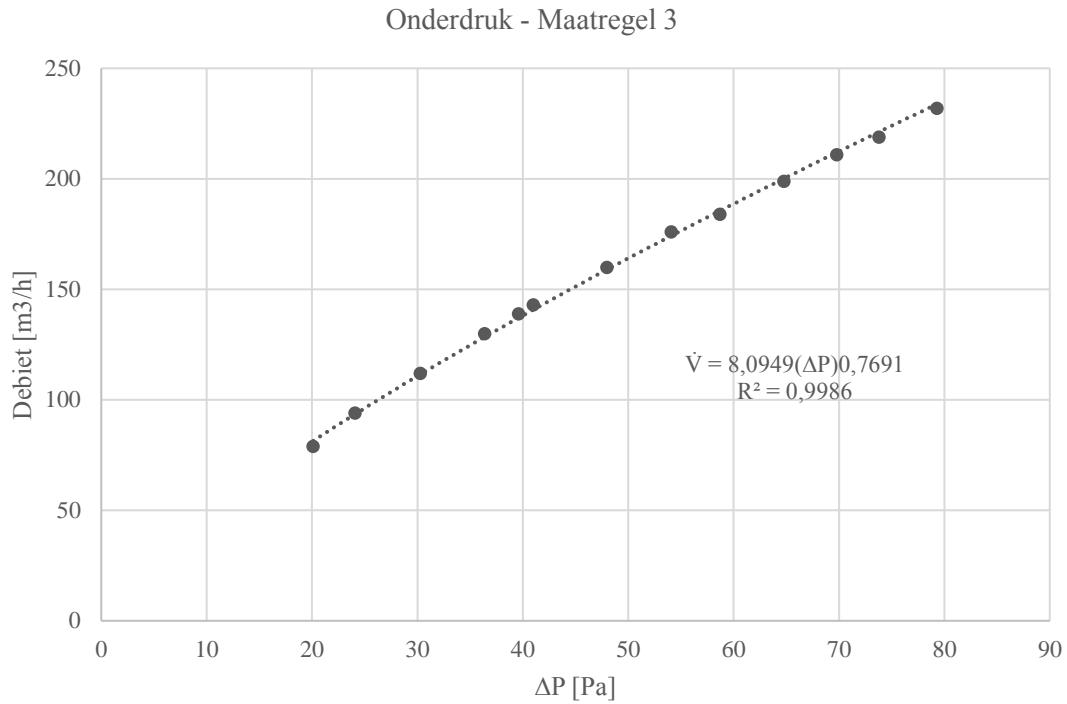


Figuur 45: Maatregel 3

Nogmaals zal dezelfde werkwijze gehanteerd worden als bij de voorgaande situaties om de debieten bij overdruk en onderdruk te bepalen in de situatie nadat de derde maatregel werd toegevoegd.



Figuur 46: Resultaat – Overdruk (Maatregel 3)



Figuur 47: Resultaat – Onderdruk (Maatregel 3)

Analoog aan de voorgaande situaties, zal ook in dit geval het debiet bij een drukverschil van 50 Pa gebruikt worden om de luchtdichtheid van de meetruimte te bepalen. Dit zal gedaan worden aan de hand van de onderstaande formules:

$$\dot{V} = 27,246 \cdot \Delta P^{0,5581} = 27,246 \cdot (50)^{0,5581} = 241,8 \frac{m^3}{h} \text{ (overdruk)}$$

$$\dot{V} = 8,0949 \cdot \Delta P^{0,7691} = 8,0949 \cdot (50)^{0,7691} = 164,0 \frac{m^3}{h} \text{ (onderdruk)}$$

$$\dot{V} = \frac{241,8 \frac{m^3}{h} + 164,0 \frac{m^3}{h}}{2} = 202,9 \frac{m^3}{h} \text{ (gemiddelde)}$$

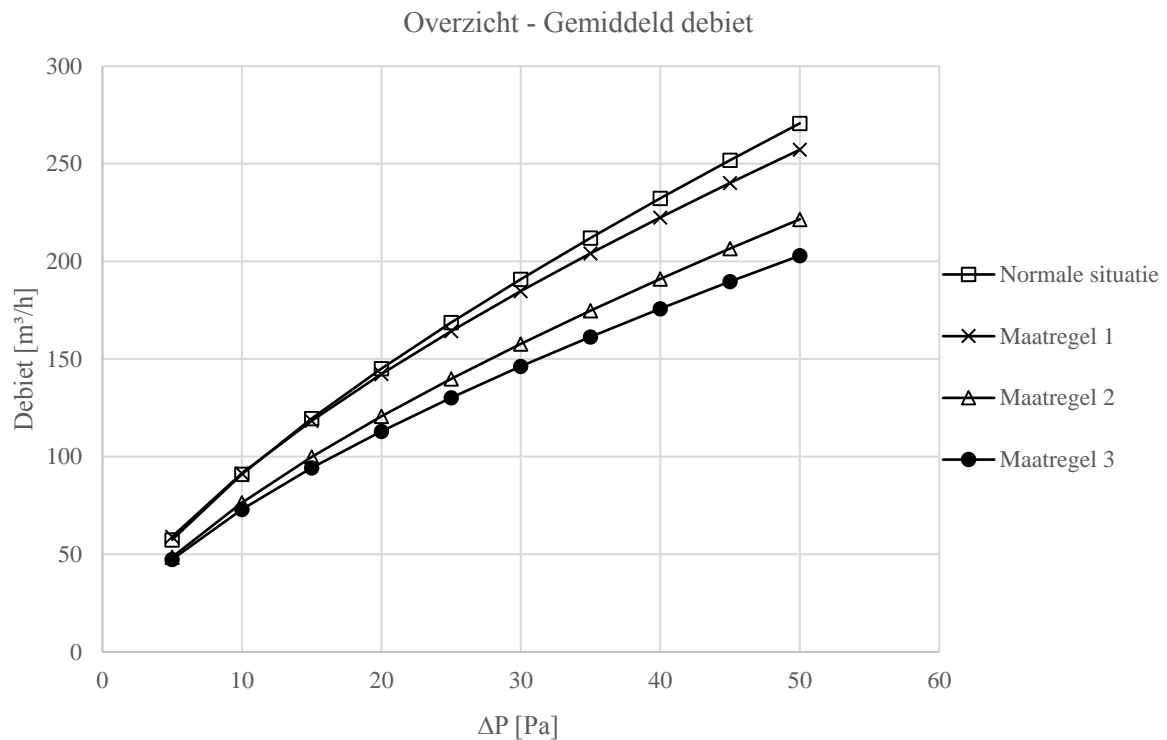
Hieruit volgt dat het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa in de situatie nadat de derde maatregel wordt toegevoegd aan de eerste en de tweede maatregel gelijk is aan:

$$n_{50} = \frac{\text{gemiddelde debiet}}{\text{volume}} = \frac{202,9 \frac{m^3}{h}}{37,9 m^3} = 5,35 h^{-1}$$

Kijken we naar het resultaat van de blowerdoormeting in overdruk, dan blijkt opnieuw dat het debiet bij deze meting niet gedaald is ten opzichte van de vorige situatie. Het gemiddelde debiet is echter wel terug gedaald ten opzichte van de voorgaande situatie, hetgeen impliceert dat de luchtdichtheid van de wand nogmaals verbeterd is.

4.2.2.5 Overzicht luchtdichtheidsmetingen

De onderstaande figuur geeft een duidelijk overzicht van de gemiddelde debieten voor elk van de voorgaande situaties.



Figuur 48: Overzicht – Gemiddeld debiet

De onderstaande tabel toont de samenvattende resultaten van de luchtdichtheidsmetingen bij een drukverschil van 50 Pa.

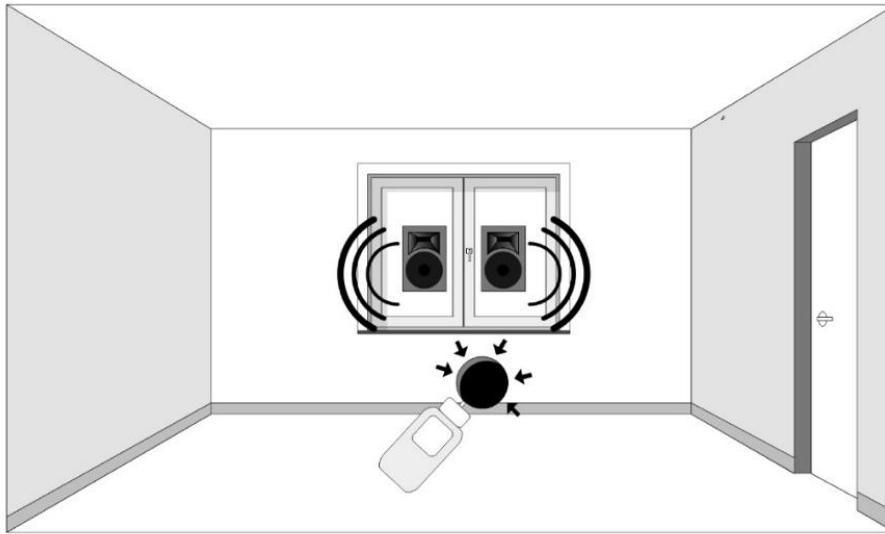
Situatie	Debiet bij 50 Pa overdruk [m³/h]	Debiet bij 50 Pa onderdruk [m³/h]	Gemiddeld debiet bij 50 Pa [m³/h]	n50 [1/h]
Normaal	287,6	253,8	270,7	7,14
Maatregel 1	293,8	220,5	257,2	6,79
Maatregel 2	233,9	209,2	221,6	5,85
Maatregel 3	241,8	164	202,9	5,35

Tabel 11: Resultaten luchtdichtheidsmetingen bij 50 Pa

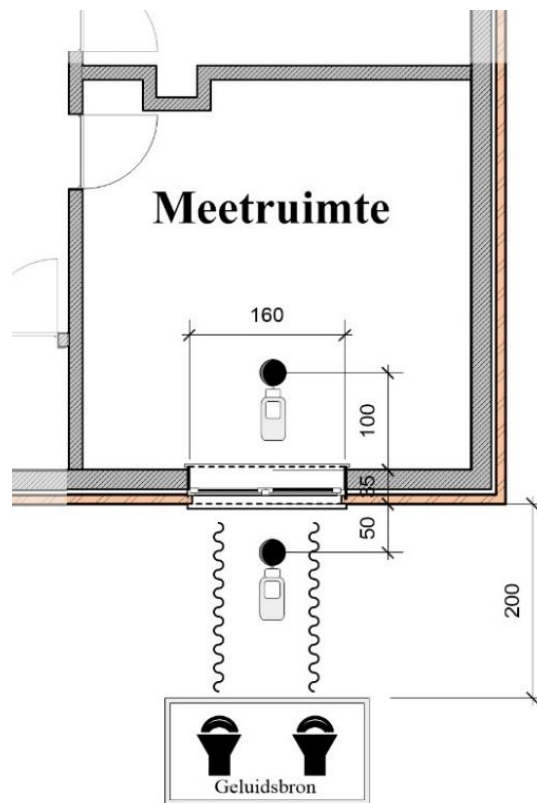
4.2.3 Geluidsmetingen

De akoestische metingen zullen worden uitgevoerd op dezelfde vier situaties waarop de (traditionele) luchtdichtheidsmetingen met het BlowerDoortoestel zijn verricht. Telkens worden er twee geluidsmetingen uitgevoerd, namelijk een eerste meting met professioneel gereedschap (*Hand-held Analyzer 2250* van het merk Brüel & Kjaer) en een tweede meting waarbij gebruik wordt gemaakt van een mobiele applicatie (*Audio Spectrum Analyzer HD Pro*). De metingen met de mobiele applicatie worden uitgevoerd om na te gaan of een (simpele) applicatie dezelfde resultaten oplevert als een professioneel apparaat, hetgeen zou betekenen dat deze metingen in de praktijk erg makkelijk te herhalen zijn. Daarnaast maken we gebruik van twee geluidsbronnen die roze ruis uitzenden (in het Engels *Pink Noise* genoemd). Dit betekent dat de geluidsbronnen geluid uitzenden met eenzelfde geluidsenergie voor elke octaaf. De gebruikte geluidsbronnen kunnen geluid produceren met een geluidsdruk niveau van ongeveer 100 dB, hetgeen impliceert dat dit inderdaad vrij krachtige geluidsbronnen zijn die het (eventueel) aanwezige achtergrondgeluid kunnen overstijgen. De

onderstaande figuren tonen de opstelling van de geluidsmetingen die in dit onderzoek zullen worden uitgevoerd.



Figuur 49: Illustratie akoestische metingen



Figuur 50: Meetopstelling van akoestische metingen



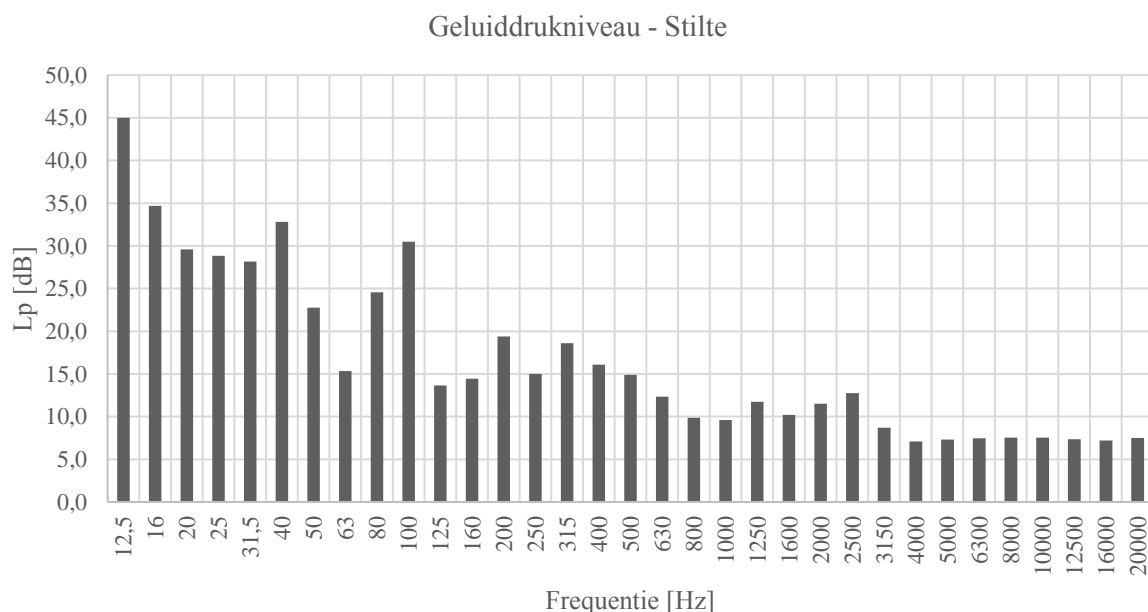
Figuur 51: Stelling met twee geluidsbronnen (roze ruis)



Figuur 52: Geluidsmeting buiten

4.2.3.1 Stilte in meetruimte

De eerste geluidsmeting die wordt uitgevoerd met de *Hand-held Analyzer 2250* betreft het bepalen van het geluidsdrukkniveau in de meetruimte wanneer de geluidsbronnen zijn uitgeschakeld. Het is belangrijk om het geluidsdrukkniveau van de “stilte” in de ruimte te kennen, om deze nadien in rekening te kunnen brengen wanneer in een later stadium de schijnbare geluidverzwakkingsindex van de wand bepaald wordt. De onderstaande figuur toont de resultaten van de eerste geluidsmeting met de *Hand-held Analyzer 2250*.



Figuur 53: Geluidsmeting binnen – Stilte

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
LZeq [dB]	45,0	34,7	29,6	28,9	28,2	32,8	22,8	15,4	24,6	30,5	13,7
Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
LZeq [dB]	14,5	19,4	15,0	18,6	16,1	14,9	12,4	9,9	9,6	11,8	10,2
Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
LZeq [dB]	11,5	12,8	8,7	7,1	7,3	7,5	7,6	7,6	7,4	7,2	7,5

Tabel 12: Geluidsmeting binnen – Stilte

Het meettoestel bepaalt naast de waarde van het geluidsdrukkniveau per frequentie evenzeer de gewogen waardes volgens de wegingscurven A en C.

A-wegingscurve: 23,4 dB(A)

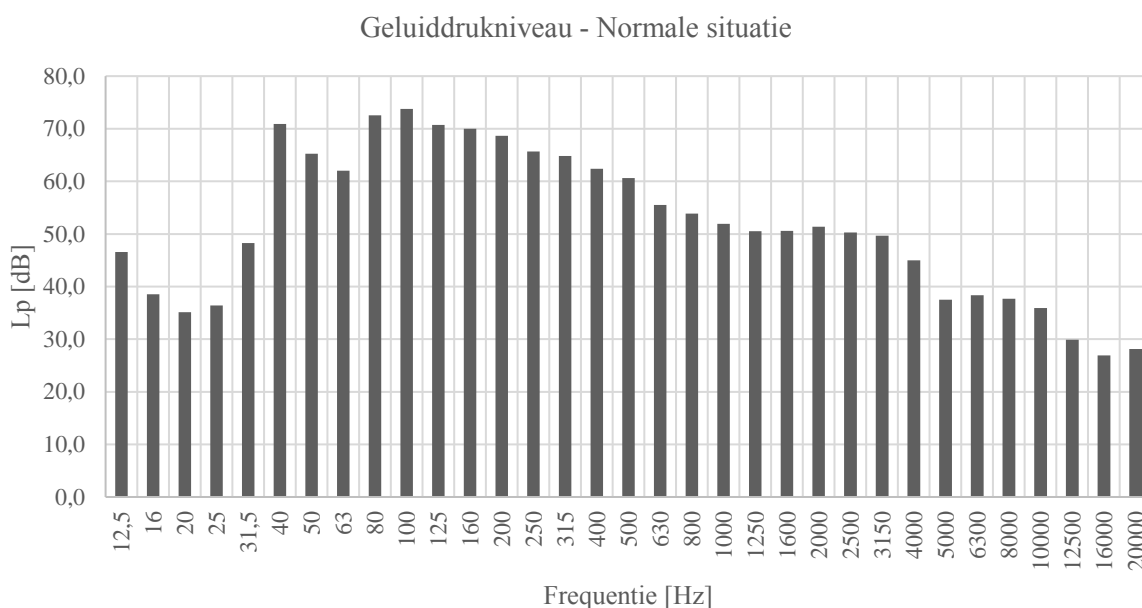
C-wegingscurve: 38,7 dB(C)

Dezelfde geluidsmeting wordt uitgevoerd met de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* om de nauwkeurigheid van deze applicatie te testen. De mobiele applicatie kan echter enkel de gewogen waarde meten aan de hand van de A-wegingscurve, hetgeen wordt weergegeven als een geheel getal.

De geluidsmeting met de van de meting *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* blijkt er af te wijken met de *Hand-held Analyzer 2250* bij het bepalen van het geluidsdrukkniveau van de stilte.

4.2.3.2 Normale situatie

Nadat het geluidsdrukkniveau van de stilte is vastgesteld, worden dezelfde situaties doorlopen als bij de luchtdichtheidsmetingen. De geluidsbronnen met roze ruis worden aangeschakeld en het geluidsdrukkniveau in de meetruimte wordt in elke situatie gemeten met zowel de *Hand-held Analyzer 2250* als de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro*. De onderstaande figuur geeft de resultaten van geluidsmeting in de normale situatie weer, gemeten met de *Hand-held Analyzer 2250*.



Figuur 54: Geluidsmeting binnen - Normale situatie

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
LZeq [dB]	46,6	38,6	35,1	36,4	48,3	70,9	65,3	62,0	72,6	73,8	70,8
Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
LZeq [dB]	70,0	68,7	65,7	64,8	62,4	60,7	55,5	53,9	51,9	50,6	50,6
Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
LZeq [dB]	51,4	50,3	49,7	45,0	37,5	38,4	37,7	35,9	29,9	26,9	28,2

Tabel 13: Geluidsmeting binnen – Normale situatie

A-wegingscurve: 67,3 dB(A)

C-wegingscurve: 79,5 dB(C)

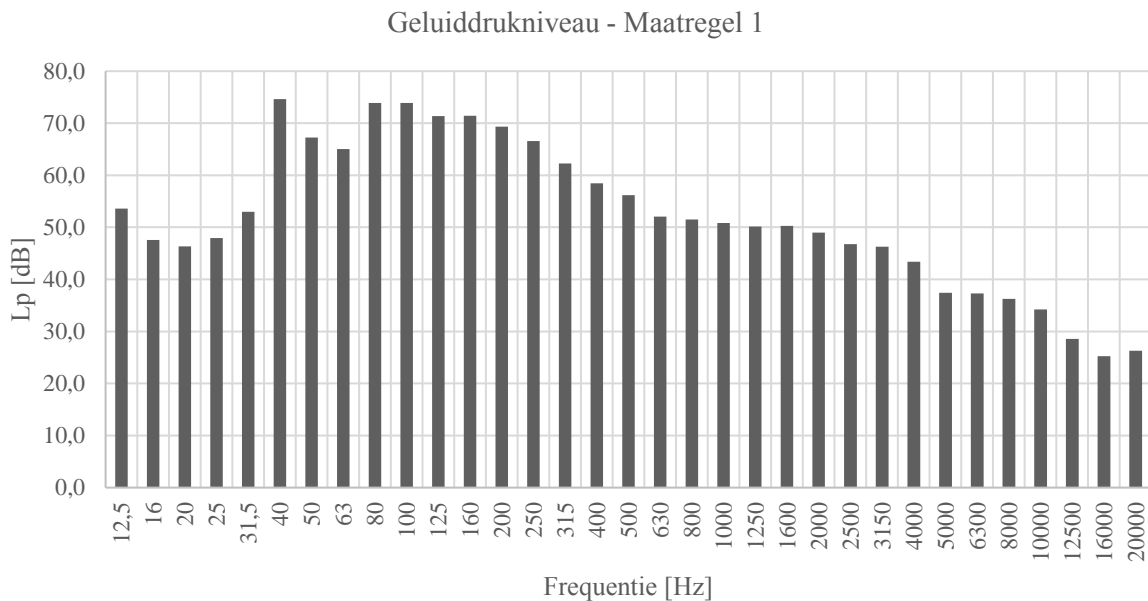
Dezelfde geluidsmeting wordt uitgevoerd met de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* om andermaal de nauwkeurigheid van deze mobiele applicatie te testen.

Audio Spectrum Analyzer HD Pro: 68 dB(A)

Wanneer we de geluidsmeting van de mobiele applicatie vergelijken met de meting van het professioneel toestel dan kunnen we besluiten dat voor het geluidsdrukkniveau in de normale situatie de mobiele applicatie een vergelijkbaar resultaat geeft.

4.2.3.3 Maatregel 1

De resultaten van de geluidsmeting met de *Hand-held Analyzer 2250* nadat de eerste maatregel is aangebracht, worden getoond in de onderstaande figuur.



Figuur 55: Geluidsmeting binnen - Maatregel 1

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
LZeq [dB]	53,6	47,6	46,4	48,0	53,0	74,7	67,3	65,1	73,9	73,9	71,4
Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
LZeq [dB]	71,5	69,4	66,6	62,3	58,5	56,2	52,1	51,5	50,8	50,2	50,3
Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
LZeq [dB]	49,0	46,8	46,3	43,4	37,4	37,3	36,3	34,3	28,6	25,3	26,3

Tabel 14: Geluidsmeting binnen – Maatregel 1

A-wegingscurve: 66,4 dB(a)

C-wegingscurve: 80,7 dB(C)

Vergelijken we het geluidsdrukkniveau nadat de eerste maatregel is toegepast met het geluidsdrukkniveau in de normale situatie (67,3 db(A)), dan blijkt dat het geluidsdrukkniveau licht is gedaald. Dit impliceert dat de verbetering van de luchtdichtheid evenzeer een positief effect heeft op de akoestische prestatie van de façade van de meetruimte.

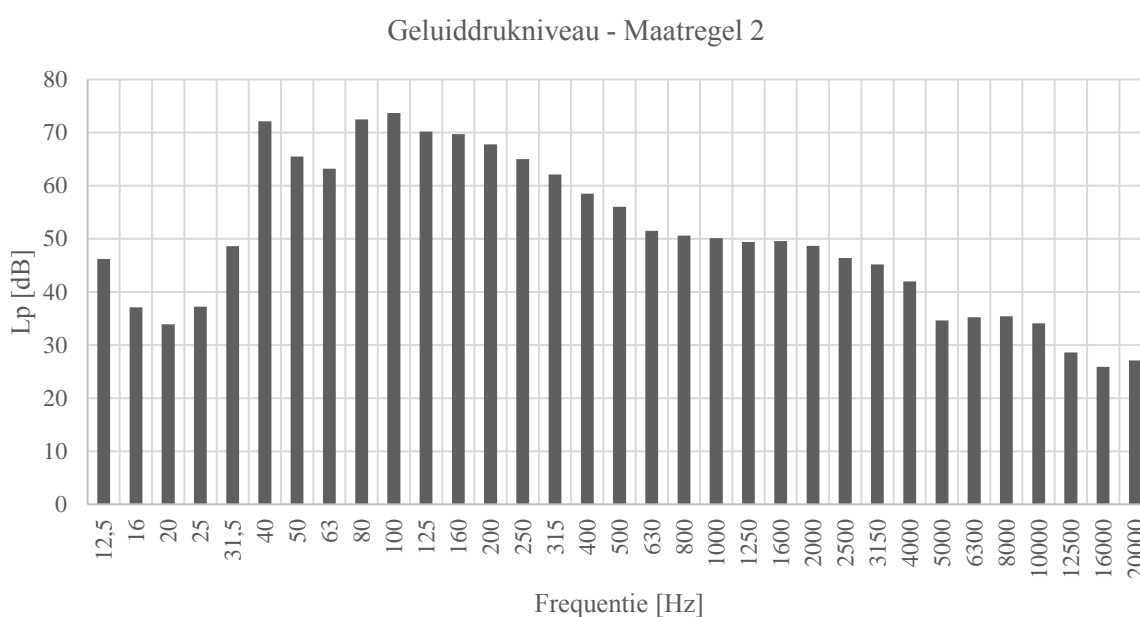
Dezelfde geluidsmeting wordt uitgevoerd met de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* om wederom de praktische bruikbaarheid van deze applicatie te testen.

Audio Spectrum Analyzer HD Pro: 67 dB(A)

Wanneer we de geluidsmeting van de mobiele applicatie vergelijken met de meting van het professioneel toestel dan kunnen we besluiten dat (net zoals in de normale situatie) de mobiele applicatie niet erg veel afwijkt van de *Hand-held Analyzer 2250*.

4.2.3.4 Maatregel 2

De resultaten van de geluidsmeting met de *Hand-held Analyzer 2250* nadat de tweede maatregel is toegevoegd aan de eerste maatregel, worden getoond in de onderstaande figuur.



Figuur 56: Geluidsmeting binnen - Maatregel 2

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
LZeq [dB]	46,2	37,1	33,9	37,2	48,6	72,1	65,5	63,2	72,5	73,7	70,2

Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
LZeq [dB]	69,7	67,8	65	62,1	58,5	56	51,5	50,6	50,1	49,4	49,6

Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
LZeq [dB]	48,7	46,4	45,2	42	34,6	35,2	35,4	34,1	28,6	25,9	27,1

Tabel 15: Geluidsmeting – Maatregel 2

A-wegingscurve: 65,4 dB(A)

C-wegingscurve: 79,2 dB(C)

Vergelijken we het geluidsdrukniveau nadat de tweede maatregel is toegepast met het geluidsdrukniveau in de voorgaande situatie, dan blijkt dat het geluidsdrukniveau wederom licht is verminderd.

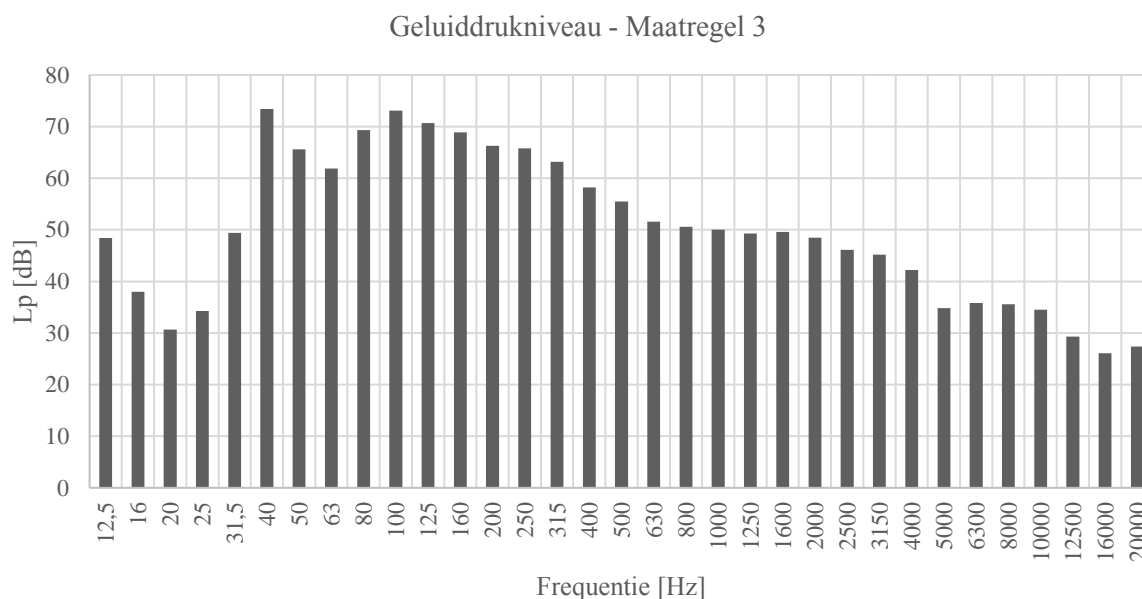
Dezelfde geluidsmeting wordt uitgevoerd met de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* om andermaal de nauwkeurigheid van deze meetmethode te testen.

Audio Spectrum Analyzer HD Pro: 66 dB(A)

Opnieuw blijkt het dat de geluidsmeting met de mobiele applicatie niet erg afwijkt in vergelijking met het resultaat van de *Hand-held Analyzer 2250*.

4.2.3.5 Maatregel 3

De resultaten van de geluidsmeting met de *Hand-held Analyzer 2250* nadat de laatste maatregel werd toegepast, worden getoond in de onderstaande figuur.



Figuur 57: Geluidsmeting binnen - Maatregel 3

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
LZeq [dB]	48,4	38	30,7	34,3	49,4	73,4	65,6	61,9	69,3	73,1	70,7

Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
LZeq [dB]	68,9	66,3	65,8	63,2	58,2	55,5	51,6	50,6	50	49,3	49,6

Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
LZeq [dB]	48,5	46,1	45,2	42,2	34,8	35,8	35,6	34,5	29,3	26,1	27,4

Tabel 16: Geluidsmeting binnen – Maatregel 3

A-wegingscurve: 65,2 dB(A)

C-wegingscurve: 78,7 dB(C)

Vergelijken we het geluidsdrukkniveau nadat de laatste maatregel is toegepast met het geluidsdrukkniveau in de voorgaande situatie, dan blijkt dat het geluidsdrukkniveau terug licht is gedaald.

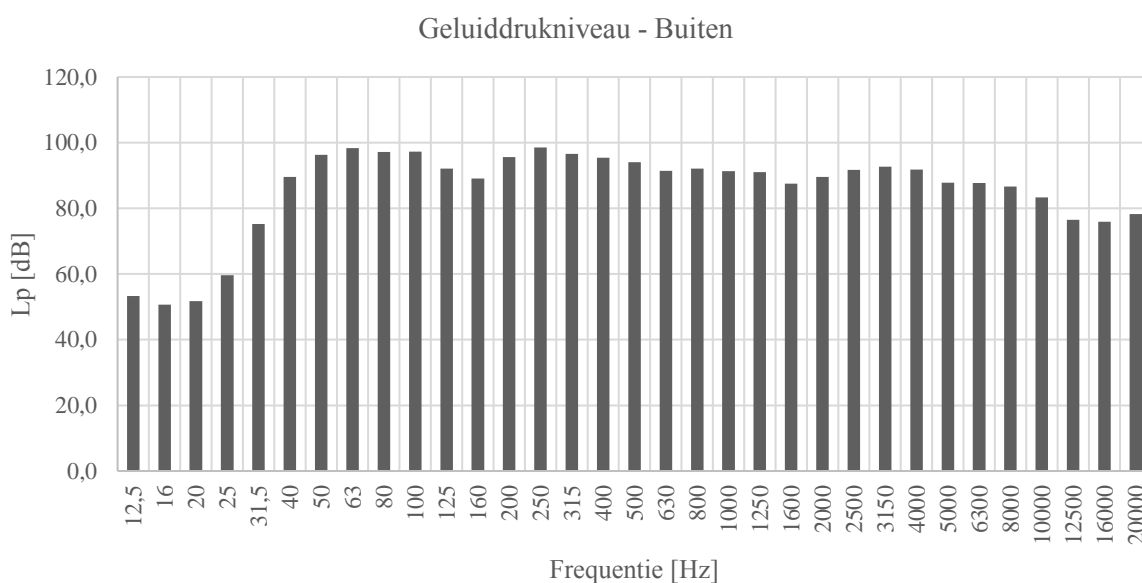
Opnieuw wordt dezelfde geluidsmeting uitgevoerd met de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* om de nauwkeurigheid van deze meetwijze te testen.

Audio Spectrum Analyzer HD Pro: 64 dB(A)

Wanneer we de geluidsmeting van de mobiele applicatie vergelijken met de meting van de *Hand-held Analyzer 2250*, dan kunnen we hieruit besluiten dat het resultaat opnieuw redelijk gelijkaardig is.

4.2.3.6 Buiten

De laatste geluidsmeting die wordt uitgevoerd, betreft het geluiddrukkniveau juist vóór de façade van de meetruimte. Deze meting is noodzakelijk wanneer we het verschil in geluiddrukkniveau dat optreedt in de verschillende situaties willen bepalen. De onderstaande figuur toont de resultaten van de meting met de *Hand-held Analyzer 2250*.



Figuur 58: Geluidsmeting buiten

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
LZeq [dB]	53,3	50,7	51,7	59,7	75,3	89,5	96,3	98,3	97,2	97,3	92,1
Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
LZeq [dB]	89,0	95,6	98,5	96,6	95,4	94,0	91,4	92,1	91,3	91,1	87,5
Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
LZeq [dB]	89,6	91,7	92,7	91,8	87,8	87,7	86,7	83,3	76,5	75,9	78,3

Tabel 17: Geluidsmeting buiten

A-wegingscurve: 103 dB(A)

C-wegingscurve: 107,5 dB(C)

Opnieuw wordt dezelfde geluidsmeting uitgevoerd met de mobiele applicatie *Audio Spectrum Analyzer HD Pro* om de nauwkeurigheid van deze methode te testen.

Mobiele applicatie: 85 dB(A)

Net zoals bij de eerste meting wijkt het resultaat van de mobiele applicatie redelijk veel af van het resultaat van de meting met het professioneel toestel. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat de meting met de mobiele applicatie op het gelijkvloers is uitgevoerd; in tegenstelling tot de meting met de *Hand-held Analyzer 2250* die bevestigd wordt op een verlengstok om het geluiddrukkniveau buiten op het niveau van het raam te bepalen.

4.2.3.7 Overzicht geluidsmetingen Hand-held Analyzer 2250

Frequentie [Hz]	Stilte [dB]	Normaal [dB]	Maatregel 1 [dB]	Maatregel 2 [dB]	Maatregel 3 [dB]	Buiten [dB]
12,5	45,0	46,6	53,6	46,2	48,4	53,3
16	34,7	38,6	47,6	37,1	38,0	50,7
20	29,6	35,1	46,4	33,9	30,7	51,7
25	28,9	36,4	48,0	37,2	34,3	59,7
31,5	28,2	48,3	53,0	48,6	49,4	75,3
40	32,8	70,9	74,7	72,1	73,4	89,5
50	22,8	65,3	67,3	65,5	65,6	96,3
63	15,4	62,0	65,1	63,2	61,9	98,3
80	24,6	72,6	73,9	72,5	69,3	97,2
100	30,5	73,8	73,9	73,7	73,1	97,3
125	13,7	70,8	71,4	70,2	70,7	92,1
160	14,5	70,0	71,5	69,7	68,9	89,0
200	19,4	68,7	69,4	67,8	66,3	95,6
250	15,0	65,7	66,6	65,0	65,8	98,5
315	18,6	64,8	62,3	62,1	63,2	96,6
400	16,1	62,4	58,5	58,5	58,2	95,4
500	14,9	60,7	56,2	56,0	55,5	94,0
630	12,4	55,5	52,1	51,5	51,6	91,4
800	9,9	53,9	51,5	50,6	50,6	92,1
1000	9,6	51,9	50,8	50,1	50,0	91,3
1250	11,8	50,6	50,2	49,4	49,3	91,1
1600	10,2	50,6	50,3	49,6	49,6	87,5
2000	11,5	51,4	49,0	48,7	48,5	89,6
2500	12,8	50,3	46,8	46,4	46,1	91,7
3150	8,7	49,7	46,3	45,2	45,2	92,7
4000	7,1	45,0	43,4	42,0	42,2	91,8
5000	7,3	37,5	37,4	34,6	34,8	87,8
6300	7,5	38,4	37,3	35,2	35,8	87,7
8000	7,6	37,7	36,3	35,4	35,6	86,7
10000	7,6	35,9	34,3	34,1	34,5	83,3
12500	7,4	29,9	28,6	28,6	29,3	76,5
16000	7,2	26,9	25,3	25,9	26,1	75,9
20000	7,5	28,2	26,3	27,1	27,4	78,3

A	23,4	67,3	66,4	65,4	65,2	103,0
C	38,7	79,5	80,7	79,2	78,7	107,5

Tabel 18: Geluidsmetingen – overzicht

Hoewel de mobiele applicatie (redelijk) nauwkeurige metingen kan verrichten wanneer het geluidsdrukkniveau zich rond 65 dB(A) bevindt, kan worden besloten dat deze applicatie niet verder bruikbaar is voor het experimenteel onderzoek gezien de grove afwijkingen bij de meting van de stilte en de meting van het geluidsdrukkniveau buiten.

4.3 EXPERIMENTELE AKOESTISCHE SCHATTINGSMETHODE

In het voorgaande hoofdstuk hebben we ondervonden dat het aanbrengen van maatregelen ter verbetering van de luchtdichtheid op een façade niet enkel een zichtbaar effect heeft op de luchtdichtheidsprestatie, maar dat evenzeer de akoestische prestatie van diezelfde façade (licht) wordt verbeterd. Dit impliceert dat het dichten van een luchtlek tegelijk resulteert in het sluiten van een geluidsslek. De experimentele akoestische schattingsmethode gebruikt deze relatie om een procedure te ontwikkelen die de luchtdichtheid – gebruikmakend van het ventilatievoud – van een façade kan bepalen door het uitvoeren van geluidsmetingen. De werkwijze die zal worden gehanteerd om deze relatie mathematisch tot stand te brengen, is analoog aan het onderzoek uitgevoerd in [2].

4.3.1 Gelijktijdige variatie

Uit de metingen is gebleken dat wanneer het ventilatievoud ten gevolge van de luchtdichtheidsmaatregelen aan de façade verbetert, het geluidsdrukkniveau in de ruimte zakt, hetgeen inhoudt dat de geluidverzwakkingsindex van de wand gestegen is. Het opstellen van de gelijktijdige variatie van het ventilatievoud en de akoestische prestatie van de wand kan echter gebeuren zonder de geluidverzwakkingsindex te bepalen. Inderdaad, het volstaat om het verschil in geluidsdrukkniveau te kennen tussen de meting buiten en de metingen in de ruimte. De reden dat dit mogelijk is, wordt duidelijk wanneer we (14) beschouwen:

$$R = L_{pz} - L_{po} + 10 \log \frac{S}{A} \text{ [dB]} \quad (14)$$

Waarbij: L_{pz} = geluidsdrukkniveau in de zendkamer [dB]
 L_{po} = geluidsdrukkniveau in de ontvangstkamer [dB]
 S = oppervlakte van de wand [m^2]
 A = totale absorptieoppervlakte van de ontvangstkamer [m^2]

Vermits elke meting steeds gebeurt in dezelfde ruimte zal de nagalmtijd – en dus de absorptieoppervlakte – van de ruimte quasi onveranderd blijven [2]. Bijgevolg zijn de enige termen die een bijdrage zullen leveren aan de gelijktijdige variatie het geluidsdrukkniveau in de zendkamer (buiten) en het geluidsdrukkniveau in de ontvangstkamer (binnen), hetgeen in één term kan worden samengevat als het verschil in geluidsdrukkniveau ΔL_p . Het bepalen van ΔL_p met betrekking tot de verschillende situaties wordt gedaan met de gewogen waarde van de A-wegingscurve (automatisch bepaald door de *Hand-held Analyzer 2250*); het is courant om de A-wegingscurve te gebruiken bij akoestische analyses omdat goedkopere sonometers enkel deze meeteenheid gebruiken. Dit levert de volgende resultaten voor de verschillende situaties:

$$\Delta L_{p,1} = L_{p,buiten} - L_{p,normaal} = 103 - 67,3 = 35,7 \text{ dB(A)}$$

$$\Delta L_{p,2} = L_{p,buiten} - L_{p,maatregel\ 1} = 103 - 66,4 = 36,6\ dB(A)$$

$$\Delta L_{p,3} = L_{p,buiten} - L_{p,maatregel\ 2} = 103 - 65,4 = 37,6\ dB(A)$$

$$\Delta L_{p,4} = L_{p,buiten} - L_{p,maatregel\ 3} = 103 - 65,2 = 37,8\ dB(A)$$

Deze waarden houden echter nog geen rekening met het geluiddrukkniveau van de stilte in de ontvangstkamer, hetgeen een vervormd – maar niet noodzakelijk fout – beeld geeft. De werkelijke verschillen in geluiddrukkniveau tussen de zendkamer en de ontvangstkamer worden bijgevolg bepaald door het geluiddrukkniveau van de stilte wél in rekening te brengen, hetgeen de uiteindelijke resultaten levert:

$$\Delta L_{p,1} = L_{p,buiten} - L_{p,normaal} - L_{p,stilte} = 103 - 67,3 - 23,4 = 12,3\ dB(A)$$

$$\Delta L_{p,2} = L_{p,buiten} - L_{p,maatregel\ 1} - L_{p,stilte} = 103 - 66,4 - 23,4 = 13,2\ dB(A)$$

$$\Delta L_{p,3} = L_{p,buiten} - L_{p,maatregel\ 2} - L_{p,stilte} = 103 - 65,4 - 23,4 = 14,2\ dB(A)$$

$$\Delta L_{p,4} = L_{p,buiten} - L_{p,maatregel\ 3} - L_{p,stilte} = 103 - 65,2 - 23,4 = 14,4\ dB(A)$$

Daarnaast is het nodig om de waarden van het ventilatievoud voor elke situatie te kennen om de gelijktijdige variatie te kunnen schetsen. Deze waarden werden echter reeds bepaald bij het uitvoeren van de luchtdichtheidsmetingen (door gebruik te maken van het gemiddeld debiet). Voor de volledigheid worden deze resultaten nog eens verduidelijkt:

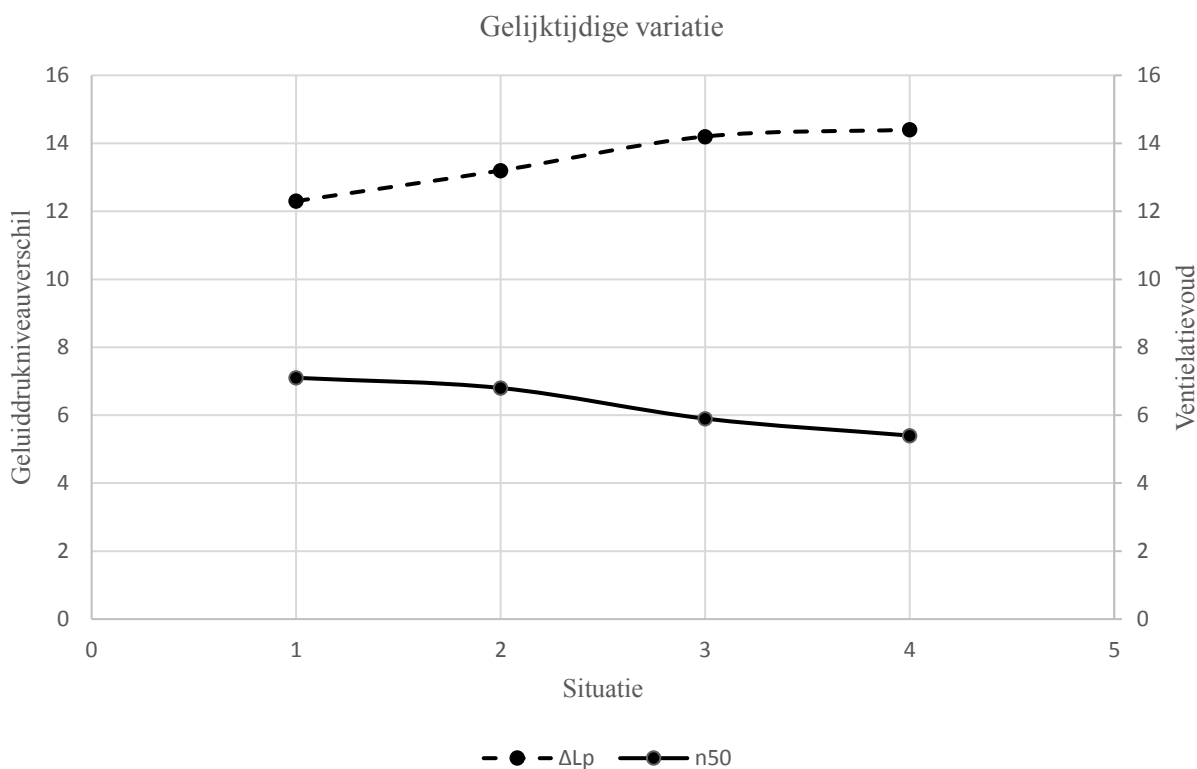
$$n_{50,1} = 7,14\ h^{-1}$$

$$n_{50,2} = 6,79\ h^{-1}$$

$$n_{50,3} = 5,85\ h^{-1}$$

$$n_{50,4} = 5,35\ h^{-1}$$

Tot slot kunnen we de gelijktijdige variatie in beeld brengen door de waarden van het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa en het verschil in geluiddrukkniveau voor elke situatie uit te zetten. Hierdoor wordt duidelijk wat reeds werd opmerkt bij de metingen, namelijk dat wanneer de luchtdichtheid van de façade verbetert – en dus het ventilatievoud daalt –, er gelijktijdig een verhoging van het verschil in geluiddrukkniveau tussen de zendkamer en de ontvangstkamer optreedt. Dit betekent dat de akoestische prestatie van de wand vooruitgaat. Figuur 60 maakt dit duidelijk.



Figuur 59: Gelijktijdige variatie

4.3.2 Fysische correlatie

Het in beeld brengen van de gelijktijdige variatie toont duidelijk dat een daling van het ventilatievoud gepaard gaat met een stijging van het verschil in geluidrukniveau, hetgeen impliceert dat er wel degelijk een correlatie bestaat tussen de akoestische prestatie de luchtdichtheid van een wand. Echter, deze gelijktijdige variatie is weinig bruikbaar wanneer we trachten de luchtdichtheid van een façade te schatten. We zijn bijgevolg niet enkel geïnteresseerd in de grafische weergave van de gelijktijdige variatie, maar evenzeer in de correlatierekening van de variaties van het ventilatievoud en het verschil in geluidrukniveau. In het bijzonder zijn we nieuwsgierig naar het kwadraat van de correlatiecoëfficiënt (R^2) – ook wel de determinatiecoëfficiënt genoemd – die aangeeft in welke mate de variatie van de ene variabele gepaard gaat met een variatie in de andere variabele en welke relatie er bestaat tussen deze twee variabelen. Om de experimentele schattingsmethode te kunnen opstellen, moet er dan ook op een andere wijze naar de resultaten van de luchtdichtheidsmetingen en de geluidsmetingen gekeken worden. Tabel 19 vat de gegevens van de reeds uitgevoerde metingen nogmaals samen.

Situatie	ΔL_p [dB(A)]	Gemiddeld debiet bij 50 Pa [m ³ /h]	n50 [1/h]
Normaal	12,3	270,7	7,14
Maatregel 1	13,2	257,2	6,79
Maatregel 2	14,2	221,6	5,85
Maatregel 3	14,4	202,9	5,35

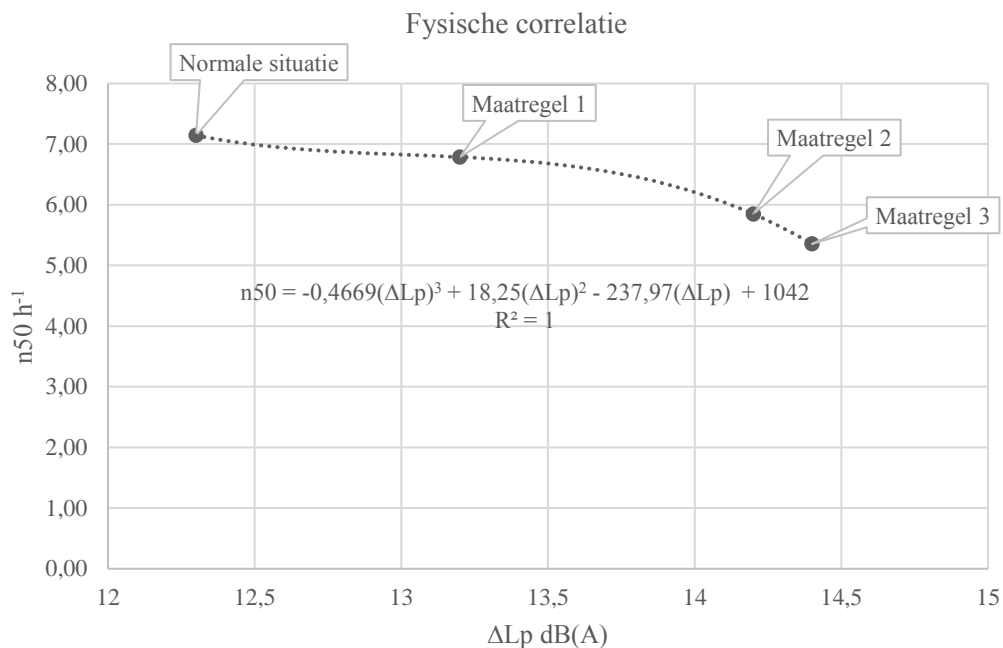
Tabel 19: Samenvatting metingen

Beschouwen we vervolgens het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa (n_{50}) voor elke situatie in functie van het verschil in geluidrukniveau (ΔL_p), dan blijkt dat er een mathematische relatie bestaat

tussen beide grootheden. Deze mathematische expressie wordt bekomen door een niet-lineaire regressieanalyse uit te voeren, hetgeen de volgende vergelijking oplevert:

$$n_{50} = -0,4669(\Delta L_p)^3 + 18,25(\Delta L_p)^2 - 237,97(\Delta L_p) + 1042 \quad (22)$$

In tegenstelling tot [2] wordt in dit onderzoek geen tweedegraadsvergelijking gehanteerd om de relatie tussen de twee grootheden te beschrijven, maar een derdegraadsvergelijking, daar dit beter aansluit op de resultaten in dit geval. De onderstaande figuur geeft de fysische correlatie van het ventilatievoud en het verschil in geluiddruk niveau weer.



Figuur 60: Fysische correlatie

Tenslotte kan de bovenstaande vergelijking gebruikt worden om het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa voor elke situatie te schatten. Dit levert beurtelings de volgende resultaten:

- 1) $n_{50, normaal} = -0,4669(12,3)^3 + 18,25(12,3)^2 - 237,97(12,3) + 1042 = 7,17 h^{-1}$
- 2) $n_{50, maatregel 1} = -0,4669(13,2)^3 + 18,25(13,2)^2 - 237,97(13,2) + 1042 = 6,82 h^{-1}$
- 3) $n_{50, maatregel 2} = -0,4669(14,2)^3 + 18,25(14,2)^2 - 237,97(14,2) + 1042 = 5,88 h^{-1}$
- 4) $n_{50, maatregel 3} = -0,4669(14,4)^3 + 18,25(14,4)^2 - 237,97(14,4) + 1042 = 5,40 h^{-1}$

4.3.3 Experimentele schattingsmethode versus metingen

Om de nauwkeurigheid van de bekomen vergelijking te toetsen, zullen de 'geschatte' waarden van het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa vergeleken worden met de gemeten waarden van het ventilatievoud bij eenzelfde drukverschil. De afwijking van de waarden, bekomen met de bovenstaande vergelijkingen, ten opzichte van de gemeten waarden zal hierbij telkens dienen als maatstaf. De onderstaande tabel toont de resultaten van deze toetsing.

Situatie	Gemeten ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Geschatte ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Afwijking [%]
Normaal	7,14	7,17	0,42
Maatregel 1	6,79	6,82	0,44
Maatregel 2	5,85	5,88	0,51
Maatregel 3	5,35	5,40	0,93

Tabel 20: Samenvatting metingen

Tot slot kan gesteld worden dat de experimentele akoestische schattingsmethode een mathematische expressie aanreikt die kan gebruikt worden om de luchtdichtheid van de façade van de meetruimte te schatten op basis van het verschil in geluidrukniveau tussen de zendkamer (buiten) en de ontvangstkamer (binnen), hetgeen kan worden bepaald aan de hand van geluidsmetingen. Deze schattingsmethode zou ook gebruikt kunnen worden bij gelijkaardige façades van andere gebouwen, zolang het verschil in geluidrukniveau binnen hetzelfde interval ligt als de façade van de meetruimte die werd gebruikt in dit experiment [2].

4.4 THEORETISCHE AKOESTISCHE SCHATTINGSMETHODE

De mathematische expressie (22) die werd gevonden met de voorgaande schattingsmethode is enkel toepasbaar op ‘gelijkaardige façades’. Het is bijgevolg wenselijk om een schattingsmethode te ontwikkelen die kan worden toegepast op elke façade, ongeacht of deze al dan niet gelijkaardig is aan de façade die wordt gebruikt in deze masterproef. Omwille van deze reden wordt de theoretische akoestische schattingsmethode geïntroduceerd op basis van het verschil tussen de schijnbare geluidverzwakkingsindex en de theoretische geluidverzwakkingsindex van een wand. Deze schattingsmethode is gebaseerd op de volgende vergelijking [1]:

$$R'_w = R_w - C_F \quad [dB] \quad (17)$$

Waarbij: R'_w = gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex van de wand [dB]
 R_w = gewogen waarde theoretische geluidverzwakkingsindex van de wand [dB]
 C_F = factor die flankerende transmissie in rekening brengt [dB]

In de veronderstelling dat het verschil tussen de schijnbare geluidverzwakkingsindex en de theoretische geluidverzwakkingsindex, naast flankerende transmissie, te wijten is aan luchtlekken – en dus akoestische lekken – kan de oppervlakte van het luchtlek bepaald worden, daar de theoretische geluidverzwakkingsindex een term bevat die de oppervlakte van het luchtlek in rekening brengt. De oppervlakte van het luchtlek kan daarna worden ingevuld in de volgende stromingsvergelijking om het debiet (en dus het ventilatievoud) te schatten:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (20)$$

Waarbij: \dot{V} = luchtdebiet $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
 S_l = oppervlakte van de opening $[m^2]$
 C_d = weerstandsgetal [-]
 ΔP = drukverschil [Pa]
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

4.4.1 Handleiding

Alvorens de theoretische schattingsmethode zal worden opgesteld gebruikmakend van de bovenstaande uitdrukkingen, overlopen we bondig de stappen die achtereenvolgens genomen worden om tot deze methode te komen.

- Ten eerste bepalen we de schijnbare geluidverzwakkingsindex aan de hand van resultaten van de geluidsmetingen. Hierbij is het evenzeer nodig om de absorptieoppervlakte van de meetruimte te bepalen;
- Voorts bepalen we de theoretische geluidverzwakkingsindex aan de hand van gevorderde akoestische formules uit de literatuur, waarbij een aantal gefundeerde aannames moeten worden gemaakt bij gebrek aan gegevens met betrekking tot de werkelijke façade die in dit experiment wordt gebruikt;
- Daarna wordt de invloed van het raam op de theoretische geluidverzwakkingsindex in rekening gebracht door gebruik te maken van de formule voor de geluidverzwakkingsindex van een samengestelde wand in het vlak;
- Tenslotte kunnen we de lekoppervlakte bepalen, waarmee het debiet kan worden berekend, hetgeen op zijn beurt resulteert in een waarde voor het ventilatievoud.

4.4.2 Schijnbare geluidverzwakkingsindex

De schijnbare geluidverzwakkingsindex kan enkel bepaald worden door metingen te doen in situ; dus zelfs metingen in een gecontroleerde omgeving, zoals een labo, voldoen niet om de schijnbare geluidverzwakkingsindex te meten [1]. De reeds uitgevoerde experimentele geluidsmetingen in situ voldoen bijgevolg om de schijnbare geluidverzwakkingsindex te bepalen, hetgeen wordt gedaan aan de hand van de volgende formule:

$$R' = L_{pz} - L_{po} + 10 \log \frac{S}{A} [dB] \quad (14)$$

Waarbij: L_{pz} = geluiddrukkniveau in de zendkamer [dB]
 L_{po} = geluiddrukkniveau in de ontvangstkamer [dB]
 S = oppervlakte van de wand [m^2]
 A = totale absorptieoppervlakte van de ontvangstkamer [m^2]

In tegenstelling tot de experimentele schattingsmethode zal in het geval van de theoretische schattingsmethode de totale absorptieoppervlakte van de ontvangstkamer wel in rekening moeten worden gebracht. Vermits er in dit geval geen gebruik wordt gemaakt van het verschil in geluiddrukkniveau, maar van de geluidverzwakkingsindex, is dit noodzakelijk.

4.4.2.1 Bepalen van de totale absorptieoppervlakte

Om de totale absorptieoppervlakte van de ontvangstkamer te bepalen is het nodig om de absorptiecoëfficiënt van alle aanwezige materialen in de ruimte in rekening te brengen. Net zoals de meeste akoestische grootheden is de absorptiecoëfficiënt van een materiaal afhankelijk van de frequentie. Het is echter gebruikelijk om de absorptiecoëfficiënt weer te geven in een eengetalsaanduiding, aangezien dit overzichtelijker is om eisen aan te stellen. Er zijn meerdere manieren om de frequentieafhankelijke absorptiecoëfficiënt om te vormen tot een gewogen waarde, namelijk de Amerikaanse NRC (*Noise Reduction Coefficient*) en de Europese equivalente absorptiecoëfficiënt α_w , waarbij de letter w staat voor gewogen (*weighted*) [73]. In deze masterproef zal er, naast de Amerikaanse NRC en de Europese equivalente absorptiecoëfficiënt, evenzeer gebruik worden gemaakt van een

experimentele methode om via de nagalmtijd van de meetruimte de totale absorptieoppervlakte te bepalen.

Vooraleer de eengetalsaanduiding van de absorptiecoëfficiënt op theoretische wijze kan bepaald worden, is het uiteraard noodzakelijk om de absorptiecoëfficiënten van de aanwezige materialen in de meetruimte te kennen. De onderstaande tabel toont de absorptiecoëfficiënten van de aanwezige materialen, zoals deze werden gevonden in de literatuur.

Materiaal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Houten deur	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10
Houten afwerking	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05
Gipspleister	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
Glas	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02
Linoleum	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
Natuursteen	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Persoon	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45
Polyvinylchloride	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06
Behangpapier	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08

Tabel 21: Absorptiecoëfficiënt per materiaal [88] [89] [90]

Het is overigens niet eenvoudig om in de literatuur eenduidige waarden te vinden voor de absorptiecoëfficiënt van een materiaal. Er blijkt namelijk heel wat onenigheid te zijn over de werkelijke absorptiecoëfficiënt van zowat elk materiaal dat men kan bedenken.

NRC. Het bepalen van de eengetalsaanduiding van de absorptiecoëfficiënt op de Amerikaanse wijze wordt gedaan door het gemiddelde te nemen van de waarde van de absorptiecoëfficiënt bij frequenties 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz en 2000 Hz aan de hand van de volgende formule [73]:

$$NRC = \frac{\alpha_{250} + \alpha_{500} + \alpha_{1000} + \alpha_{2000}}{4} [-]$$

De onderstaande tabel toont de resultaten van de gewogen waarde van de absorptiecoëfficiënt, bekomen via de Amerikaanse wijze.

Materiaal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	NRC [-]
Houten deur	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,09
Houten afwerking	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03
Gipspleister	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Glas	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02	0,11
Linoleum	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,03
Natuursteen	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Persoon	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45	0,42
Polyvinylchloride	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04
Behangpapier	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,05

Tabel 22: NRC per materiaal

Het volstaat nu om de NRC van elk materiaal te vermenigvuldigen met de oppervlakte van dit materiaal om de absorptieoppervlakte per materiaal te bepalen; hierna wordt de totale absorptieoppervlakte

bepaald door de som te nemen van de absorptieoppervlakte per materiaal. De onderstaande tabel toont het overzicht van deze bewerking.

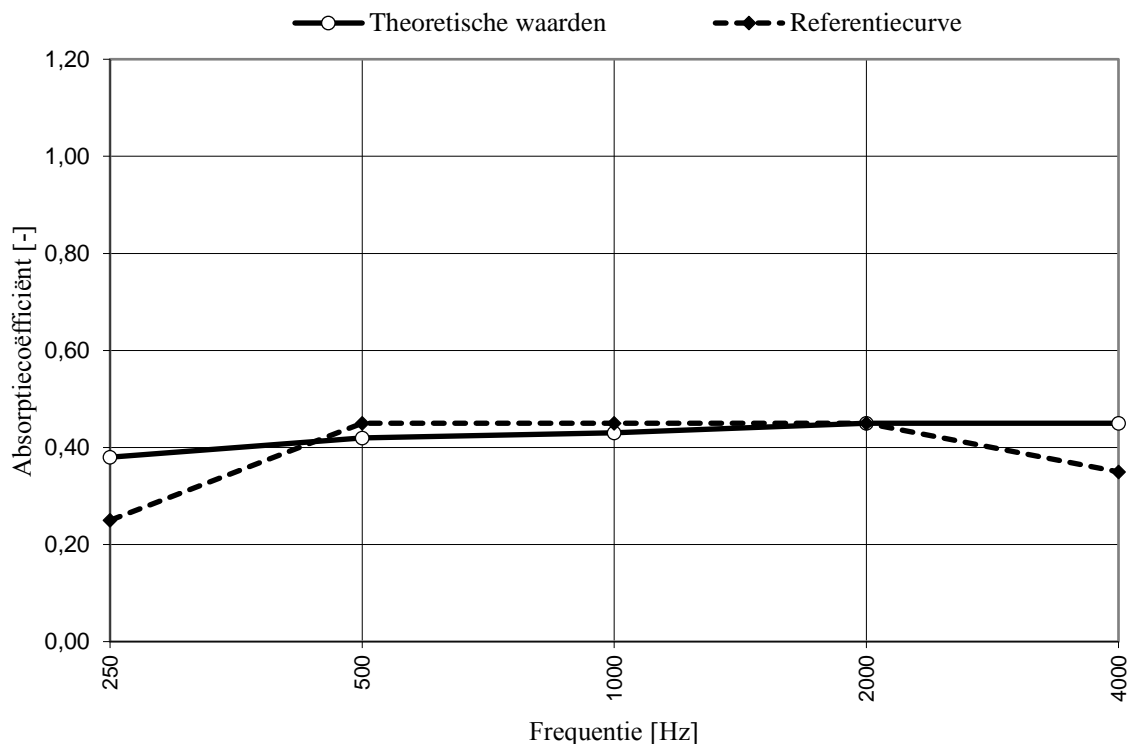
Materiaal	NRC [-]	Oppervlakte [m ²]	Absorptieoppervlakte [m ²]
Houten deur	0,09	1,58	0,13
Houten afwerking	0,03	2,57	0,08
Gipspleister	0,03	15,99	0,40
Glas	0,11	1,28	0,13
Linoleum	0,03	15,99	0,48
Natuursteen	0,02	0,38	0,01
Persoon	0,42	5,70	2,39
Polyvinylchloride	0,04	0,92	0,04
Behangpapier	0,05	33,65	1,60

Tabel 23: Absorptieoppervlakte per materiaal (NRC)

Bij het uitvoeren van de geluidsmetingen waren er telkens drie volwassen mannen aanwezig in de meetruimte. Bijgevolg worden deze personen evenzeer in rekening gebracht bij het bepalen van de totale absorptieoppervlakte door gebruik te maken van de gemiddelde oppervlakte van een mannelijke persoon, hetgeen 1,9 m² bedraagt [91]. Tot slot kan de totale absorptieoppervlakte bepaald worden als zijnde 5,26 m².

Equivalentente absorptiecoëfficiënt. Het bepalen van de absorptiecoëfficiënt volgens de Europese methode is een stuk ingewikkelder dan de voorgaande werkwijze. In Europa wordt de eengetalsaanduiding van de absorptiecoëfficiënt namelijk bepaald via een referentiecurve die op een bepaalde manier over de absorptiecurve moet worden geplaatst. De referentiecurve wordt vervolgens verschoven met stappen van 0,05 tot op het moment dat de som van de ongunstige afwijkingen – dit is een afwijking die een slechter resultaat zou geven dan de referentiecurve – het grootst mogelijk is, doch niet meer dan 0,1 bedraagt. Deze methode is internationaal gestandaardiseerd en staat beschreven in de Europese norm NBN EN ISO 11654 [73]. De onderstaande tabel toont de werkwijze voor het bepalen van de equivalentente absorptiecoëfficiënt van een persoon; vermits er in totaal negen materialen zouden getoond moeten worden (en deze werkwijze steeds hetzelfde is), zal enkel de werkwijze geïllustreerd worden bij het bepalen van de equivalentente absorptiecoëfficiënt van een persoon.

De referentiecurve wordt in dit geval naar onder geschoven met 11 stappen van 0,05, hetgeen resulteert in een verschuiving van -0,55. De som van de ongunstige afwijkingen bedraagt 0,05, wat in dit geval het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 0,1. De onderstaande figuur toont de verschoven referentiecurve ten opzichte van de theoretische waarden van de absorptiecoëfficiënt van een persoon.



Figuur 61: Verschuiving referentiecurve (persoon)

Vervolgens wordt er na de verschuiving gekeken naar de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de tabel kan worden gehaald als zijnde 0,45. De verschuiving is zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom. Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de absorptiecoëfficiënt van een persoon α_w gelijk is aan 0,45.

Gewogen waarde van de absorptiecoëfficiënt (ISO 11654)				
Frequentie [Hz]	Alfa	ISO 11654		Ongunstige
250	0,38	0,80	0,25	0,00
500	0,42	1,00	0,45	0,03
1000	0,43	1,00	0,45	0,02
2000	0,45	1,00	0,45	0,00
4000	0,45	0,90	0,35	0,00

Tabel 24: Bepalen equivalente absorptiecoëfficiënt (persoon)

Deze werkwijze wordt herhaald voor elk aanwezig materiaal, waarvan de resultaten samenvattend worden weergegeven in de onderstaande tabel.

Materiaal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	a_w [-]
Houten deur	0,14	0,10	0,06	0,08	0,10	0,10	0,10
Houten afwerking	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05
Gipspleister	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,05
Glas	0,30	0,20	0,10	0,07	0,05	0,02	0,10
Linoleum	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05
Natuursteen	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05
Persoon	0,15	0,38	0,42	0,43	0,45	0,45	0,45

Polyvinylchloride	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05
Behangpapier	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,08	0,05

Tabel 25: Equivalente absorptiecoëfficiënt per materiaal

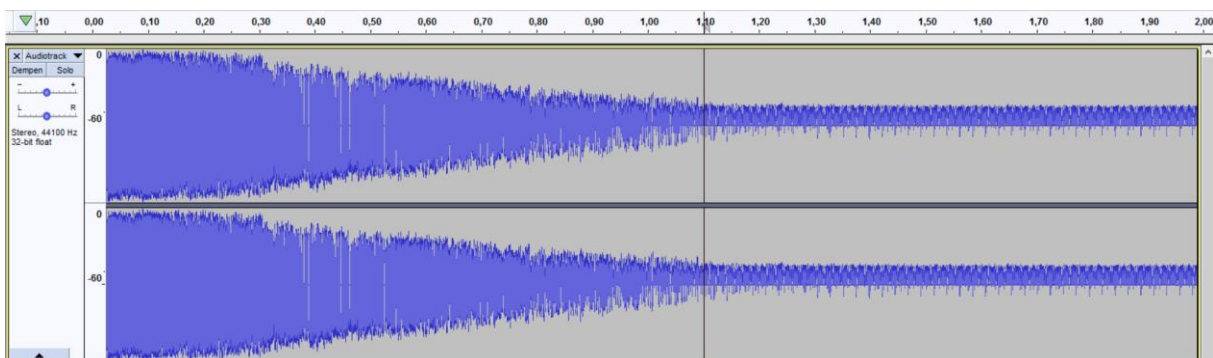
Opnieuw wordt de absorptieoppervlakte per materiaal bekomen door het vermenigvuldigen van de equivalentie absorptiecoëfficiënt met de oppervlakte van het materiaal. Hierna worden deze absorptieoppervlaktes opgeteld om de totale absorptieoppervlakte te bepalen. De onderstaande tabel toont de absorptieoppervlakte per materiaal gebruikmakende van de equivalente absorptiecoëfficiënt.

Materiaal	aw [-]	Oppervlakte [m ²]	Absorptieoppervlakte [m ²]
Houten deur	0,10	1,58	0,16
Houten afwerking	0,05	2,57	0,13
Gipspleister	0,05	15,99	0,80
Glas	0,10	1,28	0,13
Linoleum	0,05	15,99	0,80
Natuursteen	0,05	0,38	0,02
Persoon	0,45	5,70	2,57
Polyvinylchloride	0,05	0,92	0,05
Behangpapier	0,05	33,65	1,68

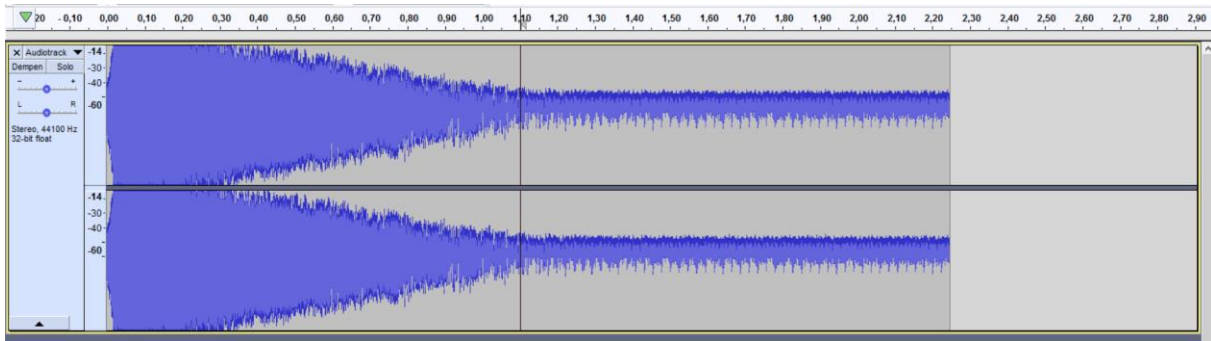
Tabel 26: Absorptie oppervlakte per materiaal (α_w)

Ten slotte kan de totale absorptieoppervlakte bepaald worden door de som te nemen van de afzonderlijke absorptieoppervlaktes, hetgeen volgens de Europese methode 6,34 m² bedraagt.

Experimentele methode. Het bepalen van de absorptieoppervlakte aan de hand van de experimentele methode wordt gedaan door het meten van de nagalmtijd in de ruimte met het programma *Audacity*. Dit programma wordt gebruikt om een geluidsopname te maken van een bepaald geluid (in dit geval is dat het klappen van handen). Daarna wordt het uitsterven van het geluid visueel in beeld gebracht en kan er op basis van deze opname experimenteel bepaald worden wat de nagalmtijd in de ruimte bedraagt. Er wordt gekozen om twee geluidsopnames te maken; het gemiddelde van deze opnames zal dienen als de experimenteel bepaalde nagalmtijd. De onderstaande figuren tonen de resultaten van deze metingen.



Figuur 62: Meting 1 - Nagalmtijd (Audacity)



Figuur 63: Meting 2 - Nagalmtijd (Audacity)

In principe wordt de nagalmtijd in een ruimte bepaald als het tijdsinterval waarin het geluidsniveau met 60 dB afneemt. Het is echter toegelaten om het tijdsinterval te gebruiken waarin het geluidsniveau met 20 dB of 30 dB afneemt en deze tijdsintervallen respectievelijk te vermenigvuldigen met 3 of met 2 om de effectieve nagalmtijd te bepalen. Het is mogelijk dat achtergrondgeluid ervoor kan zorgen dat een daling van 60 dB niet voorkomt [73]. De resultaten van de metingen zijn als volgt: de eerste meting geeft een nagalmtijd van 1,10 seconden en de tweede meting geeft een nagalmtijd van 1,30 seconden (bij deze meting wordt de strategie van een afname van 30 dB toegepast). Aan de hand van deze resultaten kan de absorptieoppervlakte bepaald worden door gebruik te maken van (12):

$$A_1 = \frac{0,161V}{T_1} = 5,55 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_2 = \frac{0,161V}{T_2} = 4,69 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{gemiddelde}} = \frac{A_1 + A_2}{2} = 5,12 \text{ [m}^2\text{]}$$

Tot slot wordt er gekozen, gezien de drie methodes die worden gebruikt om de totale absorptieoppervlakte van de meetruimte te bepalen verschillende resultaten geven, om het gemiddelde te nemen van deze waarden. Dit levert het volgende resultaat voor de totale absorptieoppervlakte:

$$A = \frac{5,26 + 6,34 + 5,12}{3} = 5,57 \text{ [m}^2\text{]}$$

4.4.2.2 Gewogen schijnbare geluidverzwakkingsindex per situatie

Nu de totale absorptieoppervlakte van de ruimte bekend is, kan de schijnbare geluidverzwakkingsindex van elke situatie bepaald worden door de resultaten van de geluidsmetingen in te vullen in (14). Er wordt aangenomen dat de absorptieoppervlakte – en dus de nagalmtijd – in de meetruimte onafhankelijk is van de aangebrachte luchtdichtheidsmaatregelen, hetgeen betekent dat deze term constant blijft bij de verschillende situaties (normale situatie, situatie na maatregel 1, situatie na maatregel 2 en situatie na maatregel 3). De onderstaande tabel toont de frequentieafhankelijke schijnbare geluidverzwakkingsindex per situatie, met inbegrip van de stilte.

Frequentie [Hz]	Normaal [dB]	Maatregel 1 [dB]	Maatregel 2 [dB]	Maatregel 3 [dB]
12,5	-36,0	-43,0	-35,6	-37,8
16	-20,3	-29,3	-18,8	-19,7
20	-10,7	-22,0	-9,5	-6,3
25	-3,3	-14,8	-4,1	-1,2

31,5	1,2	-3,6	0,8	0,0
40	-11,9	-15,6	-13,1	-14,4
50	10,6	8,6	10,3	10,2
63	23,3	20,2	22,1	23,4
80	2,4	1,0	2,4	5,6
100	-4,7	-4,8	-4,6	-4,0
125	10,0	9,4	10,5	10,0
160	6,9	5,4	7,2	8,0
200	9,8	9,1	10,7	12,2
250	20,2	19,3	20,8	20,0
315	15,5	18,0	18,2	17,1
400	19,2	23,1	23,1	23,4
500	20,8	25,3	25,4	25,9
630	25,9	29,3	29,9	29,8
800	30,6	33,0	33,9	33,9
1000	32,1	33,2	33,9	34,0
1250	31,1	31,5	32,2	32,3
1600	29,0	29,3	30,0	30,0
2000	29,0	31,4	31,7	31,9
2500	31,0	34,4	34,8	35,1
3150	36,6	40,0	41,1	41,1
4000	42,0	43,6	45,0	44,8
5000	45,3	45,4	48,2	48,0
6300	44,2	45,2	47,3	46,7
8000	43,7	45,2	46,0	45,8
10000	42,2	43,8	44,0	43,6
12500	41,5	42,9	42,8	42,1
16000	44,1	45,7	45,1	44,9
20000	44,9	46,8	46,0	45,7

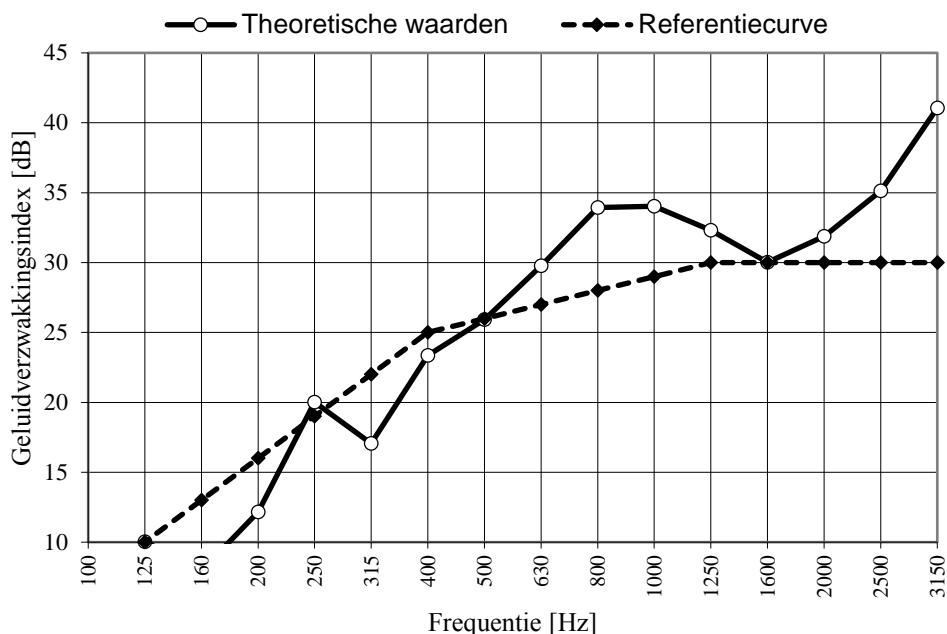
Tabel 27: Schijnbare geluidverzwakkingsindex per situatie

Het is echter gebruikelijk om – net zoals bij de NRC en de equivalente absorptiecoëfficiënt in het voorgaande deel – de geluidverzwakkingsindex van een wand weer te geven in een eengetalsaanduiding, hetgeen makkelijker om mee te rekenen is en om de prestatie van verschillende wanden met elkaar te vergelijken. Het proces om de gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex te bepalen is redelijk gelijkaardig aan de methode die werd gebruikt om de equivalente absorptiecoëfficiënt te berekenen en wordt uitgelegd in NBN EN ISO 717-1. Er wordt wederom gebruik gemaakt van een referentiecurve, maar ditmaal wordt deze over de reductiecurve geplaatst. Deze referentiecurve wordt verschoven met stappen van 1 dB tot dat de som van de ongunstige afwijkingen zo groot mogelijk is, doch niet groter dan 32 dB [92].

Bovendien valt op dat de waarden van de geluidverzwakkingsindex voor elke situatie negatief is bij een frequentie van 100 Hz. Aangezien het geluiddruk niveau altijd vergeleken wordt met een referentieniveau (de gehoorrens bovenop de luchtdruk) kan het zijn dat een negatieve waarde van decibels gemeten wordt. Dit is echter niet het geval voor de geluidverzwakkingsindex, waar een

negatieve waarde duidt op het extra doorlaten van geluid. Omwille van deze reden wordt er gekozen om deze negatieve waarden te vervangen de term $10 \log \frac{S}{A}$.

Normale situatie. De referentiecurve wordt in dit geval naar onder geschoven met 27 stappen van 1dB, hetgeen resulteert in een verschuiving van -27dB. De som van de ongunstige afwijkingen bedraagt 28,6 dB, wat in dit geval het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 32 dB. De onderstaande figuur toont deze werkwijze bij de normale situatie.



Figuur 64: Verschuiving referentiecurve (normale situatie)

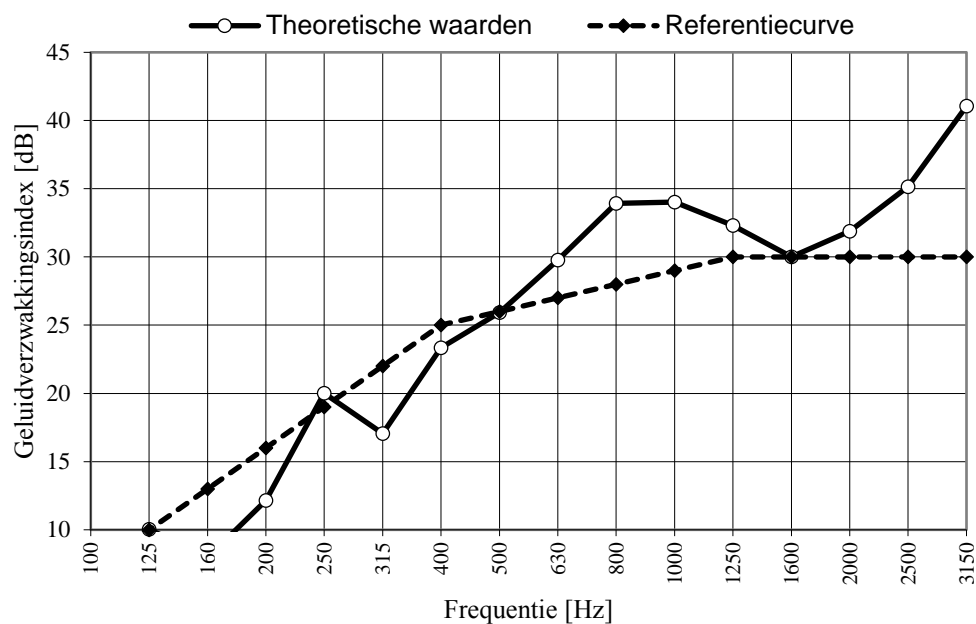
Vervolgens wordt er na de verschuiving gekeken naar de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de tabel kan worden gehaald als zijnde 25 dB. Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in de normale situatie gelijk is aan 25 dB. De verschuiving is zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom.

Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (ISO 717-1)				
Frequentie [Hz]	R [dB]	ISO 717-1		Ongunstige afwijkingen
100	2,3	33	6	3,7
125	10,0	36	9	0,0
160	6,9	39	12	5,1
200	9,8	42	15	5,2
250	20,2	45	18	0,0
315	15,5	48	21	5,5
400	19,2	51	24	4,8
500	20,8	52	25	4,2
630	25,9	53	26	0,1
800	30,6	54	27	0,0
1000	32,1	55	28	0,0

1250	31,1	56	29	0,0
1600	29,0	56	29	0,0
2000	29,0	56	29	0,0
2500	31,0	56	29	0,0
3150	36,6	56	29	0,0

Tabel 28: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (normale situatie)

Maatregel 1. De referentiecurve wordt in dit geval naar onder geschoven met 26 stappen van 1dB, hetgeen resulteert in een verschuiving van -26dB. De som van ongunstige afwijkingen bedraagt 27,1 dB, wat in dit geval het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 32 dB. De onderstaande figuur toont de verschoven referentiecurve ten opzichte van de experimentele waarden van de geluidverzwakkingsindex in de situatie na de eerste maatregel.



Figuur 65: Verschuiving referentiecurve (maatregel 1)

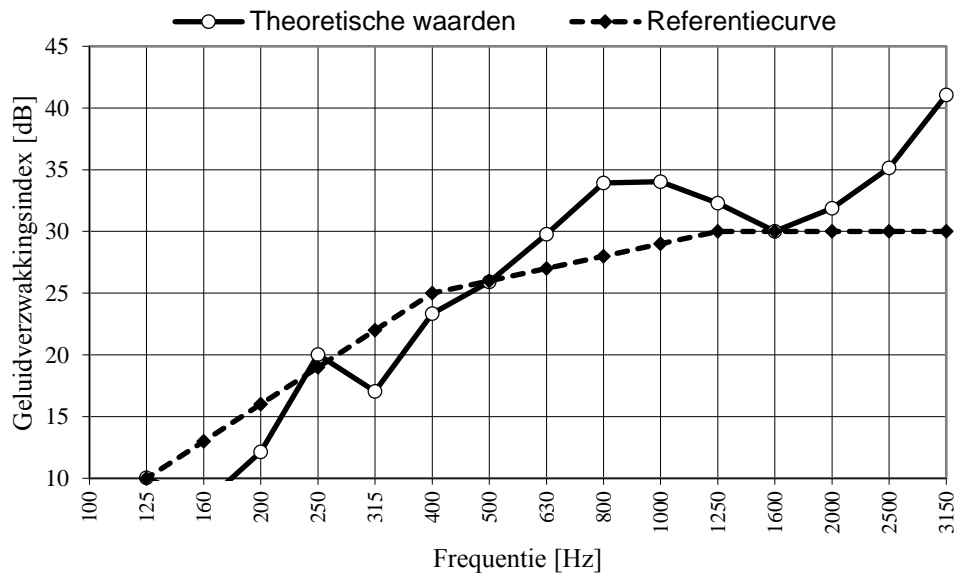
Wederom wordt er na de verschuiving gekeken naar de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de tabel kan worden gehaald als zijnde 26 dB. Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in de situatie nadat de eerste maatregel is toegepast gelijk is aan 26 dB. De verschuiving is zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom.

Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (ISO 717-1)				
Frequentie [Hz]	R [dB]	ISO 717-1		Ongunstige afwijkingen
100	2,3	33	7	4,7
125	9,4	36	10	0,6
160	5,4	39	13	7,6
200	9,1	42	16	6,9
250	19,3	45	19	0,0
315	18,0	48	22	4,0

400	23,1	51	25	1,9
500	25,3	52	26	0,7
630	29,3	53	27	0,0
800	33,0	54	28	0,0
1000	33,2	55	29	0,0
1250	31,5	56	30	0,0
1600	29,3	56	30	0,7
2000	31,4	56	30	0,0
2500	34,4	56	30	0,0
3150	40,0	56	30	0,0

Tabel 29: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (maatregel 1)

Maatregel 2. De referentiecurve wordt in dit geval naar onder geschoven met 25 stappen van 1dB, hetgeen resulteert in een verschuiving van -25dB. De som van ongunstige afwijkingen bedraagt 29,6 dB, wat in dit geval het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 32 dB. De onderstaande figuur toont de verschoven referentiecurve ten opzichte van de experimentele waarden van de geluidverzwakkingsindex in de situatie na de tweede maatregel.



Figuur 66: Verschuiving referentiecurve (maatregel 2)

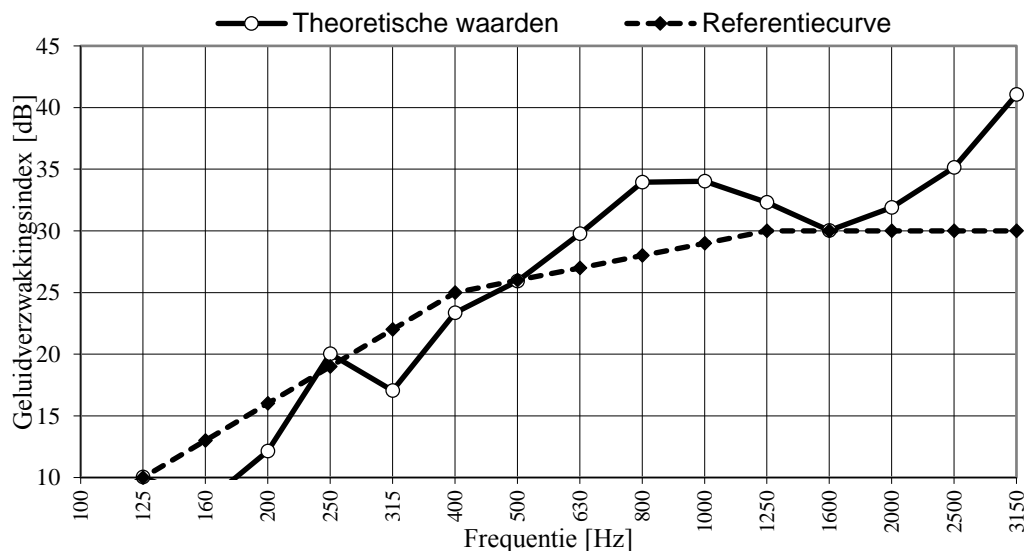
Daarna wordt er na de verschuiving gekeken naar de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de onderstaande tabel kan worden gehaald als zijnde 27 dB. Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in de situatie nadat de tweede maatregel is aan gebracht gelijk is aan 27 dB. De verschuiving is zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom.

Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (ISO 717-1)				
Frequentie [Hz]	R [dB]	ISO 717-1		Ongunstige afwijkingen
100	2,3	33	8	5,7
125	10,5	36	11	0,5

160	7,2	39	14	6,8
200	10,7	42	17	6,3
250	20,8	45	20	0,0
315	18,2	48	23	4,8
400	23,1	51	26	2,9
500	25,4	52	27	1,6
630	29,9	53	28	0,0
800	33,9	54	29	0,0
1000	33,9	55	30	0,0
1250	32,2	56	31	0,0
1600	30,0	56	31	1,0
2000	31,7	56	31	0,0
2500	34,8	56	31	0,0
3150	41,1	56	31	0,0

Tabel 30: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (maatregel 2)

Maatregel 3. De referentiecurve wordt in dit geval naar onder geschoven met 25 stappen van 1dB, hetgeen resulteert in een verschuiving van -25dB. De som van ongunstige afwijkingen bedraagt 28,1 dB, wat in dit geval het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 32 dB. De onderstaande figuur toont de verschoven referentiecurve ten opzichte van de experimentele waarden van de geluidverzwakkingsindex in de situatie na de derde maatregel.



Figuur 67: Verschuiving referentiecurve (maatregel 3)

Tot slot wordt na de verschuiving de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de tabel kan worden gehaald als zijnde 27 dB. Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in de situatie nadat de derde maatregel is aan gebracht gelijk is aan 27 dB. De verschuiving is zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom.

Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (ISO 717-1)				
Frequentie [Hz]	R [dB]	ISO 717-1		Ongunstige afwijkingen
100	2,3	33	8	5,7
125	10,0	36	11	1,0
160	8,0	39	14	6,0
200	12,2	42	17	4,8
250	20,0	45	20	0,0
315	17,1	48	23	5,9
400	23,4	51	26	2,6
500	25,9	52	27	1,1
630	29,8	53	28	0,0
800	33,9	54	29	0,0
1000	34,0	55	30	0,0
1250	32,3	56	31	0,0
1600	30,0	56	31	1,0
2000	31,9	56	31	0,0
2500	35,1	56	31	0,0
3150	41,1	56	31	0,0

Tabel 31: Bepalen gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex (maatregel 3)

Het blijkt dat de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in de situatie na de tweede maatregel en de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in de situatie na de derde maatregel gelijk zijn aan elkaar. Dit is te wijten aan het feit dat er veel informatie verloren gaat wanneer een frequentieafhankelijke grootte omgezet wordt naar een eengetalsaanduiding [74].

4.4.2.3 Overzicht

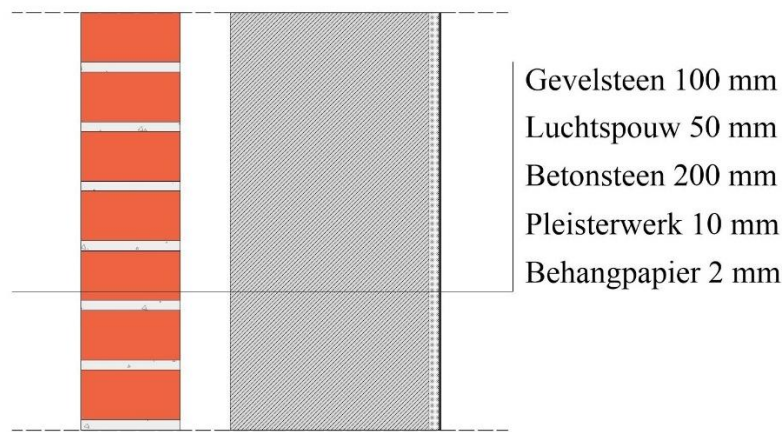
De onderstaande tabel geeft een overzicht van de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex voor elke situatie.

Situatie	Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (ISO 717-1) [dB]
Normaal	25
Maatregel 1	26
Maatregel 2	27
Maatregel 3	27

Tabel 32: Gewogen waarde schijnbare geluidverzwakkingsindex per situatie

4.4.3 Theoretische geluidverzwakkingsindex (dubbele wand)

Het bepalen van de theoretische geluidverzwakkingsindex van een wand is enigszins moeilijker dan het voorgaande proces. Er kan immers geen gebruik worden gemaakt van de relatief eenvoudige expressie (14) om de geluidverzwakkingsindex te berekenen (tenzij deze wordt gemeten in een labo, maar dat is niet het geval in deze masterproef). In plaats daarvan zullen we gebruik maken van experimentele akoestische formules om de geluidverzwakkingsindex van een dubbele wand te bepalen. De onderstaande figuur toont de opbouw van de wand in kwestie.



Figuur 68: Doorsnede wand

De akoestische formules die worden gebruikt om de theoretische geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand te bepalen, zijn gebaseerd op het vroegere onderzoek van Sharp. In dit onderzoek wordt gesteld dat de frequentieafhankelijke capaciteit van een dubbele wand om geluid te reduceren kan verdeeld worden in drie gebieden: 1) een gebied waar de dubbele wand als een enkelvoudige wand wordt beschouwd; 2) een gebied bepaald door het massa-veer-massa principe en 3) een gebied waar de massawet van een dubbele wand van toepassing is. De grenzen van deze gebieden worden berekend aan de hand van de resonantiefrequentie en de coïncidentiedip. De onderstaande experimenteel bepaalde formules zullen worden gebruikt om de theoretische geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand te bepalen. Het is belangrijk om op te merken dat deze formules niet exact zijn, mede doordat er tot op heden niet zoveel theoretisch onderzoek is gedaan naar het gedrag van dubbele wanden met betrekking tot het reduceren van geluid. Tegenwoordig maakt men dan ook gebruik van de Eindige Elementen Methode om deze complexe materie in kaart te brengen, maar een dergelijke werkwijze valt buiten het kader van deze masterproef [92]:

$$R = \begin{cases} R_M \text{ indien } f < f_0 \\ R_1 + R_2 + 20 \log(fd) - 29 \text{ dB indien } f_0 < f < f_c \text{ [dB]} \\ R_1 + R_2 + 6 \text{ dB indien } f > f_c \end{cases} \quad (23)$$

Waarbij: R_M = geluidverzwakkingsindex van hele wand volgens massawet [dB]
 R_1 = geluidverzwakkingsindex van metselwerk volgens massawet [dB]
 R_2 = geluidverzwakkingsindex van rechterblad volgens massawet [dB]

f = frequentie [Hz]
 f_r = resonantiefrequentie [Hz]
 f_c = frequentie van de coïncidentiedip of grensfrequentie [Hz]
 d = breedte van de spouw [m]

De grenzen van de gebieden, zijnde de resonantiefrequentie en de frequentie van de coïncidentiedip, worden respectievelijk bepaald met de volgende formules [92]:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \text{ [Hz]} \quad (24)$$

Waarbij: c = snelheid van geluid in lucht [$\frac{m}{s}$]
 m_1 = oppervlakttemassa van metselwerk [$\frac{kg}{m^2}$]

$$m_2 = \text{oppervlaktemassa van rechterblad } \left[\frac{kg}{m^2}\right]$$

$$d = \text{breedte van de spouw } [m]$$

$$\rho = \text{massadichtheid van lucht } \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$f_c = \frac{55}{d} [Hz] \quad (25)$$

Uit deze formules blijkt dat het van cruciaal belang is de massawet te gebruiken om de geluidverzwakkingsindex van een dubbele wand te bepalen, waarbij de massawet afhankelijk is van de oppervlaktemassa van de onderdelen van de wand.

4.4.3.1 Massawet

De oppervlaktemassa van een materiaal kan worden bepaald door de massadichtheid van dit materiaal te vermenigvuldigen met zijn dikte. Aangezien de woning waarin de meetruimte zich bevindt, dateert van 1960, is het niet eenvoudig om te achterhalen wat de massadichtheden (via fiches van de leveranciers) van de gebruikte materialen precies zijn. Bovendien werd er gewerkt met zelfgemaakte betonstenen om de binnenmuren te construeren, hetgeen deze al reeds moeilijke opdracht quasi onmogelijk maakt. Omwille van deze reden wordt er gekozen om de oppervlaktemassa van de gebruikte materialen gefundeerd te schatten aan de hand van waarden gevonden in de literatuur. In de onderstaande tabel worden de resultaten van deze gefundeerde schattingen weergegeven.

Materiaal	Massadichtheid [kg/m ³]	Dikte [m]	Oppervlaktemassa [kg/m ²]
Metselwerk	2100	0,1	210
Gipspleister	900	0,01	9
Behangpapier	900	0,002	1,8
Betonsteen	1854	0,2	370,8

Tabel 33: Schatting oppervlaktemassa [93] [94] [95]

Bij deze tabel moeten we opmerken dat er werd gekozen voor de massadichtheid van poreus beton; vermits de betonstenen zelfgemaakt zijn, wordt ervan uitgegaan dat de kwaliteit ondermaats is.

Vervolgens kan de oppervlaktemassa van de materialen gebruikt worden om de geluidverzwakkingsindex van elk gebied aan de hand van de massawet op te stellen. De massawet stelt dat de geluidsisolatie van een element verbetert naarmate de oppervlaktemassa van dit element verhoogt [96]. Er zal worden aangenomen dat het geluid loodrecht invalt, hetgeen in dit onderzoek plausibel is, daar de geluidsbronnen recht voor de façade worden geplaatst. De volgende formules geven de massawet weer [92]:

$$R_M = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\pi f m_{tot}}{\rho c} \right)^2 \right) [dB] \quad (26)$$

Waarbij:

$$m_{tot} = \text{totale oppervlaktemassa van samengestelde wand } \left[\frac{kg}{m^2}\right]$$

$$c = \text{snelheid van geluid in lucht } \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$\rho = \text{massadichtheid van lucht } \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

$$f = \text{frequentie } [Hz]$$

$$R_1 = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\pi f m_1}{\rho c} \right)^2 \right) [dB] \quad (27)$$

Waarbij: m_1 = oppervlakttemassa van metselwerk $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
 c = snelheid van geluid in lucht $\left[\frac{m}{s}\right]$
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
 f = frequentie [Hz]

$$R_2 = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\pi f m_2}{\rho c} \right)^2 \right) [dB] \quad (28)$$

Waarbij: m_2 = oppervlakttemassa van rechterblad $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$
 c = snelheid van geluid in lucht $\left[\frac{m}{s}\right]$
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
 f = frequentie [Hz]

Bovendien kunnen ook de grenzen bepaald worden als de oppervlakttemassa's van de onderdelen van de dubbele wand gekend zijn. Dit wordt gedaan aan de hand van (24) en (25).

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} = \frac{338,821}{2\pi} \sqrt{\frac{1,293}{0,05} \left(\frac{1}{210} + \frac{1}{591,6} \right)} = 22 \text{ Hz}$$

$$f_d = \frac{55}{d} = \frac{55}{0,05} = 1100 \text{ Hz}$$

Tot slot is het belangrijk om op te merken dat in de bovenstaande formules de snelheid van het geluid bepaald werd bij een buitentemperatuur van 14 graden Celsius, hetgeen de gemeten buitentemperatuur was ten tijde van de geluidsmetingen. De expressie om de snelheid van geluid te berekenen bij een variabele luchttemperatuur luidt als volgt [97]:

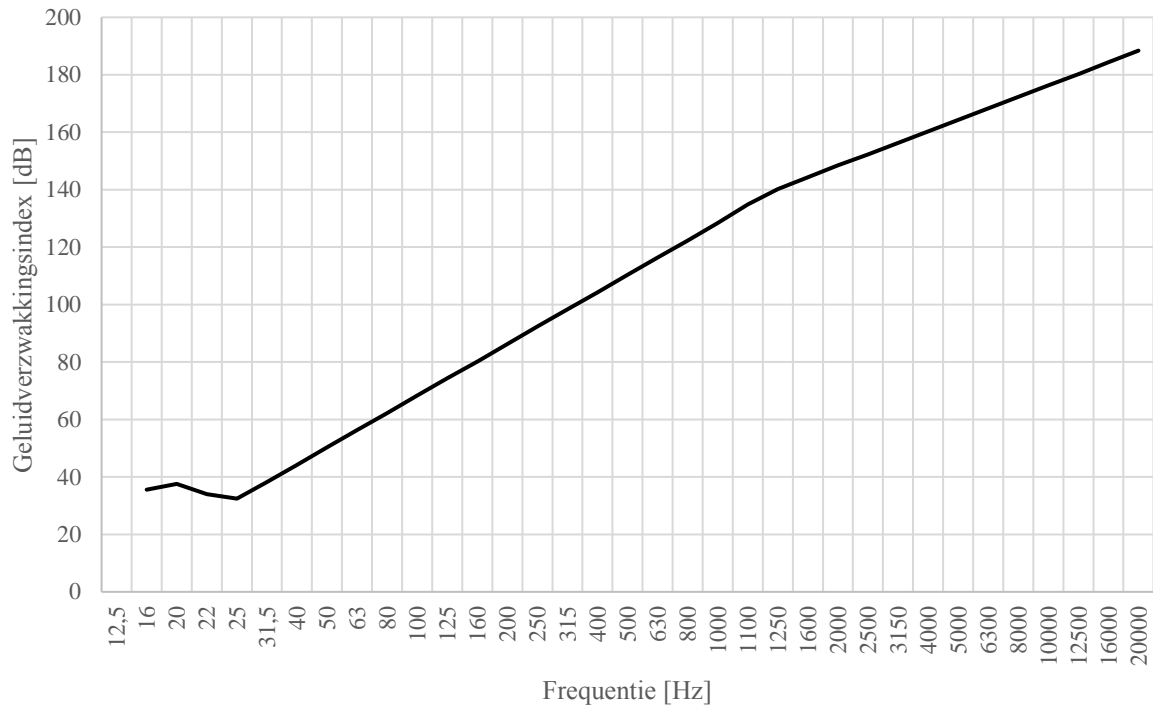
$$c = 20\sqrt{T} \left[\frac{m}{s}\right] \quad (29)$$

Waarbij: T = temperatuur [K]

4.4.3.2 Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (dubbele wand)

Uit (23), (26), (27) en (28) blijkt duidelijk dat de geluidverzwakkingsindex van een dubbele wand zal variëren naargelang de frequentie verandert. Het is bijgevolg mogelijk om dit grafisch weer te geven, hetgeen duidelijk wordt in de onderstaande figuur.

Geluidverzwakkingsindex dubbele wand



Figuur 69: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (dubbele wand)

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
R [dB]	46,6	44,6	42,8	41,0	39,2	37,3	42,7	44,7	46,8	48,7	50,6

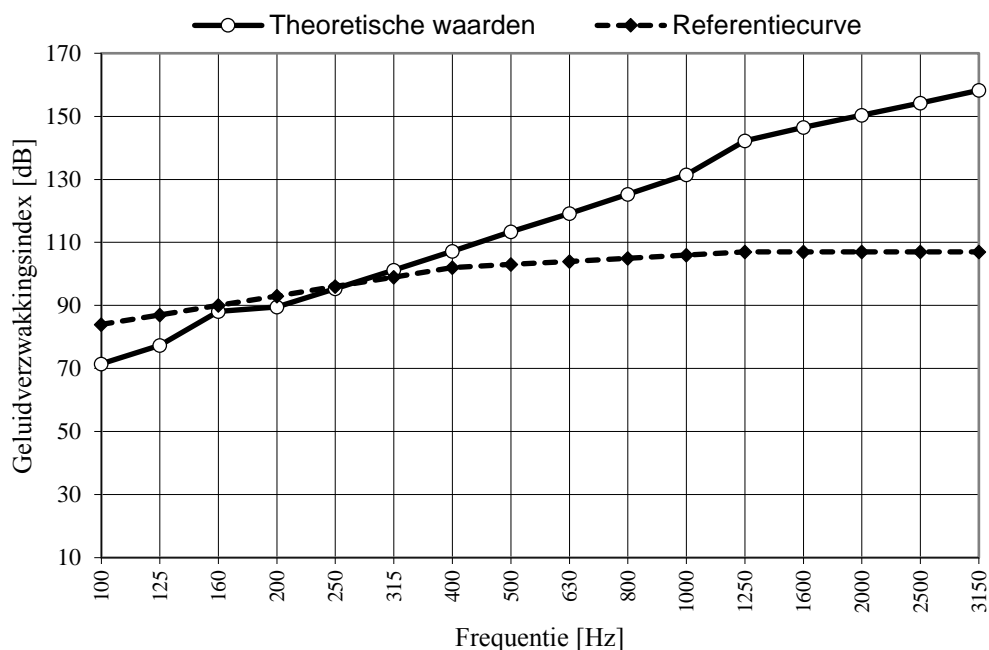
Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
R [dB]	28,2	31,4	34,6	37,9	41,4	44,6	47,9	51,4	54,6	57,8	61,4

Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
R [dB]	64,6	67,8	71,1	74,6	77,8	81,1	84,6	87,8	91,0	94,6	97,8

Tabel 34: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (dubbele wand)

Het is echter gebruikelijk – net zoals bij de schijnbare geluidverzwakkingsindex – de theoretische geluidverzwakkingsindex van een dubbele wand weer te geven in een eengetalsaanduiding. Het proces om de gewogen waarde van de theoretische geluidverzwakkingsindex te bepalen is volledig analoog aan het voorgaande proces van de schijnbare geluidverzwakkingsindex. Dit zal bijgevolg evenzeer gedaan worden aan de hand van NBN EN ISO 717-1.

In dit geval wordt de referentiecurve naar boven verschoven met 51 stappen van 1 dB, hetgeen resulteert in een verschuiving van +51 dB. De som van de ongunstige afwijkingen bedraagt 28,2 dB, hetgeen in dit geval het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 32 dB. De volgende figuur geeft de verschuiving van de referentiecurve ten opzichte van de theoretisch bepaalde waarden van de geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand weer.



Figuur 70: Verschuiving referentiecurve (dubbele wand)

Na de verschuiving wordt er gekeken naar de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de tabel kan worden gehaald als zijnde 103 dB. De verschuiving wordt zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom.

Gewogen waarde van de geluidverzwakingsindex (ISO 717-1)				
Frequentie [Hz]	R [dB]	ISO 717-1		Ongunstige afwijkingen
100	71,5	33	84	12,5
125	77,3	36	87	9,7
160	88,1	39	90	1,9
200	89,5	42	93	3,5
250	95,4	45	96	0,6
315	101,2	48	99	0,0
400	107,2	51	102	0,0
500	113,4	52	103	0,0
630	119,2	53	104	0,0
800	125,3	54	105	0,0
1000	131,5	55	106	0,0
1250	142,2	56	107	0,0
1600	146,5	56	107	0,0
2000	150,4	56	107	0,0
2500	154,2	56	107	0,0
3150	158,2	56	107	0,0

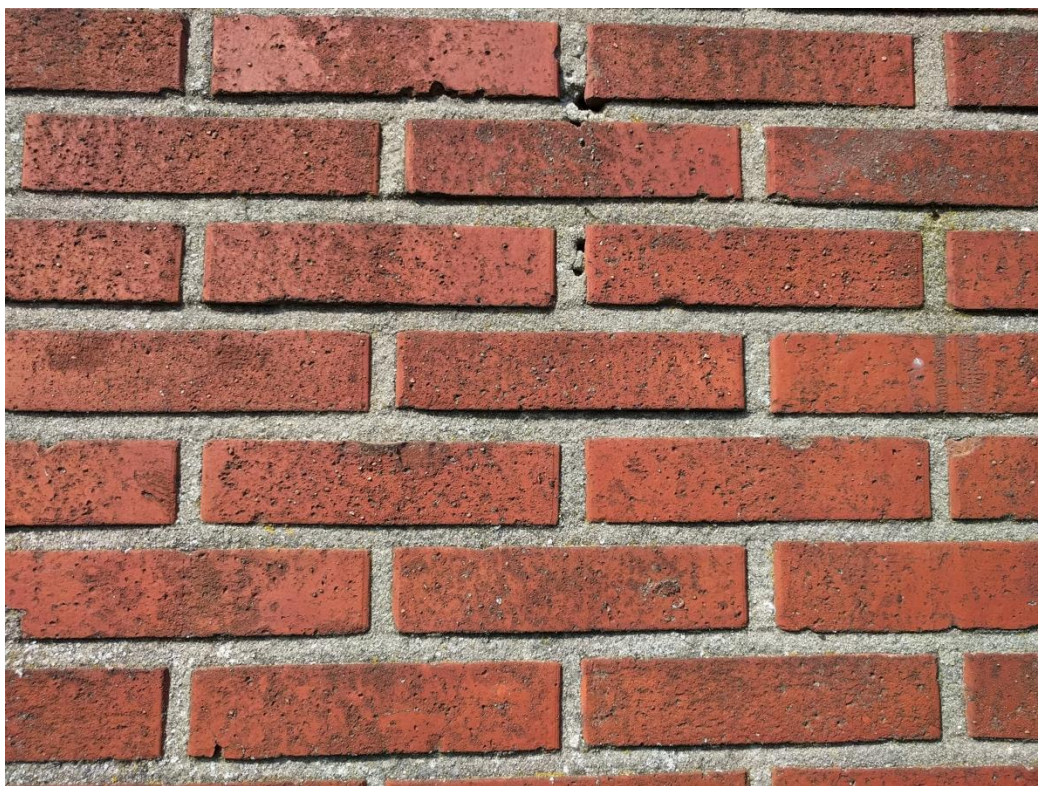
Tabel 35: Bepalen gewogen waarde geluidverzwakingsindex (dubbele wand)

Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de theoretische geluidverzwakingsindex R_w van deze dubbele wand gelijk is aan 103 dB. Dit is een zeer hoge waarde die in de praktijk zeer moeilijk te

bereiken is, mede doordat er in (23) wordt vanuit gegaan dat er een poreuze absorber – ook wel massa-absorber genoemd – aanwezig is in de spouw en dat de onderdelen van de dubbele wand volledig ontkoppeld zijn [98]. In de realiteit is dit echter vaak niet het geval, en zeker niet bij oudere woningen (zoals de woning die gebruikt wordt in deze masterproef).

4.4.4 Theoretische geluidverzwakkingsindex (enkelvoudige wand)

Er werd reeds meermaals aangehaald dat de meetruimte, waar het gros van dit onderzoek zich afspeelt, deel uitmaakt van een woning gebouwd in 1960. Dit betekent dat deze woning een leeftijd heeft van maar liefst 58 jaar. Bijgevolg is het niet onlogisch dat de buitenmuur (bestaande uit metselwerk) na jaren van verwerking momenteel in een slechte staat is. Hierdoor is het mogelijk dat de dubbele wand zich in de praktijk gaat gedragen als een enkelvoudige wand, daar het metselwerk mogelijks geen aandeel heeft in het reduceren van geluid; dit wilt zeggen dat we in dit geval enkel het rechterblad van de wand (zie figuur 69) zullen beschouwen, hetgeen bestaat uit betonsteen, gipspleister en behangpapier. De onderstaande figuur toont de toestand van de buitenmuur.



Figuur 71: Staat van het metselwerk

In tegenstelling tot de geluidverzwakkingsindex van een dubbele wand, dewelke gebaseerd is op experimentele formules, is de theoretische analyse van de geluidverzwakkingsindex van een enkelvoudige wand wel uitvoerig bestudeerd. Net zoals bij een dubbele wand kan de frequentieafhankelijke capaciteit van een enkelvoudige wand om geluid te reduceren verdeeld worden in drie gebieden: 1) een gebied waar de stijfheid van de wand bepalend is; 2) een gebied waar de massawet van toepassing is en 3) een gebied bepaald door inwendige demping. De grenzen van deze gebieden worden wederom bepaald door de resonantiefrequentie en de coïncidentiedip [92]. De onderstaande formules zullen respectievelijk worden gebruikt om de theoretische geluidverzwakkingsindex van de veronderstelde enkelvoudige wand te bepalen voor elk gebied.

In het eerste gebied wordt de geluidverzwakkingsindex op de volgende wijze bepaald [92]:

$$R = 10 \log(K_s^{-2}) - 10 \log \ln(1 + K_s^{-2}) \text{ [dB]} \quad (30)$$

Waarbij: $K_s =$ stijfheid van de wand $[\frac{N}{m}]$

Voor de stijfheid van de wand geldt [92]:

$$K_s = 4\pi f \rho c C_s \left[\frac{N}{m}\right] \quad (31)$$

Waarbij: $c =$ snelheid van geluid in lucht $[\frac{m}{s}]$

$\rho =$ massadichtheid van lucht $[\frac{kg}{m^3}]$

$C_s =$ mechanische compliantie van de wand $[\frac{m}{N}]$

$f =$ frequentie [Hz]

De uitdrukking van de mechanische compliantie van de wand luidt [92]:

$$C_s = \frac{768(1-\nu^2)}{\pi^8 E h^3 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)^2} \left[\frac{m}{N}\right] \quad (32)$$

Waarbij: $\nu =$ Poisson ratio [-]

$E =$ elasticiteitsmodulus $[\frac{N}{m^2}]$

$h =$ dikte van de wand [m]

$a =$ hoogte van de wand [m]

$b =$ lengte van de wand [m]

In het tweede gebied wordt de geluidverzwakkingsindex, daarentegen, aan de hand van de massawet bepaald [92]:

$$R = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\pi f m}{\rho c} \right)^2 \right) \text{ [dB]} \quad (33)$$

Waarbij: $m =$ oppervlakttemassa van het rechterblad $[\frac{kg}{m^2}]$

$c =$ snelheid van geluid in lucht $[\frac{m}{s}]$

$\rho =$ massadichtheid van lucht $[\frac{kg}{m^3}]$

$f =$ frequentie [Hz]

In het derde gebied, waar inwendige demping optreedt, wordt de geluidverzwakkingsindex tenslotte gegeven door de volgende uitdrukking [92]:

$$R = R(f_c) + 10 \log(\eta) + 33,22 \log\left(\frac{f}{f_c}\right) - 5,7 \text{ [dB]} \quad (34)$$

Waarbij: $R(f_c) =$ geluidverzwakkingsindex bij de grensfrequentie bepaald met de massawet [dB]

$\eta =$ verliesfactor ten gevolge van demping [-]

$f_c =$ grensfrequentie [Hz]

$f =$ frequentie [Hz]

De grenzen van de gebieden, zijnde de resonantiefrequentie en de grensfrequentie, worden respectievelijk bepaald aan de hand van de volgende formules [92]:

$$f_r = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} c_{wand} h \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) [Hz] \quad (35)$$

Waarbij: c_{wand} = snelheid van geluid in de wand [$\frac{m}{s}$]
 h = dikte van de wand [m]
 a = hoogte van de wand [m]
 b = lengte van de wand [m]

$$f_c = \frac{c^2 \sqrt{3}}{\pi h c_{wand}} [Hz] \quad (36)$$

Waarbij: c_{wand} = snelheid van geluid in de wand [$\frac{m}{s}$]
 c = snelheid van geluid in lucht [$\frac{m}{s}$]
 h = dikte van de wand [m]

4.4.4.1 Eigenschappen van de enkelvoudige wand

Uit al de bovenstaande formules blijkt dat er heel wat meer gegevens nodig zijn voor het bepalen van de geluidverzwakkingsindex van een enkelvoudige wand, dewelke opnieuw zullen worden gezocht in de literatuur. Hierbij zullen enkel de betonstenen en de gipspleister worden beschouwd, gezien het behangpapier slechts 0,94% uitmaakt van de totale dikte van de enkelvoudige muur; dit mag naar onze mening bijgevolg verwaarloosd worden. Aangezien de massadichtheid (en dus de oppervlaktemassa) van de verschillende onderdelen reeds geschat werd, is het enkel nodig om de elasticiteitsmodulus E , de Poisson ratio ν en de verliesfactor ten gevolge van demping η te bepalen. De onderstaande tabel geeft de gefundeerde schatting van deze gegevens weer.

Materiaal	Massadichtheid [kg/m ³]	Dikte [m]	Oppervlakte-massa [kg/m ²]	Elasticiteitsmodulus [N/mm ²]	Poisson ratio [-]	Verliesfactor [-]
Gipspleister	900	0,01	9	5200	0,33	0,035
Betonsteen	1854	0,2	370,8	7860	0,20	0,01

Tabel 36: Eigenschappen van de onderdelen [93] [94] [95] [99]

De snelheid van geluid in een vaste stof, zoals betonsteen of gipspleister, wordt bepaald aan de hand van de volgende formule [97]:

$$c_{vaste\ stof} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (37)$$

Waarbij: E = elasticiteitsmodulus van het materiaal [$\frac{N}{m^2}$]
 ρ = massadichtheid van het materiaal [$\frac{kg}{m^3}$]

Dit levert de volgende resultaten voor respectievelijk betonsteen en gipspleister:

$$c_{betonsteen} = 2059 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$c_{gipspleister} = 2404 \left[\frac{m}{s} \right]$$

De veronderstelde enkelvoudige wand bestaat bijgevolg uit twee onderdelen (betonsteen en gipspleister) met verschillende eigenschappen. Vermits de gipspleister op de betonsteen is aangebracht, werken deze onderdelen samen. Het is dus nodig om de eigenschappen van de aparte onderdelen om te vormen naar de eigenschappen van de enkelvoudige wand in zijn geheel. Hierbij zal worden rekening gehouden met het feit dat de totale dikte van de muur voor 95% bestaat uit betonsteen en voor 5% bestaat uit gipspleister (zoals reeds gezegd zal het behangpapier verwaarloosd worden). Vervolgens worden alle noodzakelijke gegevens berekend alsof de wand volledig uit respectievelijk betonsteen en gipspleister zou bestaan, waarna deze resultaten procentueel zullen worden opgeteld. Dit levert de volgende resultaten:

$$C_{s,betonsteen} = \frac{768(1-v^2)}{\pi^8 E_{betonsteen} h^3 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2} = 1,83539 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m}{N} \right]$$

$$C_{s,gipspleister} = \frac{768(1-v^2)}{\pi^8 E_{gipspleister} h^3 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2} = 2,57515 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m}{N} \right]$$

$$C_{s,wand} = 0,95 \cdot C_{s,betonsteen} + 0,05 \cdot C_{s,gipspleister} = 1,87238 \cdot 10^{-8} \left[\frac{m}{N} \right]$$

$$\eta_{betonsteen} = 0,01 [-]$$

$$\eta_{gipspleister} = 0,035 [-]$$

$$\eta_{wand} = 0,95 \cdot \eta_{betonsteen} + 0,05 \cdot \eta_{gipspleister} = 0,01125 [-]$$

$$f_{r,betonsteen} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} c_{betonsteen} h \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) = 47,28 [Hz]$$

$$f_{r,gipspleister} = \frac{\pi}{4\sqrt{3}} c_{gipspleister} h \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) = 55,21 [Hz]$$

$$f_{r,wand} = 0,95 \cdot f_{r,betonsteen} + 0,05 \cdot f_{r,gipspleister} = 47,68 [Hz]$$

$$f_{c,betonsteen} = \frac{c^2 \sqrt{3}}{\pi h c_{betonsteen}} = 146,38 [Hz]$$

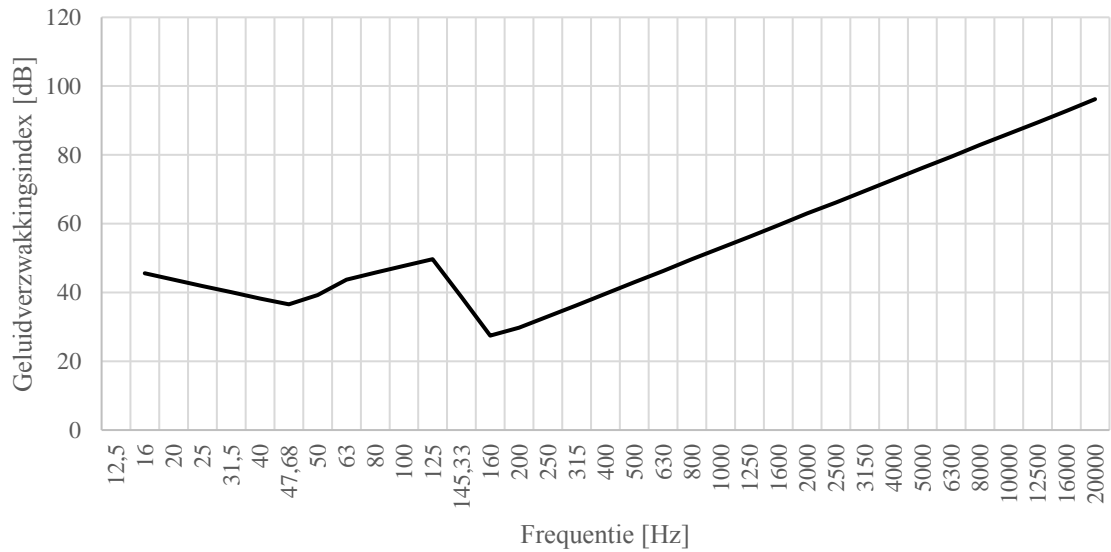
$$f_{c,gipspleister} = \frac{c^2 \sqrt{3}}{\pi h c_{gipspleister}} = 125,37 [Hz]$$

$$f_{c,wand} = 0,95 \cdot f_{c,betonsteen} + 0,05 \cdot f_{c,gipspleister} = 145,33 [Hz]$$

4.4.4.2 Gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex (enkelvoudige wand)

De geluidverzwakkingsindex van een enkelvoudige wand is – net zoals de geluidverzwakkingsindex van een dubbele wand – afhankelijk van de frequentie. Het is bijgevolg mogelijk om de geluidverzwakkingsindex van een enkelvoudige wand grafisch weer te geven, hetgeen de onderstaande figuur duidelijk maakt.

Geluidsverzwakkingsindex enkelvoudige wand



Figuur 72: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (enkelvoudige wand)

Frequentie [Hz]	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125
R [dB]	46,6	44,6	42,8	41,0	39,2	37,3	42,7	44,7	46,8	48,7	50,6

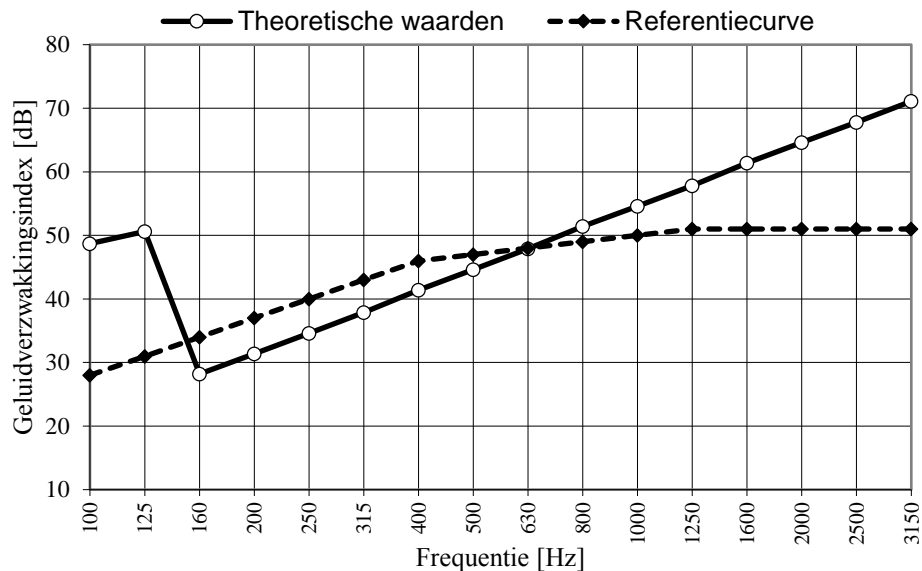
Frequentie [Hz]	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
R [dB]	28,2	31,4	34,6	37,9	41,4	44,6	47,9	51,4	54,6	57,8	61,4

Frequentie [Hz]	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500	16000	20000
R [dB]	64,6	67,8	71,1	74,6	77,8	81,1	84,6	87,8	91,0	94,6	97,8

Tabel 37: Geluidverzwakkingsindex per frequentie (enkelvoudige wand)

Het is wederom gebruikelijk om de geluidverzwakkingsindex van een enkelvoudige wand weer te geven aan de hand van een eengetalsaanduiding. Het proces om de gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex van een enkelvoudige wand te bepalen is volledig analoog aan de werkwijze die gebruikt werd om de gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex en de theoretische geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand te bepalen; dit zal bijgevolg evenzeer gedaan worden aan de hand van NBN EN ISO 717-1.

In dit geval wordt de referentiecurve naar onder verschoven met 5 stappen van 1 dB, hetgeen resulteert in een verschuiving van -5 dB. De som van de ongunstige afwijkingen bedraagt 29 dB, hetgeen hier het grootst mogelijk is, maar niet groter dan 32 dB. De volgende figuur geeft de verschuiving van de referentiecurve ten opzichte van de theoretisch bepaalde waarden van de geluidverzwakkingsindex van de enkelvoudige wand weer.



Figuur 73: Verschuiving referentiecurve (enkelvoudige wand)

Na de verschuiving wordt er wederom gekeken naar de waarde van de referentiecurve bij een frequentie van 500 Hz, hetgeen uit de tabel kan worden gehaald als zijnde 47 dB. Dit betekent bijgevolg dat de gewogen waarde van de theoretische geluidverzwakingsindex R_w van deze veronderstelde enkelvoudige wand gelijk is aan 47 dB. De verschuiving wordt zichtbaar wanneer we de derde kolom van de tabel vergelijken met de vierde kolom.

Gewogen waarde van de geluidverzwakingsindex (ISO 717-1)				
Frequentie [Hz]	R [dB]	ISO 717-1		Ongunstige afwijkingen
100	48,7	33	28	0,0
125	50,6	36	31	0,0
160	28,2	39	34	5,8
200	31,4	42	37	5,6
250	34,6	45	40	5,4
315	37,9	48	43	5,1
400	41,4	51	46	4,6
500	44,6	52	47	2,4
630	47,9	53	48	0,1
800	51,4	54	49	0,0
1000	54,6	55	50	0,0
1250	57,8	56	51	0,0
1600	61,4	56	51	0,0
2000	64,6	56	51	0,0
2500	67,8	56	51	0,0
3150	71,1	56	51	0,0

Tabel 38: Bepalen gewogen waarde geluidverzwakingsindex (enkelvoudige wand)

4.4.5 Invloed van het raam

Tot nog toe werd de gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex van zowel de dubbele wand als de (veronderstelde) enkelvoudige wand berekend zonder rekening te houden met de aanwezigheid van het raam. Om de invloed van het raam op de geluidverzwakkingsindex van de wand te includeren, wordt gebruik gemaakt van (15). Hierbij zullen we een aantal gefundeerde aannames maken aan de hand van de literatuur, daar er niet veel geweten is over de eigenschappen van het raam, bestaande uit enkel glas en een pvc-omkadering. Ten eerste wordt ervan uitgegaan dat de gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex van het enkel glas $R_{w,glas}$ gelijk is aan 31 dB, hetgeen overeenkomt met enkel glas met een dikte van 5 mm [100].

Ten tweede wordt er verondersteld dat de omkadering een geluidverzwakkingsindex heeft waarvan de gewogen waarde $R_{w,kader}$ gelijk is aan 20 dB, hetgeen overeenstemt met een dunne houten plaat bestaande uit multiplex [101]. Er werd in de literatuur immers geen gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex teruggevonden met betrekking tot het pvc-omkaderingen. Deze tweede aanname is gerechtvaardigd omdat het blijkt dat raamkozijnen, bestaande uit hout en polyvinylchloride, min of meer dezelfde eigenschappen vertonen bij het reduceren van geluid [102]. De onderstaande figuur toont deze vrijwel gelijke reducerende eigenschap. Hierbij dient evenwel opgemerkt te worden dat deze figuur handelt over ramen uit dubbel glas (met aldus een hogere geluidverzwakkingsindex dan het raam in dit onderzoek).

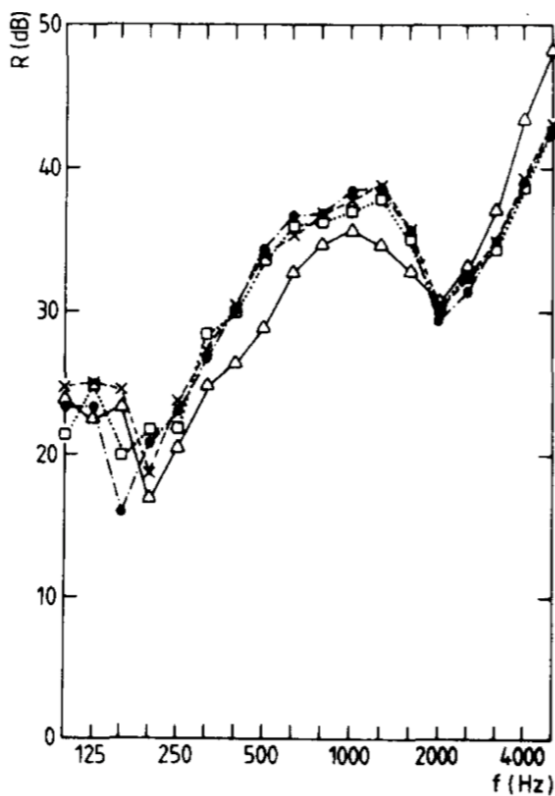


Fig. 6. Sound transmission loss of the double glass panel with thickness (6-12-6)mm compared with the results on PVC, wooden and aluminium windows, in the AHCL test facility: (△—△) glass panel; (×---×) PVC window; (□···□) wooden window; (●---●) aluminium window.

Figuur 74: Vergelijking van raamkozijnen (aluminium, hout, pvc) [102]

Vooraleer (15) gebruikt kan worden, is het nodig om de oppervlakte van alle nodige onderdelen van de wand te bepalen. De oppervlakte van het enkel glas en het raamkozijn zijn reeds gekend uit tabel 24.

Bijgevolg volstaat het om deze gekende oppervlakken af te trekken van de totale oppervlakte van de wand om alzo de effectieve oppervlakte van de wand te bekomen.

$$S_{wand} = S_{tot} - S_{glas} - S_{kozijn} = 2,37 \text{ m} \cdot 3,98 \text{ m} - 1,28 \text{ m}^2 - 0,92 \text{ m}^2 = 7,23 \text{ m}^2$$

Vervolgens kan de werkelijke theoretische geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand en de (veronderstelde) enkelvoudige wand bepaald worden door de oppervlaktes van de verschillende onderdelen in te vullen in (15) op de volgende wijze:

$$R_w = -10 \log \left(\frac{S_{wand} \cdot 10^{\frac{R_{w,wand}}{10}} + S_{glas} \cdot 10^{\frac{-R_{w,glas}}{10}} + S_{kader} \cdot 10^{\frac{-R_{w,kader}}{10}}}{S_{tot}} \right) \quad [dB] \quad (15)$$

Tot slot levert dit de volgende resultaten voor respectievelijk de gewogen waarde van de theoretische geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand en de (veronderstelde) enkelvoudige wand.

$$R_{w,dubbel} = -10 \log \left(\frac{7,23 \cdot 10^{\frac{103}{10}} + 1,28 \cdot 10^{\frac{-31}{10}} + 0,92 \cdot 10^{\frac{-20}{10}}}{9,43} \right) = 29,6520 \text{ dB}$$

$$R_{w,enkelvoudig} = -10 \log \left(\frac{7,23 \cdot 10^{\frac{44}{10}} + 1,28 \cdot 10^{\frac{-31}{10}} + 0,92 \cdot 10^{\frac{-20}{10}}}{9,43} \right) = 29,5313 \text{ dB}$$

Hieruit blijkt dat het raam een significante invloed heeft op de uiteindelijke gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex.

4.4.6 Bepalen van lekoppervlakte, debiet en ventilatievoud

Alle gegevens zijn nu bekend om de lekoppervlakte te bepalen in elke situatie door gebruik te maken van (19). Deze vergelijking luidt als volgt [1]:

$$S_l = \left(\frac{1 - 10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S \quad [m^2] \quad (19)$$

Waarbij:

- R'_w = schijnbare geluidverzwakkingsindex van de wand (gewogen waarde) [dB]
- R_w = theoretische geluidverzwakkingsindex van de wand (gewogen waarde) [dB]
- C_F = factor die flankerende transmissie in rekening brengt [dB]
- S_l = lekoppervlakte van de opening [m²]
- S = totale oppervlakte van de wand [m²]

Vermits er werd verondersteld dat het metselwerk weinig bijdraagt aan de reducering van geluid, hetgeen plausibel is wanneer we de staat van het metselwerk beschouwen in figuur 72, zal er zowel gebruik worden gemaakt van de gewogen waarde van de theoretische geluidverzwakkingsindex van de dubbele wand als de enkelvoudige wand om na te gaan of deze veronderstelling klopt.

Daarnaast zal in (19) C_F , de factor die flankerende transmissie in rekening brengt, niet in rekening worden genomen. De invloed van flankerende transmissie is namelijk hoofdzakelijk merkbaar bij grotere gebouwen, waar er zich veel ruimtes naast elkaar bevinden, zoals appartementen of kantoorgebouwen [103] [104]. Dit betekent niet dat er geen flankerende transmissie kan voorkomen in alleenstaande woningen, maar de invloed is kleiner dan bij appartementen [105].

Vervolgens zal de lekoppervlakte gebruikt worden om het debiet – en daarna evenzeer het ventilatievoud – te bepalen met behulp van (20). De expressie die toegepast zal worden, is als volgt:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (20)$$

Waarbij: \dot{V} = luchtdebiet $\left[\frac{m^3}{s} \right]$
 S_l = oppervlakte van de opening $[m^2]$
 C_d = weerstandsgetal [-]
 ΔP = drukverschil $[Pa]$
 ρ = massadichtheid van lucht $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

Tot slot moet er worden opgemerkt dat het weerstandsgetal C_d in deze vergelijking niet zal bepaald worden met (9), gezien de lekoppervlakte (hoogstwaarschijnlijk) bestaat uit meerdere openingen waarvan de afmetingen niet bekend zijn. In plaats daarvan zal de algemene waarde $C_d = \frac{\pi}{\pi+2} = 0,611$ gebruikt worden. De onderstaande tabel toont de resultaten van deze berekeningen; in bijlage G worden de berekeningen uitgebreider getoond.

Normaal					
<i>Dubbele wand</i>			<i>Enkelvoudige wand</i>		
Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$	Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$
0,019604	379,218	10,00	0,019316	373,647	9,86
Maatregel 1					
<i>Dubbele wand</i>			<i>Enkelvoudige wand</i>		
Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$	Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$
0,013470	260,570	6,88	0,013182	254,992	6,73
Maatregel 2					
<i>Dubbele wand</i>			<i>Enkelvoudige wand</i>		
Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$	Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$
0,008599	166,338	4,39	0,008311	160,767	4,28
Maatregel 3					
<i>Dubbele wand</i>			<i>Enkelvoudige wand</i>		
Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$	Lek-oppervlakte $[m^2]$	Debiet bij 50 Pa $[m^3/h]$	Ventilatievoud bij 50 Pa $[1/h]$
0,008599	166,338	4,39	0,008311	160,767	4,28

Tabel 39: Resultaten berekening lekoppervlakte, debiet en ventilatievoud

4.4.7 Theoretische schattingsmethode versus metingen

De theoretische schattingsmethode reikt een algemene methode aan om de luchtdichtheid van elke façade te bepalen aan de hand van geluidsmetingen, ongeacht of deze gelijkaardig is aan de façade gebruikt in dit experiment. Om de bruikbaarheid van deze schattingsmethode te evalueren, worden de bekomen waarden van het ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa, vergeleken met de gemeten waarden van het ventilatievoud bij eenzelfde drukverschil. Hierbij zal telkens de afwijking van de

berekende waarde ten opzichte van de gemeten waarde als een maatstaf beschouwd worden voor de toepasbaarheid van de theoretische schattingsmethode. De onderstaande tabel toont de samenvattende resultaten van deze vergelijking voor beide werkwijzen (dubbele wand en enkelvoudige wand).

Normaal				
<i>Dubbele wand</i>	<i>Enkelvoudige wand</i>	<i>Gemeten waarde</i>	<i>Afwijking</i>	
Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Samengestelde wand [%]	Enkelvoudige wand [%]
10,00	9,86	7,14	40,1	38,1
Maatregel 1				
<i>Dubbele wand</i>	<i>Enkelvoudige wand</i>	<i>Gemeten waarde</i>	<i>Afwijking</i>	
Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Samengestelde wand [%]	Enkelvoudige wand [%]
6,88	6,73	6,79	1,3	0,88
Maatregel 2				
<i>Dubbele wand</i>	<i>Enkelvoudige wand</i>	<i>Gemeten waarde</i>	<i>Afwijking</i>	
Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Samengestelde wand [%]	Enkelvoudige wand [%]
4,39	4,28	5,85	25,0	26,8
Maatregel 3				
<i>Dubbele wand</i>	<i>Enkelvoudige wand</i>	<i>Gemeten waarde</i>	<i>Afwijking</i>	
Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Ventilatievoud bij 50 Pa [1/h]	Samengestelde wand [%]	Enkelvoudige wand [%]
4,39	4,28	5,35	17,9	20,0

Tabel 40: Vergelijking schatting versus meting

Het blijkt dat de theoretische schattingsmethode die gebruik maakt van de gewogen waarde van de geluidverzwakingsindex van de dubbele wand een maximale afwijking heeft van 40,1%, waarbij de gemiddelde afwijking van deze methode 21,8% bedraagt. De theoretische schattingsmethode die daarentegen, gebruik maakt van de gewogen waarde van de geluidverzwakingsindex van de enkelvoudige wand en als het ware veronderstelt dat het gevelmetselwerk geen bijdrage levert, heeft een maximale afwijking van 38,1%. Nemen we de gemiddelde afwijking in beschouwing van deze laatste werkwijze, dan volgt hieruit dat deze 21,5% bedraagt.

4.5 DISCUSSIE

In dit onderzoek hebben we getracht na te gaan of geluidsmetingen nauwkeurig genoeg zijn om gebruikt te kunnen worden bij het schatten van de luchtdichtheid van een façade door het uitvoeren van een tweeledig experiment, bestaande uit luchtdichtheidsmetingen met een BlowerDoortoestel en geluidsmetingen met zowel professionele apparatuur als een mobiele applicatie. Vermits het onderzoek bestaat uit drie delen zullen achtereenvolgens de resultaten van deze delen apart worden besproken om zodoende duidelijkheid te scheppen over onze bevindingen en op welke manier deze geïnterpreteerd moeten worden. Hierbij moet meteen worden duidelijk gemaakt dat we ons in dit deel enkel zullen beperken tot het kritisch bespreken van de resultaten van het onderzoek in se en dus niet van de voorgaande delen die evenwel niet behoren tot het onderzoek.

4.5.1 Pressuratiemetingen en geluidsmetingen

Uit de resultaten van de luchtdichtheidsmetingen blijkt dat de toegepaste ingrepen in dit onderzoek daadwerkelijk hebben geresulteerd in een verbetering van de luchtdichtheid van de façade bij het in acht nemen van het gemiddelde lekdebiet. Het valt echter op dat de lekdebieten in overdruk steevast groter zijn dan de lekdebieten bij de metingen in onderdruk.

Deze afwijking kan verklaard worden door de aard, in het bijzonder de geometrie, van bepaalde lekopeningen. Het is namelijk mogelijk dat sommige componenten een ander gedrag zullen vertonen ten gevolge van een overdruk in vergelijking met een onderdruk. In die zin bestaat de kans dat bepaalde openingen groter worden bij een opgelegde overdruk door het bewegen van een component en dat deze component bij de luchtdichtheidsmeting in onderdruk minder, of zelfs niet, beweegt [106]. Deze verklaring wordt bijgestaan door de mogelijkheid dat de rubberen componenten van het raam bij de meting in overdruk op een dergelijke wijze veren dat er een lek ontstaat. Bij een onderdruk wordt het rubber daarentegen naar het raam toegezogen, wat juist een positieve invloed heeft op de luchtdichtheid.

Daarnaast hebben de resultaten van de luchtdichtheidsmetingen aangetoond dat het lekdebiet in overdruk niet altijd vermindert bij het toevoegen van een luchtdichtheidsmaatregel, in tegenstelling tot de metingen in onderdruk, waar dit wel altijd het geval is. Dit kan enerzijds te wijten zijn aan de verklaring die hierboven gegeven wordt, in die zin dat een ingreep zo goed als geen invloed kan hebben op het gedrag van een bepaalde component wanneer de ruimte in overdruk wordt geplaatst. Anderzijds is het mogelijk dat er onnauwkeurige aflezingen van de manometer zijn gebeurd, hetgeen niet mag verbazen wanneer er wordt rekening gehouden met het feit dat er zo goed als nooit een constant lekdebiet in of uit de ruimte stroomt.

Voorts hebben de geluidsmetingen aangetoond dat de toegepaste luchtdichtheidsmaatregelen, naast een positieve invloed op de luchtdichtheid, evenzeer resulteren in een verbetering van de akoestische prestatie van de façade. In die zin kunnen we besluiten dat de akoestische prestatie van een wand en diens luchtdichtheid duidelijk hand in hand gaan. Hoewel de mobiele applicatie dit verband, hetzij minder nauwkeurig, tevens heeft aangetoond, kan deze meetmethode helaas niet als bruikbaar beschouwd worden door de grove afwijkingen bij het meten van het geluiddrukkniveau van de stilte in de meetruimte en het geluiddrukkniveau buiten, net vóór de façade. Het falen van de mobiele applicatie in dit experimenteel onderzoek betekent echter niet dat enkel zeer geavanceerde apparatuur, zoals gebruikt in dit onderzoek, moet gehanteerd worden om geluidsmetingen uit te voeren voor het in beeld brengen van het verband tussen de akoestische prestatie van een wand en diens luchtdichtheid. Hoewel precisie steeds gewenst is, wordt in [2] succesvol een relatief goedkope sonometer gebruikt voor hetzelfde doel.

Tot slot willen we opmerken dat er zowel bij pressuratiemetingen als geluidsmetingen altijd rekening moet gehouden worden met een bepaalde, hetzij een beperkte, graad van onnauwkeurigheid. Om deze onnauwkeurigheden tot een minimum te beperken, hebben we gedurende het tweeledig experiment steeds meerdere metingen uitgevoerd en hiervan het gemiddelde genomen. Dit sluit echter niet uit dat er geen meetfouten gebeurd zijn, daar dit quasi onmogelijk is om te garanderen.

4.5.2 Experimentele akoestische schattingsmethode

De experimentele schattingsmethode heeft aangetoond dat er een mathematische expressie kan worden opgesteld die het ventilatievoud in functie van het verschil in geluiddrukkniveau tussen de ontvangstkamer en de zendkamer uitdrukt. In tegenstelling tot de bekomen expressie in [2], hebben wij

vastgesteld dat een derdegraadsvergelijking nauwer aansluit op de resultaten bekomen in dit onderzoek, daar er een determinatiecoëfficiënt van 1 wordt gevonden, hetgeen duidt op een zeer sterke correlatie.

Uit de resultaten van de experimentele schattingsmethode blijkt dat deze methode de luchtdichtheid van de façade in dit experiment zeer nauwkeurig, doch niet perfect, kan schatten. Het is echter vrij logisch dat deze methode goede resultaten geeft, vermits de resultaten van de luchtdichtheidsmetingen gebruikt worden om de mathematische expressie op te stellen. In die zin is het zelfs verbazend dat er nog steeds kleine afwijkingen zijn tussen de waarden van het ventilatievoud bekomen met de experimentele schattingsmethode en de gemeten waarden van het ventilatievoud, daar de determinatiecoëfficiënt 1 bedraagt. Deze kleine afwijkingen kunnen verklaard worden door de beperkte rekenkracht van de regressieanalyse in Excel, waardoor een volkomen nauwkeurigheid niet mogelijk is.

Voorts hebben we beweerd dat de bekomen expressie gebruikt kan worden om de luchtdichtheid te schatten van gelijkaardige façades, zolang het verschil in geluiddrukkniveau van deze gelijkaardige façade zich in hetzelfde interval bevindt als de façade gebruikt in dit experiment, hetgeen ook wordt aangegeven in [2]. Hoewel het kleine interval waarbinnen deze expressie geldig is duidelijk gedefinieerd wordt, is het echter niet duidelijk wat het begrip ‘gelijkaardige façade’ precies inhoudt. Er kan dan ook niet in absolute termen worden bepaald in welke mate een façade gelijkaardig moet zijn, alvorens de mathematische expressie gebruikt kan worden om de luchtdichtheid van een dergelijke façade te schatten.

Tot slot kunnen we de kritische vraag stellen of de bekomen mathematische expressie een praktisch nut heeft buiten dit onderzoek, daar deze expressie slechts gebruikt kan worden op de façade in dit experiment en op ‘gelijkaardige façades’, dewelke moeilijk gedefinieerd kunnen worden in het geval van oudere woningen. In dat opzicht is het antwoord voor ons duidelijk, namelijk nee. Dit betekent echter niet dat deze methode volkomen onbruikbaar is. Integendeel, dit experiment zou herhaald kunnen worden op uiteenlopende hedendaagse façades waarvan meer gegevens beschikbaar zijn, om zodoende meerdere mathematische expressies te bekomen die op dezelfde wijze zouden gebruikt worden als in dit experiment.

4.5.3 Theoretische akoestische schattingsmethode

De theoretische schattingsmethode wordt geïntroduceerd om de tekortkomingen van de experimentele schattingsmethode te omzeilen. Het zou dan ook duidelijk moeten zijn dat deze methode toepasbaar is voor elke façade, ongeacht of deze façade gelijkaardig is – wat dat ook mogen zijn – aan de façade die in dit onderzoek wordt gebruikt. De bevindingen in [1] worden gebruikt om de lekoppervlakte te bepalen aan de hand van geluidsmetingen om daarna de luchtdichtheid van de façade te bepalen, hetzij op een andere manier.

De resultaten van de theoretische schattingsmethode hebben aangetoond dat deze methode de luchtdichtheid minder goed schat dan de voorgaande methode. Zowel de resultaten van de methode waarin een dubbele wand wordt gebruikt als de resultaten waarin een enkelvoudige wand wordt verondersteld, wijken beide in drie van de vier situaties behoorlijk af van de werkelijke luchtdichtheid, hetgeen te wijten kan zijn aan meerdere factoren.

Ten eerste wordt er in de theoretische schattingsmethode zodanig gesteund op de beschikbare literatuur om de eigenschappen van de onderdelen van de façade en de meetruimte te achterhalen dat het vanzelfsprekend is dat deze methode minder nauwkeurig is. In die zin is het zelfs opmerkelijk dat, rekening houdend met het aantal gefundeerde aannames, de resultaten die worden bekomen met deze methode niet meer afwijken van de werkelijke waarden.

Ten tweede maken we in dit onderzoek steeds gebruik van de gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex, hetgeen makkelijker is om mee te rekenen. De procedure die wordt gebruikt om deze gewogen waarde te bepalen, maakt het evenwel niet mogelijk de eengetalsaanduiding te bepalen tot na de komma. Hierdoor is het quasi onmogelijk om subtiele verschillen in het vermogen om geluid te reduceren van twee wanden weer te geven, daar deze wanden mogelijks dezelfde gewogen geluidverzwakkingsindex hebben, hetgeen niets te maken heeft met de nauwkeurigheid van de metingen, maar des te meer met de procedure.

Ten derde wordt de lekoppervlakte, die bekomen wordt met de stromingsvergelijking van een stroming door een opening, gecumuleerd tot één grote opening. In de realiteit bestaat deze opening, hoogstwaarschijnlijk, echter uit meerdere deelopeningen. Hierdoor zal de weerstandscoefficiënt, dewelke in dit geval als constant wordt verondersteld voor elke deelopening, wellicht verschillen van opening tot opening, afhankelijk van diens geometrische eigenschappen.

Voorts hebben de resultaten aangetoond dat de invloed van het raam op de geluidverzwakkingsindex van de façade vrij groot is, hetgeen duidelijk wordt bij het vergelijken van de geluidverzwakkingsindex van zowel de dubbele wand als de enkelvoudige, waarin de invloed van het raam initieel niet wordt meegerekend. Hieruit kunnen we besluiten dat de zwakste schakel bepalend is voor de totale akoestische prestatie van een onderdeel, hetgeen des te meer merkbaar is wanneer de geluidverzwakkingsindex initieel een hoge waarde heeft.

Tot slot kunnen we stellen dat de theoretische schattingsmethode – ondanks de vele aannames, behoorlijke afwijkingen en relatieve complexiteit – toch aanvaardbare resultaten geeft bij het schatten van de luchtdichtheid van een façade. In het bijzonder is deze methode interessant omdat er een algemene werkwijze wordt aangereikt die makkelijker wordt naargelang er meer gegevens beschikbaar zijn van de eigenschappen van de gebruikte materialen.

TUSSENTIJDSE CONCLUSIE

Tweeledig experiment. De vraag of geluidsmetingen nauwkeurig genoeg zijn om een schattingsmethode te ontwikkelen die de luchtdichtheid van een wand kan schatten, vereist het uitvoeren van een tweeledig experiment. Dit houdt in dat er luchtdichtheidsmetingen werden uitgevoerd in de vorm van pressuratietesten en geluidsmetingen op een façade waar luchtdichtheidsmaatregelen op werden aangebracht. Bij het vergelijken van deze twee verschillende soort metingen werd ondervonden dat deze maatregelen, naast een positieve invloed op de luchtdichtheid, evenzeer een verbetering van de akoestische prestatie als gevolg hadden, hetgeen de deur opende naar het introduceren van twee akoestische schattingsmethoden die de luchtdichtheid van de façade schatten, hetzij op een andere manier.

Experimentele akoestische schattingsmethode. De eerste schattingsmethode die werd gehanteerd, betreft een experimentele methode die gebruik maakt van de fysische correlatie tussen het ventilatievoud en het verschil in geluiddrukkniveau tussen de ontvangstkamer (binnen) en de zendkamer (buiten). Uit de vergelijking van de waarden van het ventilatievoud – bekomen door middel van deze methode – met de gemeten waarden van het ventilatievoud, kan worden besloten dat de experimentele schattingsmethode zeer nauwkeurig de luchtdichtheid kan schatten. Vermits de resultaten van de luchtdichtheidsmetingen worden gebruikt om de mathematische expressie, die de basis vormt van deze schattingsmethode, op te stellen, is dit echter niet onlogisch. Het praktische nut van deze expressie buiten het kader van dit experiment wordt dan ook terecht in twijfel getrokken. Dit betekent evenwel niet dat dit experiment niet herhaald kan worden op uiteenlopende hedendaagse façades om zodoende verschillende bruikbare expressies te bekomen om de luchtdichtheid te schatten.

Theoretische akoestische schattingsmethode. De tweede schattingsmethode die werd geïntroduceerd in dit onderzoek is gebaseerd op het verschil tussen de ‘schijnbare’ geluidverzwakkingsindex en de theoretische geluidverzwakkingsindex van een façade. In de veronderstelling dat dit verschil hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door luchtlekken, kan de lekoppervlakte hieruit bepaald worden, hetgeen op zijn beurt wordt ingevuld in de stromingsvergelijking van een stroming door een opening om alzo een geschat debiet, en tenslotte een ventilatievoud, te bekomen. Bij het vergelijken van de waarden van het ventilatievoud – bekomen door middel van de theoretische methode – met de gemeten waarden van het ventilatievoud, kan er worden besloten dat deze methode behoorlijke, maar aanvaardbare, afwijkingen vertoont bij het merendeel van de beschouwde situaties, hetgeen te wijten kan zijn aan meerdere factoren.

5 CONCLUSIE

Probleemstelling en methode. Het thema luchtdichtheid is niet meer weg te denken in een wereld waar steeds duurzamer wordt gebouwd. Om de luchtdichtheid van een gebouw te bewijzen, conform de EPB-voorschriften, kan dit tot op heden enkel door het laten uitvoeren van een pressuratietest, maar deze test wordt typisch uitgevoerd wanneer het gebouw reeds is afgewerkt, waardoor het moeilijk is om de luchtdichtheid indien nodig nog te verbeteren. Hieruit vloeit de noodzaak om een methode te ontwikkelen die het mogelijk maakt voor de uitvoerder om de luchtdichtheid van een gebouw continu te evalueren inzake de haalbaarheid van een opgelegde luchtdichtheidseis. Recent verschenen publicaties trachten akoestische methodes te gebruiken met betrekking tot luchtdichtheid, hetgeen leidde tot het stellen van de volgende onderzoeksvraag: zijn geluidsmetingen voldoende nauwkeurig om de luchtdichtheid van een wand te schatten? Alvorens deze onderzoeksvraag te beantwoorden door het uitvoeren van een tweeledig experiment in het derde en laatste deel van deze masterproef, werden er twee sub-vragen gesteld die respectievelijk in het eerste en het tweede deel werden behandeld.

Antwoord op sub-vraag A. In het eerste deel van deze masterproef hebben we in de eerste plaats onderzocht welke aspecten een belangrijke rol spelen bij de luchtdichtheid van een gebouw, hetgeen niet verward mag worden met *natuurlijke* luchtinfiltratie. Hieruit is gebleken dat luchtdicht bouwen belangrijk is om een gebouw te verkrijgen met een goede energieprestatie, omwille van het effect dat deze parameter heeft op het energiepeil, maar dat een goede luchtdichtheid evenzeer doorslaggevend is voor het bereiken van een bepaald comfortniveau.

Daarnaast hebben we ondervonden dat het verkrijgen van een luchtdicht gebouw een proces is dat gedurende de hele bouwfase belangrijk is, waardoor zowel de architect als de uitvoerder en de werklieden een significant aandeel hebben in het uiteindelijke resultaat. Hoewel er in de literatuur blijk is van een aantal geometrische en kwalitatieve parameters die dit proces beïnvloeden, is de meest cruciale parameter het vakmanschap tijdens de werken, hetgeen impliceert dat de menselijke factor een onmiskenbaar element is in het verkrijgen een luchtdicht gebouw. Hierdoor is het vrijwel meteen duidelijk waarom voorspellende modellen met betrekking tot luchtdichtheid geen succes hebben; de menselijke factor is namelijk moeilijk in rekening te brengen.

We concludeerden dat een akoestisch lek en luchtlek vaak hetzelfde zijn, vermits een dergelijk lek zowel geluid als lucht doorlaat. Hierdoor is het mogelijk om de oppervlakte van een opening uit te drukken met akoestische grootheden en alzo een analytisch verband te bekomen tussen deze bouwfysische fenomenen door deze lekoppervlakte in te vullen in de stromingsvergelijking van een stroming door een opening. Hoewel er een aantal akoestische technieken bestaan die kunnen gebruikt worden binnen de context van luchtdichtheid, hebben deze hun weg naar het grote publiek echter nog niet gevonden.

Antwoord op sub-vraag B. In het tweede deel van deze masterproef werd een casestudy uitgevoerd op een recent project – met Belemco als uitvoerder – om te onderzoeken hoe er in de praktijk wordt omgegaan met het thema luchtdichtheid. Hierbij vestigden we niet enkel de aandacht op de regelgeving rond luchtdichtheid, maar evenzeer in welke mate de praktische toepassing van luchtdichtheidsmaatregelen overeenkomt met de theoretische aanbevelingen door het WTCB.

In de praxis wordt de luchtdichtheidseis in Vlaanderen, behalve bij passiefbouw, opgelegd door de architect of de bouwheer – bij het ontbreken van concrete regelgeving inzake dit onderwerp in België, met uitzondering van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest – in functie van het behalen van een bepaald energiepeil. Om de opgelegde luchtdichtheidseis te behalen, worden er een aantal gangbare luchtdichtheidsmaatregelen toegepast. Bij het vergelijken van de praktische toepassing van deze

maatregelen met de theoretische aanbevelingen, wordt er geconstateerd dat de praktijk over het algemeen overeenkomt met de theorie, doch niet altijd. Het is namelijk mogelijk dat er wordt afgeweken van de theoretische voorschriften in functie van het ontwerp, daar het niet altijd mogelijk is om alle aanbevelingen tot op de letter te volgen.

Daarnaast kan het voorkomen dat de vooropgestelde luchtdichtheidseis niet wordt bereikt, ondanks de genomen maatregelen. In dat geval wordt er een afweging gemaakt tussen het verder aanwenden van ingrepen om alsnog de luchtdichtheid te verbeteren en zo te voldoen aan de eis, of de vooropgestelde eis bij te stellen naar de behaalde eis. In die zin blijkt het dat de vooropgestelde eis inderdaad een richtwaarde is, maar dat deze niet als bindend wordt aanzien, daar de extra luchtdichtheidsmaatregelen om toch aan de eis te voldoen soms een grotere kost met zich meebrengen dan het niet verbeteren van de energieprestatie.

Antwoord op de hoofdonderzoeksvraag. Om een antwoord te kunnen formuleren op de hoofdonderzoeksvraag werd een tweeledig experiment uitgevoerd, bestaande uit pressuratietesten met een BlowerDoortoestel en geluidsmetingen met zowel professionele apparatuur als een mobiele applicatie. Het werd echter al snel duidelijk dat de metingen met de mobiele applicatie niet bruikbaar waren voor het verdere experiment.

De resultaten van het tweeledig experiment, dat wilt zeggen de resultaten van de pressuratietesten en de resultaten van de geluidsmetingen met de professionele apparatuur, hebben aanleiding gegeven tot het opstellen van twee akoestische schattingsmethodes die de luchtdichtheid van een façade kunnen schatten, hetzij op een andere manier. De eerste akoestische schattingsmethode (experimentele methode) maakt gebruik van de fysische correlatie tussen het ventilatievoud en het verschil in geluidrukniveau tussen de ontvangstkamer en de zendkamer, waarbij er zeer nauwkeurige resultaten werden bekomen bij het vergelijken van de geschatte waarden ten opzichte van de gemeten waarden.

De tweede akoestische schattingsmethode (theoretische methode) is gebaseerd op het verschil tussen de ‘schijnbare’ geluidverzwakkingsindex en de theoretische geluidverzwakkingsindex van de façade, waarbij we veronderstellen dat dit verschil hoofdzakelijk gegenereerd wordt door luchtlekken. Hierdoor is het mogelijk om de gecumuleerde lekoppervlakte te bepalen, hetgeen resulteert in een geschat debiet en vervolgens een geschat ventilatievoud. De waarden die werden bekomen met deze methode wijken echter behoorlijk, maar toch aanvaardbaar, af van de gemeten waarden in het merendeel van de situaties.

Slotbeschouwing. We besluiten dat geluidsmetingen waarbij er gebruik wordt gemaakt van professionele apparatuur inderdaad voldoende nauwkeurig zijn om de luchtdichtheid van een façade te schatten, hetgeen duidelijk blijkt uit de zeer precieze resultaten bekomen met de experimentele schattingsmethode. Dit is evenwel niet het geval bij de geluidsmetingen uitgevoerd met de mobiele applicatie die om die reden niet verder zijn gebruikt in dit onderzoek. Hoewel de waarden bekomen met de theoretische schattingsmethode in het merendeel van de beschouwde situaties behoorlijk, maar aanvaardbaar, afwijken van de gemeten waarden, zijn deze afwijkingen niet te wijten aan de onnauwkeurigheid van de uitgevoerde geluidsmetingen, maar temeer aan de procedure om een gewogen waarde van de geluidverzwakkingsindex te bekomen en mogelijks de vele aannames uit de literatuur waarop deze methode steunt.

BIBLIOGRAFIE

- [1] O. Hassan, „An alternative method for evaluating the air tightness of building components,” *Building and Environment*, nr. 67, pp. 82-86, 2013.
- [2] V. Iordache en C. Tiberiu, „Acoustic approach for building air permeability estimation,” *Building and Environment*, nr. 57, pp. 18-27, 2012.
- [3] „Vlaanderen is energie,” Vlaamse Overheid, [Online]. Available: <http://www.energiesparen.be/epb/welkeisen>. [Geopend 29 September 2017].
- [4] „Vlaanderen is energie,” Vlaamse Overheid, [Online]. Available: <http://www.energiesparen.be/epb/prof/luchtdichtheid>. [Geopend 30 September 2017].
- [5] „wtcb.be,” Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), 1 Januari 2012. [Online]. Available: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact33&art=503&lang=nl>. [Geopend 29 September 2017].
- [6] [Online]. Available: <http://www.energiesparen.be/epb/prof/luchtdichtheid>. [Geopend 2017].
- [7] „Vlaanderen is energie,” Vlaamse Overheid, [Online]. Available: <http://www.energiesparen.be/EPB-pedia/E-peil>. [Geopend 19 November 2018].
- [8] „Vlaanderen is Energie,” Vlaamse Overheid, [Online]. Available: <http://www.energiesparen.be/bouwen-en-verbouwen/epb-pedia/gebouw/luchtdichtheid/impact-op-het-resultaat>. [Geopend 20 November 2017].
- [9] „mijnEPB.be,” Januari 2016. [Online]. Available: <https://www.mijnepb.be/s-peil-schil-peil/>. [Geopend 14 Maart 2018].
- [10] „Vlaanderen is energie,” Vlaamse Overheid, [Online]. Available: <http://www.energiesparen.be/EPB-pedia/S-peil>. [Geopend 14 Maart 2018].
- [11] K. M. & E. FOD Economie, „STS P 71-3 - Luchtdichtheid van gebouwen - Luchtdichtheidstest,” Geert de Poorter, Brussel, 2014.
- [12] „Eurabo,” Eurabo, 2017. [Online]. Available: <http://www.eurabo.be/nl/lexicon/detail/n50-waarde/566>. [Geopend 22 December 2017].
- [13] Vlaamse Overheid, „Bijlage VI - Bijkomende specificaties voor de meting van de luchtdichtheid van gebouwen in het kader van de EPB-regelgeving,” 2007.

- [14] T. Vanhove, „Habitos.be,” 19 Juli 2012. [Online]. Available: <http://www.habitos.be/nl/bouwen/luchtdicht-ontwerpen-8189/>. [Geopend 6 November 2017].
- [15] P. Wouters, X. Loncour, L. Vandaele, A. Janssens, M. De Paepe, S. Roels, R. Honoré en R. Carrié, „Onderzoek naar een draagvlak voor het invoeren van minimale luchtdichtheidseisen,” VEA, 2012.
- [16] H. R. „Energiebewust Ontwerpen,” 27 Oktober 2014. [Online]. Available: <http://www.energiebewustontwerpen.be/artikel/833/luchtdicht-bouwen-een-juridische-benadering/>. [Geopend 30 Oktober 2017].
- [17] „Technische voorlichting: Luchtdichtheid van gebouwen,” Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), Brussel, 2015.
- [18] J. Logue, M. Sherman, I. Walker en B. Singer, „Energy impacts of envelope tightening and mechanical ventilation for the U.S. residential sector,” *Energie Build*, vol. 65, pp. 281-91, 2013.
- [19] „wtcb.be,” Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), 1 Januari 2012. [Online]. Available: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact33&art=503>. [Geopend 11 November 2017].
- [20] „wtcb.be,” September 2010. [Online]. Available: https://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?dtype=agenda&doc=Luchtdicht_Bouwen_The_maaavond_FABA_sept_okt_2010.pdf. [Geopend 20 Februari 2018].
- [21] T.-O. Relander, *Airtightness of wood-frame houses*, Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2011.
- [22] M. Sherman en W. Chan, *Building airtightness: Research and practice*, Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [23] C. Bramiana, A. Entrop en J. Halman, *Relationships between building characteristics and airtightness of Dutch dwellings*, Enschede: University of Twente, 2016.
- [24] M. Sherman, *Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators*, Berkeley: University of California, 1986.
- [25] J. Kronvall, *Air Flows In Building Components*, Lund: Lund Institute of Technology, 1980.
- [26] M. Prignon en G. Van Moeseke, „Factors influencing airtightness and airtightness predictive models: A literature review,” *ScienceDirect*, 24 April 2016.

- [27] N. Van Den Bossche, Luchtdichtheid: Experimenteel onderzoek naar schattingsmethodes bij woningen, Gent, Oost-Vlaanderen: UGent, 2005.
- [28] US Department of Energy, Air Leakage Guide, Virginia: US Government, 2011.
- [29] W. Notenbomer, Natuurlijke ventilatie in de faculteit Bouwkunde, Delft, Zuid-Holland: TUDelft, 2009.
- [30] M. Orme, M. W. Liddament en A. Wilson, „Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations,” International Energy Agency, 1998.
- [31] „Vlaanderen is energie,” VEA, [Online]. Available: <https://www.energiesparen.be/bouwen-en-verbouwen/epb-pedia/gebouw/geometrie/volume-en-oppervlaktes/beschermd-volume>. [Geopend 10 Maart 2018].
- [32] „Luchtdichtheid van gebouwen,” WTCB, Brussel, 2015.
- [33] J. Bracke, „bouw-energie,” 15 Mei 2012. [Online]. Available: <https://www.bouw-energie.be/nl/blog/post/compactheid>. [Geopend 19 Maart 2018].
- [34] „Vlaanderen is energie,” VEA, [Online]. Available: <https://www.energiesparen.be/EPB-pedia/gebouw/geometrie/vormefficiëntie>. [Geopend 4 April 2018].
- [35] „Luchtdicht bouwen: aandachtspunten in de ruwbouwfase,” Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), 2012.
- [36] J. Vinha, E. Manelius, M. Korpi, K. Salminen, J. Kurnitski, M. Kiviste en A. Laukkarinen, Airtightness of residential buildings in Finland, Tampere: Tampere University of Technology, 2015.
- [37] M. Colijn, A. Entrop en M. Toxopeus, „Evaluating the effect of improved workmanship quality on the airtightness of Dutch detached houses,” *Energy Procedia*, nr. 132, pp. 843-848, 2017.
- [38] F. Ambrosio Alfano, M. Dell Isola, G. Ficco en F. Tassini, Experimental analysis of air tightness in Mediterranean buildings using the fan pressurization method, Fisciano: University of Salerno, 2012.
- [39] „COMSOL,” 6 Juli 2017. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>. [Geopend 11 Februari 2018].
- [40] Neutrium, „Neutrium,” 11 februari 2015. [Online]. Available: https://neutrium.net/fluid_flow/discharge-coefficient-for-nozzles-and-orifices/. [Geopend 2 Maart 2018].

- [41] „Eurabo,” [Online]. Available: <http://www.eurabo.be/nl/lexicon/detail/n50-waarde/566>. [Geopend 19 Maart 2018].
- [42] „EPC-platform.be,” 2010. [Online]. Available: <http://www.epc-platform.be/energiesparen/blowerdoortest-luchtdichtheidsmeting/>. [Geopend 19 December 2017].
- [43] V. i. energie, „Luchtdichtheidsmeting: fouten bij rapportering,” VEA, 2016.
- [44] V. i. energie, „Luchtdichtheidstest: te meten zone,” VEA, 2014.
- [45] „Build Test Solutions,” Build Test Solutions, 2017. [Online]. Available: <http://buildtestsolutions.com/pulse/>. [Geopend 19 December 2017].
- [46] E. Cooper, X. Zheng, C. Wood, M. Gillot, D. Tetlow, S. Riffat en L. De Simon, „Field trialling of a pulse airtightness tester in a range of UK homes,” *International Journal of Ventilation*, p. 2, 2016.
- [47] T. Patan, J. P. Miller, C. Mitsingas en T. A. Newel, „Comparison Of Blower Door And Tracer Gas Testing Methods For Determination Of Air Infiltration Rates Through Building Envelopes At Normal Operating Conditions,” ASME, Washington, 2011.
- [48] M. Labat, M. Woloszyn, G. Garnier en J. J. Roux, „Assessment of the air change rate of airtight buildings under natural conditions using the tracer gas technique. Comparison with numerical modelling,” *Elsevier*, pp. 37-44, 2013.
- [49] D. Laussmann en D. Helm, „Air Change Measurements Using Tracer Gases: Methods and Results. Significance of air change for indoor air quality,” Berlin, 2011.
- [50] R. Mcleod, M. Jaggs, B. Cheeseman, A. Tilford en K. Mead, „Passivhaus primer: Airtightness Guide,” Passivhaus, Verenigd Koninkrijk.
- [51] I. Allard en T. Olofsson, „Methods for air tightness analysis for residential buildings in Nordic countries,” *Research Gate*, nr. 165, 2012.
- [52] „EPC waarde.be,” [Online]. Available: <https://www.epcwaarde.be/thermografie/>. [Geopend 23 Februari 2018].
- [53] M. I. Montoya, E. Pastor, F. R. Carrié, G. Guyot en E. Planas, „Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions,” *Building and Environment*, nr. 45, pp. 1458-1469, 2010.
- [54] „wtcb.be,” Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), 2012. [Online]. Available: <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact33&art=510>. [Geopend 11 Maart 2018].

- [55] W. Pan, Relationships between air-tightness and its influencing factors of post-2006 new-build dwellings in the UK, Plymouth: University of Plymouth, 2010.
- [56] M. I. Montoya, P. Elsa, R. F. Carrié, G. Guyot en E. Planas, „Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions,” Elsevier, Catalonië, 2009.
- [57] J. Langmans, Interviewee, *Tussentijdse evaluatie*. [Interview]. 28 februari 2018.
- [58] J. Laverge, M. Delghust, N. Van Den Bossche en A. Janssens, „Airtightness Assessment of Single Family Houses in Belgium,” *International Journal of Ventilation*, vol. 12, nr. 4, p. 381, 2014.
- [59] M. Sherman, J. Joh en W. Chan, Analysis of air leakage measurements of US houses, Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013.
- [60] R. Urquhart, R. Richman en G. Finch, „The effect of an enclosure retrofit on air leakage rates for a multi-unit residential case-study building,” *Energy and Buildings*, nr. 86, pp. 35-44, 2015.
- [61] S. Kunkel, E. Kontonasiou, A. Arcipowska, F. Mariottini en B. Atanasiu, „INDOOR AIR QUALITY, THERMAL COMFORT AND DAYLIGHT: analysis of residential building regulations in eight EU member states,” BPIE, 2015.
- [62] C. Younes en C. Shdid, „A methodology for 3-D multiphysics (CFD) simulation of air leakage in building envelopes,” Oktober 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.050>. [Geopend 11 November 2017].
- [63] C.-L. Lin, M. Tawhai, G. McLennan en E. Hoffman, „Computational fluid dynamics,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 28, nr. 3, 19 Mei 2009.
- [64] B.-n. Jiang, The Least-Squares Finite Element Method: Theory and Applications in Computational Fluid Dynamics and Electromagnetics, Cleveland: Springer, 1998.
- [65] A. Bakker, Introduction to CFD, Dartmouth: Dartmouth College, 2006.
- [66] C. Younes, C. Shdid en G. Bitsuamlak, „Air infiltration through building envelopes,” *Building Physics*, 2011.
- [67] A.S. Committee, ASHRAE Handbook: Fundamentals, ASHRAE.
- [68] M. Orme, M. Liddament en A. Wilson, Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations, The Air Infiltration and Ventilation Centre, 1998.
- [69] D. Dickerhoff, D. Grimsrud en R. Lipschutz, „Component leakage testing in residential buildings,” *Proceedings of the American Council for an Energy-Efficient Economy*, 1982.

- [70] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Logaritmische akoestische grootheden: geluidniveaus,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Limburg, 2011, pp. 31-33.
- [71] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Weging van het geluid voor inbegripname van geluidwaarneming,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Limburg, 2011, pp. 42-44.
- [72] „Wikipedia: De vrije encyclopedie,” [Online]. Available: https://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:FletcherMunson_ELC.svg. [Geopend 8 Maart 2018].
- [73] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Geluidabsorptie,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Limburg, 2011, pp. 46-50.
- [74] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Luchtgeluidisolatie,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Limburg, 2011, pp. 71-90.
- [75] B. Ingelaere, „Geluidsisolatie bij lichte wanden,” WTCB, 2011.
- [76] B. Ingelaere, L. De Geetere en M. Géhu, „De invloed van bouwdetails op de akoestische isolatie van gebouwen,” WTCB, 2015.
- [77] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Luchtgeluidisolatie,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Limburg, 2011, p. 92.
- [78] O. Hassan, in *Building acoustics and vibrations, theory and practice*, Zweden, 2009.
- [79] O. Hassan, „An alternative method for evaluating the air tightness of building components,” *Building and Environment*, vol. 67, pp. 82-86, 8 mei 2013.
- [80] G. Raman, M. Prakash, R. Ramachandran, P. Hirenkumar en K. Chelliah, „Berlin Beamforming Conference,” in *REMOTE DETECTION OF BUILDING AIR INFILTRATION USING A COMPACT MICROPHONE ARRAY AND ADVANCED BEAMFORMING METHODS*, Illinois, 2014.
- [81] S. Hayek, in *Handbook of signal processing in acoustics*, New York, Springer, 2008.
- [82] „mijnEPB.be,” Augustus 2015. [Online]. Available: <http://www.mijnepb.be/de-2-uitzonderingsregel/>. [Geopend 13 Maart 2018].
- [83] „Binnenbepleisteringen en luchtdichtheid 2013/04.06,” WTCB.be, [Online]. Available: <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact40&art=612>. [Geopend 5 Mei 2018].

- [84] „Belemco,” Belemco NV, 2015. [Online]. Available: www.belemco.be. [Geopend 29 September 2017].
- [85] „Wikipedia: De vrije encyclopedie,” [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Polyurethaan>. [Geopend 7 April 2018].
- [86] „Wikipedia: De vrije encyclopedie,” [Online]. Available: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Mantelbuis>. [Geopend 8 April 2018].
- [87] „De ventilatie van technische kokers en liftschachten beheersen 2012/01.02,” WTCB, [Online]. Available: <https://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact33&art=504>. [Geopend 8 april 2018].
- [88] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Geluidabsorptie,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Hasselt, 2011, pp. 69-70.
- [89] Akustik, „Akustik,” [Online]. Available: www.akustik.ua. [Geopend 18 April 2018].
- [90] D. Wuyts, „Akoestiek: ontwerp en realisatie,” WTCB, Brussel.
- [91] G. Georgiev, „Body Surface Area Calculator,” [Online]. Available: www.gigacalculator.com. [Geopend 18 April 2018].
- [92] J. Negreira en D. Bard, „Sound Insulation,” Lund University, Lund, 2015.
- [93] H. He, „Evaluation Of Mechanical And Hydrological Properties Of pervious Concrete For Use In Sidewalks In New Jersey,” Rutgers University, New Brunswick, 2017.
- [94] T. Irvine, „Damping Properties of Materials Revision C,” 2004.
- [95] NBVG, „Gebrand gips en Stukadoorgips,” NBVG.
- [96] A. Warnock, „Ecohome,” Ecohome, 17 Januari 2014. [Online]. Available: <https://www.ecohome.net/guides/2277/controlling-sound-transmission-in-buildings/>. [Geopend 26 April 2018].
- [97] B. Ingelaere, M. Knapen en P. Schevenels, „Geluidsgolven in tijds- en frequentiedomein,” in *Bouwfysica 3*, Hasselt, Provinciale Hogeschool Hasselt, 2011, p. 17.
- [98] D. A. Bies en C. H. Hansen, „Transmission Loss,” in *ENGINEERING NOISE CONTROL: Theory and Practice*, Adelaide, Spon Press, 2003, pp. 363-364.
- [99] R. Toupek, T. Plachy, M. Polak en P. Tesarek, „Monitoring of Mechanical Properties of Gypsum Using the Impulse Excitation Method,” Czech Technical University, Prague.

- [100] B. Ingelaere, „Geluidsisolatie van vensters,” WTCB, 1996.
- [101] K. Minarovicova en L. Antalova, „Evaluation Of The Acoustic Properties Of Homogenous And Composite Elements Applied To Partition Walls And Doors,” *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. 3, pp. 36-39, 2003.
- [102] A. Cops en D. Soubrier, „Sound Transmission Loss of Glass and Window Laboratories with Different Room Design,” *Applied Acoustics*, nr. 25, pp. 269-280, 1988.
- [103] W. Bruyninckx, Interviewee, *Geluidsmetingen in de praktijk*. [Interview]. 6 April 2018.
- [104] Acoustical Surfaces Inc., „Flanking Transmission,” Acoustical Surfaces Inc., [Online]. Available:
https://www.acousticalsurfaces.com/soundproofing_tips/html/Noise_Transmission.htm.
[Geopend 8 Mei 2018].
- [105] S. Dwornik, „What is flanking sound?,” Hush City Soundproofing, 5 Oktober 2017. [Online]. Available: <https://hushcitysp.com/2017/10/05/what-is-flanking-sound/>. [Geopend 5 mei 2018].
- [106] W. Bracke, „Gebouwluchtdichtheid: herhaalbaarheid en reproduceerbaarheid, seizoensvariatie & duurzaamheid,” Faculteit ingenieurswetenschappen en Architectuur, Gent, 2013.

BIJLAGES

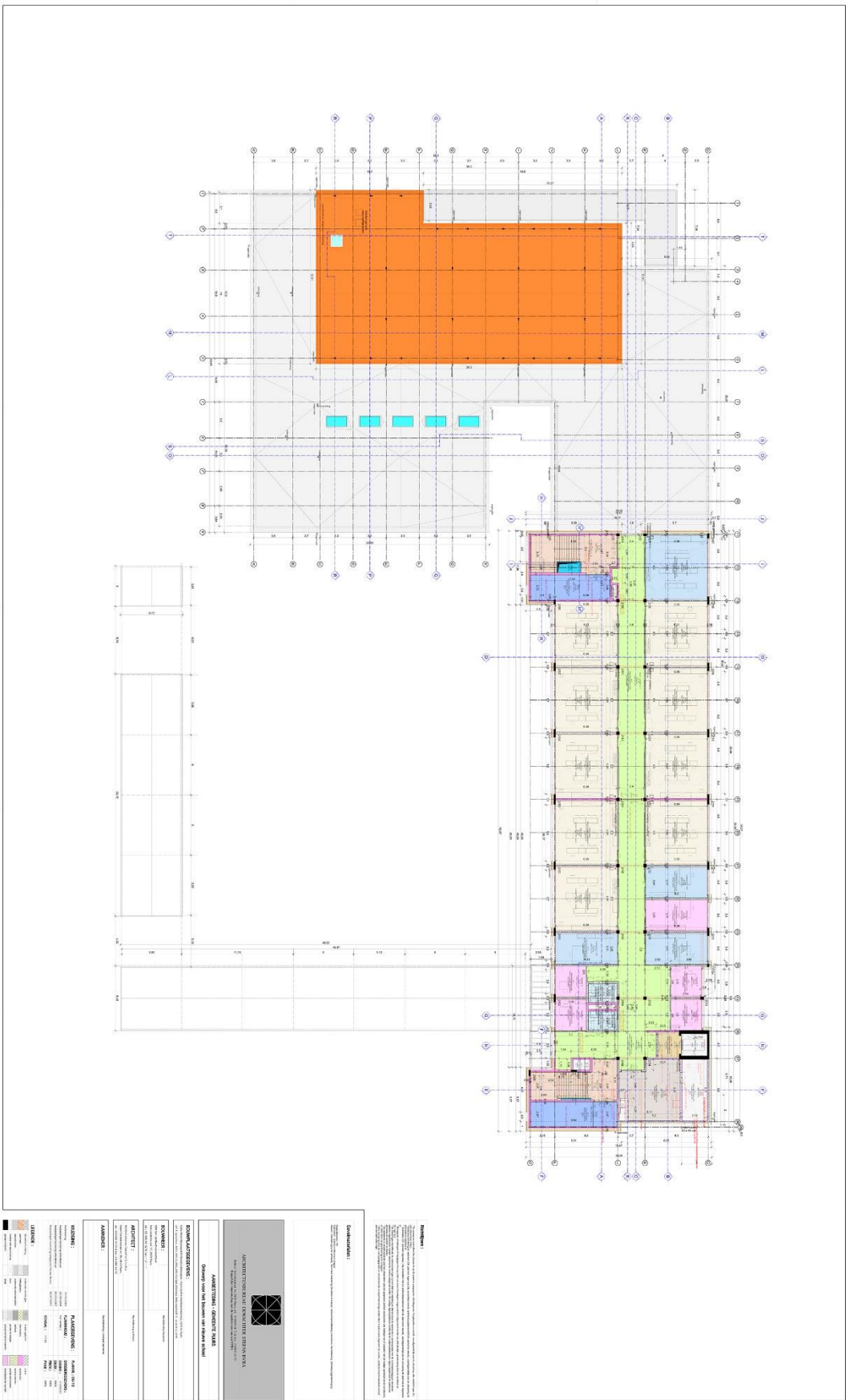
BIJLAGE A: POSITIE TECHNISCHE INSTALLATIES

	Technische installaties/Ruimten	Positie ten opzichte van het beschermde volume	
Specifieke ruimten – Ventilatie-eisen	Garages	Buiten het beschermde volume	
	Technische kokers	Voor gebouwen die vallen onder de brandreglementering dient men de technische kokers buiten het beschermde volume te plaatsen of over te gaan tot een compartimentering	
	Liftschachten	Buiten het beschermde volume of voorzien van een ventilatiesysteem met gemotoriseerde kleppen	
	Gasmeter en drukreducerpost voor aardgas	Buiten het beschermde volume	
	Gasleidingen	Bepaalde leiding- en aansluitingstypes kunnen in niet-geventileerde ruimten aangebracht worden	
	Technische installaties/Ruimten	Beoordeling van de oplossing	Aanbevolen positie ten opzichte van het beschermde volume
Verbrandingstoestellen – Eisen op het vlak van ventilatie, verbrandingsluchttoevoer en verbrandingsgasafvoer	Gedecentraliseerde verwarmingstoestellen met een open verbrandingskring zonder afvoerkanaal (type A)	Ten stelligste afgeraden	Gedecentraliseerde verwarmingstoestellen worden binnen het beschermde volume geplaatst
	Gedecentraliseerde verwarmingstoestellen met een open verbrandingskring met afvoerkanaal (type B)	Afgeraden	
	Gedecentraliseerde verwarmingstoestellen met een gesloten verbrandingskring (type C)	Aanbevolen	
	Centrale-verwarmingstoestellen met een open verbrandingskring met afvoerkanaal (type B)	Afgeraden	De invloed van de noodzakelijke openingen kan beoordeeld worden. De toestellen kunnen buiten het beschermde volume geplaatst worden (en desgevallend beschermd tegen vorst)
	Centrale-verwarmingstoestellen met een gesloten verbrandingskring (type C), P < 70 kW	Aanbevolen	Binnen het beschermde volume
	Centrale-verwarmingstoestellen met een gesloten verbrandingskring (type C), P ≥ 70 kW	Aanbevolen	De invloed van de noodzakelijke openingen kan beoordeeld worden. De toestellen kunnen buiten het beschermde volume geplaatst worden (en desgevallend beschermd tegen vorst)
	Sanitair-warmwaterproductietoestellen met een open verbrandingskring zonder afvoerkanaal (type A1as)	Ten stelligste afgeraden	-

	Sanitair-warmwaterproductietoestellen met een open verbrandingskring met afvoerkanaal (type B)	Afgeraden	De invloed van de noodzakelijke openingen kan beoordeeld worden. De toestellen kunnen buiten het beschermde volume geplaatst worden (en desgevallend beschermd tegen vorst)
	Sanitair-warmwaterproductietoestellen met een gesloten verbrandingskring (type C), $P < 70$ kW	Aanbevolen	Binnen het beschermde volume
	Sanitair-warmwaterproductietoestellen met een gesloten verbrandingskring (type C), $P \geq 70$ kW (bv. stookketel, aangesloten op een opslagtank of een warmtewisselaar)	Aanbevolen	De invloed van de noodzakelijke openingen kan beoordeeld worden. De toestellen kunnen buiten het beschermde volume geplaatst worden (en desgevallend beschermd tegen vorst)
	Andere gastoestellen zonder afvoerkanaal (kookfornuizen ...), $P > 10$ kW	Afgeraden	-
	Andere gastoestellen zonder afvoerkanaal (kookfornuizen, ovens, wasmachines of droogautomaten), $P \leq 10$ kW	Getolereerd	In een ruimte die uitgerust is met een ventilatiesysteem door extractie
	Technische installaties/Ruimten	Aanbevolen positie ten opzichte van het beschermde volume	
Andere technische installaties	Elektrische verdeelkasten	Binnen het beschermde volume. In principe is er slechts één enkele doorboring (voedingskabel) vereist	
	Stopcontacten, contactdozen voor de telecommunicatie	In het geval van metselwerk wanden dient men de stopcontacten en contactdozen bij voorkeur aan te brengen in de binnenmuren. Bij plaatsing op een muur die het beschermde volume afbakt, moeten de contactdozen volledig ondergedompeld worden in de pleisterlaag of dient men gebruik te maken van een luchtdichte contactdoos. In het geval van een houtskeletconstructie moeten de stopcontacten aangebracht worden in de technische voorzetwanden	
	Ventilatiegroepen en -kanalen	Bij balansventilatiesystemen zijn er slechts twee doorboringen vereist, waar ze zich ook bevinden. Bij voorkeur binnen het beschermde volume te plaatsen	
	Warmwaterverdeellicingen, verwarmingsleidingen en collectoren	Binnen het beschermde volume	
	Dampkappen	Men dient een systeem met een sluitklep of een dampkap met recirculatie te voorzien. Opteren voor een geschikte luchttoevoer	

Tabel 41: Positie technische installaties [17]

Verdieping 2



Legend

Color swatches	Legend description
...	...

Scale

1:500

0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50

Project Information

Project Name: ...

Client: ...

Architect: ...

Scale: 1:500

Date: ...

Sheet: ...

Notes: ...

BIJLAGE C: VERSLAG WERFBEZOEK INFILTR



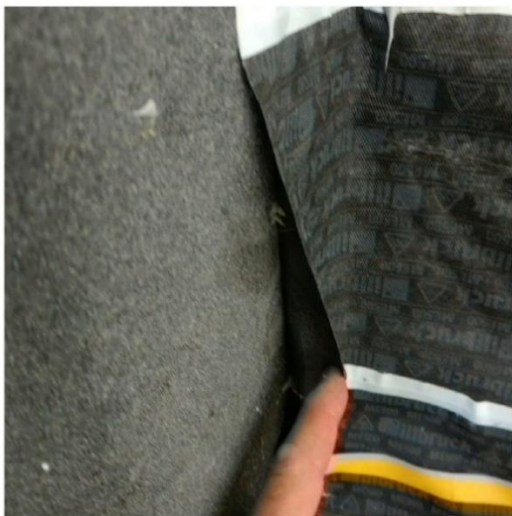
Linden, 03-07-2017

VERSLAG WERFBEZOEK

Klant: Belemeco nv
Datum: 26-06-17
Werk: SJABI Puurs
Verliesoppervlak: 5241 m²
**Doelstelling
Luchtdichtheid:** v50 <= 2 m³/h.m²
**Maximaal
toegelaten lekdebiet:** 10482 m³/h

Rondgang

Buitenschrijnwerk: ramen zijn goed tot zeer goed aangewerkt. Hier en daar kan de folie nog wat beter worden verkleefd:



Deuren: buitendeuren, maar ook de deuren naar de sporthal luchtdicht aanwerken. Onderaan bij voorkeur nog een Ytong plaatsen, die op zich luchtdicht wordt afgewerkt met bijvoorbeeld luchtdichte pasta. Deuren onderaan best voorzien van een luchtdichting (aansluitende dorpel of valdorpel).

Doorboringen schachten: best is altijd om de schachten horizontaal te compartimenteren, zodat er geen bovenverluchting nodig is. Indien er toch wordt gekozen voor een bovenverluchting, moet er voor gezorgd worden dat de wanden luchtdicht worden afgewerkt. Indien gekozen wordt om dit met een pasta te doen, moet het metselwerk vol worden uitgevoerd. Luchtdichte pasta's hebben een gelimiteerde vulcapaciteit. Alle doorboringen moeten luchtdicht worden aangewerkt. Vooral opletten met

Diensten Infiltr®

Luchtdichtheidstesten

Thermografie

A-wert meting

Luchtdichtheid

Opleidingen

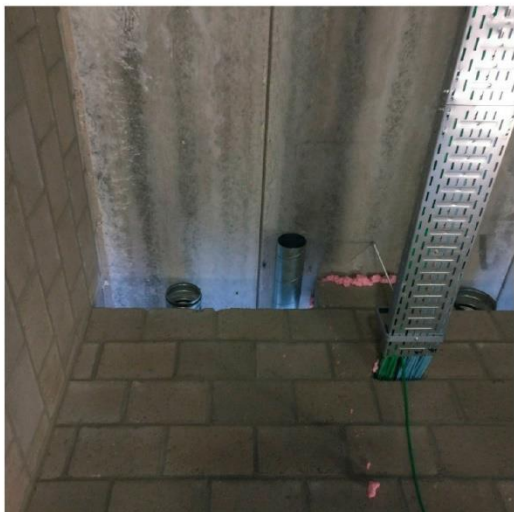
Training



Link-x bvba
Houwaartstraat 84
B-3210 Linden
BTW 0862 587 148

1

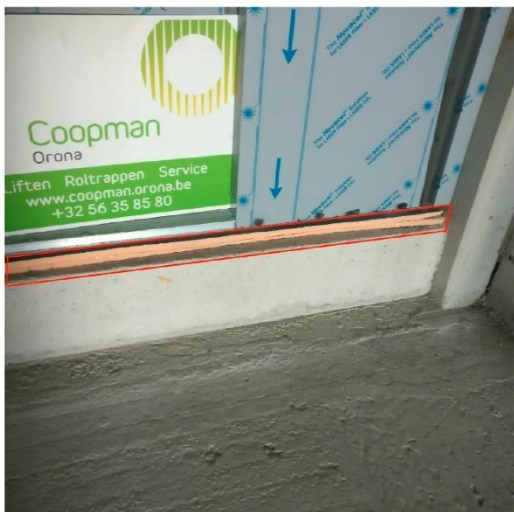
buizen die tot tegen zoldering of vloer lopen. Best met PU schuim rondom dichten en afwerken met een luchtdichte pasta.



Ook doorboringen met kabelgoten nakijken bovenaan.

Deuren/luiken in schacht: Indien de schacht wordt verlucht, er voor zorgen dat de luiken(deuren) maximaal 1 m² zijn en dat ze met een gereedschap open te maken zijn. (geen gewoon slot met sleutel)

Liftdeur: Indien de liftschacht niet voorzien wordt van een klep (BlueKit), moet de liftkoker ook luchtdicht worden afgewerkt. De deuren zijn dan verantwoordelijk voor het grootste lek, maar nog altijd –in jullie geval- een paar honderden m³/h minder dan het lekdebiët veroorzaakt door de schachtverluchting.



Diensten Infiltror®

Luchtdichtheidstesten

Thermografie

A-wert meting

Luchtdichtheid

Opleidingen

Training

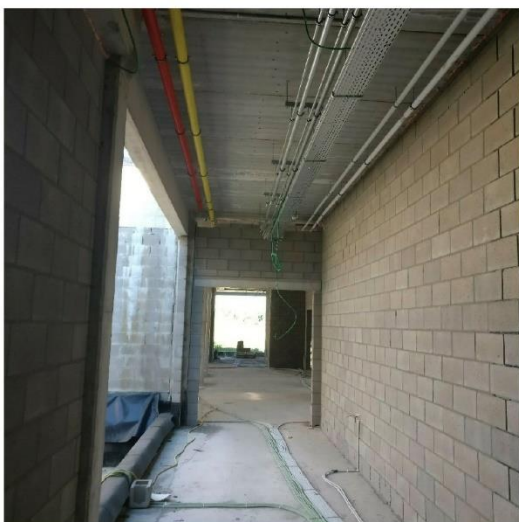
2

INFILTROR
THERMOGRAPHIC AND BLOWERDOOR TESTING

Link-x bvba
Houwaartstraat 84
B-3210 Linden
BTW 0862 587 148

Tussentijdse test

Indien geopteerd wordt voor een tussentijdse test, moeten de openingen in de buitenschil van het te testen volume luchtdicht worden aangewerkt. Liefst met bijvoorbeeld het definitieve schrijnwerk of beplating. Indien dit met een tijdelijke afdichting wordt uitgevoerd, moet die luchtdicht worden aangewerkt! Zie foto: hier komt een deur met afdichting bovenaan.



Opmerking: het heeft geen zin de bewuste (verplichte) openingen te dichten. Schachtverluchtingen mogen wel worden dichtgezet, omdat deze later via de schacht zelf worden afgesloten.

Verplichte Bewuste Openingen

Indien we de minimale en verplichte openingen in rekening brengen, komen we uit op een lekdebiet van ongeveer 16320 m³

	minimale vereiste verluchting (in m ³)	Verwacht lekdebiet (in m ³ /h)
Opening liftschacht	0.066	1320
Bovenverluchting middenspanningslokaal gelijkvloers:	0.3	6000
Onderverluchting middenspanningslokaal gelijkvloers:	0.25	5000
Bovenverluchting middenspanningslokaal +2	0.05	1000
Onderverluchting middenspanningslokaal +2	0.15	3000
Totaal	0.816	16320
Maximaal toegelaten lekdebiet		10482
	verschil	-5838

Daar tegenover staat dat de luchtdichtheidseis van $v50 \leq 2 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ bepaalt dat het maximale lekdebiet 10482 m³/h mag bedragen.

Opmerking: dit is een theoretische berekening aan de hand van de minimale vereisten. In de praktijk zal men dikwijls grotere openingen hebben.

De vooropgestelde luchtdichtheidseis is met de huidige opzet niet haalbaar.

Diensten Infiltr®

Luchtdichtheidstesten

Thermografie

A-wert meting

Luchtdichtheid

Opleidingen

Training



Link-x bvba
Houwaartstraat 84
B-3210 Linden
BTW 0862 587 148

Aanbevelingen

Gezien de gestelde luchtdichtheidseis niet haalbaar is, moet er gekeken worden naar mogelijke alternatieven in functie van het beoogde E-peil.

1. Bijstellen van de luchtdichtheidseis: indien de E-peil berekening het toelaat is dit de meest economische oplossing.

Indien we de gestelde luchtdichtheidseis toepassen op het gebouw, exclusief de middenspanningslokalen, zullen we bij een $v_{50} \leq 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ ongeveer 10000 m^3/h mogen verliezen (verliesoppervlak wordt iets kleiner omdat het verliesoppervlak middenspanningslokalen moet worden afgetrokken), wat dan resulteert in een totaal lekdebiet van ongeveer 31000 m^3/h of een bijgestelde luchtdichtheidseis van **$v_{50} \leq 5 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$**

2. Aanpassen van het te meten volume: indien we de middenspanningslokalen uit het beschermd volume halen, kunnen we de overgebleven ruimte testen. De overgang van de overgebleven ruimte met de middenspanningslokalen moet dan wel luchtdicht worden afgewerkt. De middenspanningslokalen uit het beschermd volume halen, impliceert wel dat de scheidingsmuren (en vloeren) moeten worden geïsoleerd (tenzij er kan geopteerd worden voor de 2% regel (de 2%-regel is een vrijstelling die geldt op de minimale isolatie-eisen op constructie-componenten van de buitenschil)

De luchtdichtheidseis van $v_{50} \leq 2 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ kan dan behouden worden

Auteur: David Lasseel



Diensten Infiltra®

Luchtdichtheidstesten

Thermografie

A-wert meting

Luchtdichtheid

Opleidingen

Training

INFILTRA®
THERMOGRAPHIC AND BLOWERDOOR TESTING

Link-x bvba
Houwaartstraat 84
B-3210 Linden
BTW 0862 587 148

BIJLAGE D: BLOWERDOORRAPPORT INFILTR



Link-x BVBA
Houwaartstraat 84
3210 Linden
BE 0862 587 148

Bank van Breda: BE50 6451 2018 1818

RAPPORT

Meting van de kwaliteit van de luchtdichtheid van een gebouw

Methode: Test methode A

Doelstelling van de meting: EPB aangifte

Opdrachtgever: Belemco NV
Locatie: Kleine Amer 20
B-2870 Puurs
Gewest: Vlaams Gewest
Project: Nieuwbouw

Normering *Bij de uitvoering volgens STS-P 71-3 en EN ISO 9972:2015. Bij de luchtdichtheidstest werden alle voorschriften in het kader van de EPB-regelgeving, zoals beschreven in bijlage VI van het ministerieel besluit van 2 april 2007 betreffende de vastlegging van de vorm en de inhoud van de EPB-aangifte en het model van het energieprestatiecertificaat bij de bouw, nageleefd.*

V50: de grote V50 is de gemiddelde waarde van gemeten lekdebiet (hoeveelheid m3 lucht) bij -50 Pa (onderdruk) en +50 Pa (overdruk)

V50 = 11082 m3/h

n50: de kleine n50 is de gemiddelde waarde van het aantal volumewissels per uur bij een drukverschil van -50 Pa (onderdruk) en +50 Pa (overdruk)

n50 = -

v50: de kleine v50 is de gemiddelde waarde van het gemeten lekdebiet per vierkante meter verliesoppervlakte van de buitenschil bij -50 Pa (onderdruk) en +50 Pa (overdruk)

v50 = 2.17 m3/hm2

Firma: Infiltr (Link-x BVBA)
Datum van de test: 27.03.2018
Techniker: David Lasseel

Datum rapport: 29.03.2018
Voor Infiltr: David Lasseel

VERSLAG

Gedetailleerde gegevens van de meeting en eventuele opmerkingen

Gegevens van het gebouw

Datum van de test: 27.03.2018

Bouwjaar van het gebouw: 2016-2017
Type gebouw: Nieuwbouw
Hoofdbestemming gebouw: Niet-residentieel gebouw - Onderwijs
Typologie van het gebouw: Halfopen bebouwing
Verliesoppervlak A_{test} : 5109 m²
Binnenvolume V_{int} : niet meegedeeld
Foutenmarge: +/- 3 %
Herkomst van de gegevens: Klant

Ventilatiesysteem: Systeem D
Verwarming: CV
Airconditioning: nvt

Gegevens opdrachtgever

Opdrachtgever: Belemco NV
Adres: Taunusweg 49
B-3740 Bilzen

Uitvoerder van de test

Firmanaam: Infiltr (Link-x BVBA)
Adres: Houwaartstraat 84
B-3210 Linden
BTW: BE 0862.587.148
Telefoon: +32 498 92 49 42
Email: info@infiltr.be
Website: www.infiltr.be

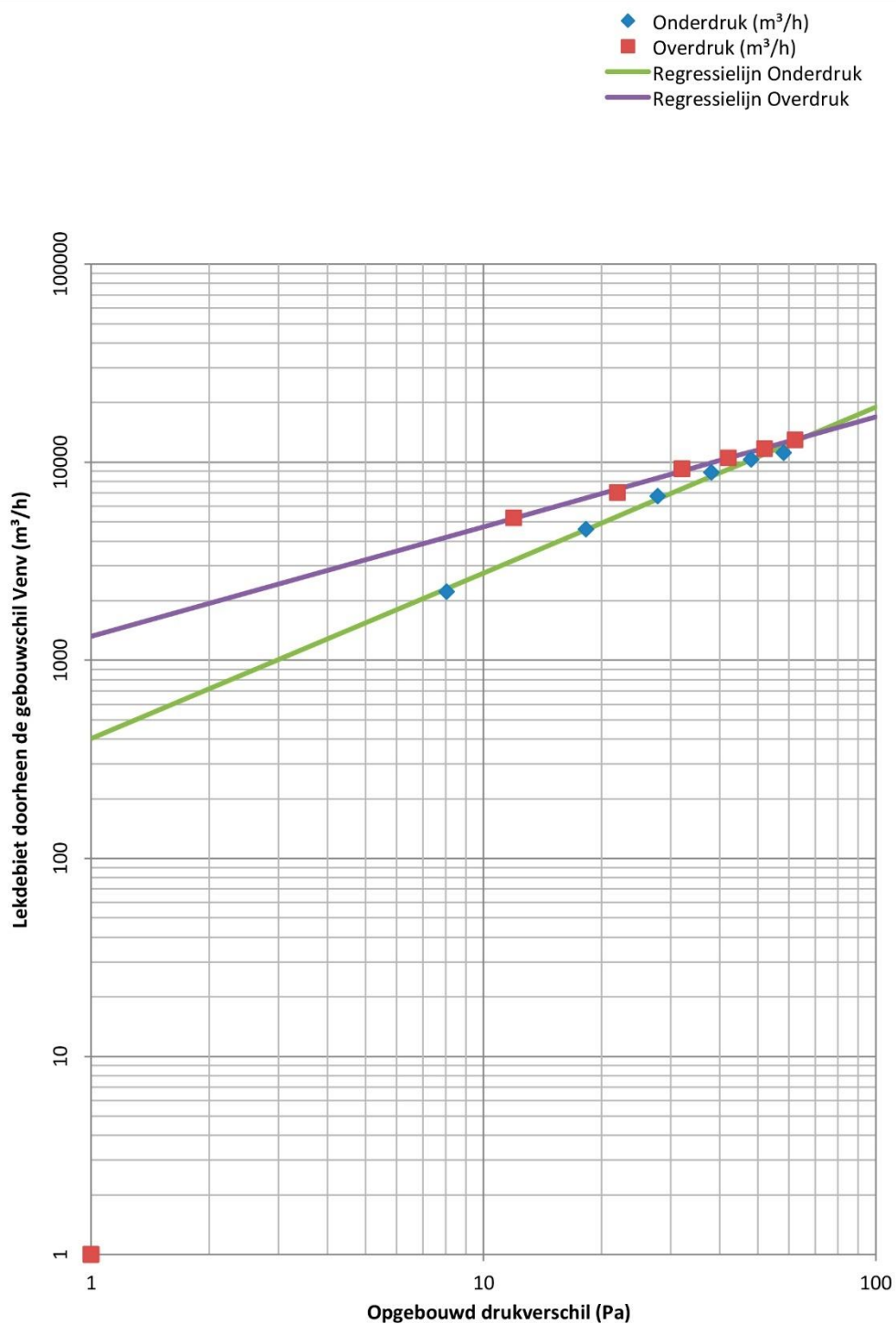
Gegevens Meetinstrument

Gebuchte test software: TECTITE Express v4.1.26.0
Ventilator(s): Mineapolis Blower Door 4
Serienummer(s): CE 3902 CE 3247
Plaats van de ventilator: In deur zonder afdichtingsvoegen, zonder onderdichtin

Manometer(s)	Calibratie datum	Uitgevoerd door
61089-107-700E.E	29/09/16	Blowerdoor
62741-107-700E.E	29/09/16	Blowerdoor

Thermometer: Rencforce Intrastat 90258040
Laatste calibratie thermometer: 18/10/16
Calibratie uitgevoerd door: Rencforce

Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting



Opmerkingen betreffende de meting en vastgestelde problemen.

Uitz. Gebouw:

Meer dan 4000 m³: Neen
Meer dan 85.000 m³/h: Neen

Vorbereidingen:

Verwarming: Uit
Ventilatie: Uit
Ventilatie afgesloten: Centrale afdichting binnen
Zie ook opmerking
Binnendeuren: Open
Luiken binnen testzone: Gesloten - niet toegank. ruimte én speciaal gereedschap nodig
Aangrenzende zones: Onaangeroerd
Dampkap: Geen
Beschrijving van de te gemeten zone: De gemeten zone komt overeen met het beschermd volume bepaald door de EPB verslaggever
Geen kelder aanwezig
Geen zolder aanwezig
Geen garage aanwezig

Opmerkingen: Afdichting ventilatie via klep in groep en plastic zakken omheen de aan- en afvoer van de ventilatieunits in de (klas)lokalen.

De drukverdeling werd gecontroleerd in beide sanitaire units die niet toegankelijk zijn van binnenuit, maar wel verbonden zijn via de ventilatiekanalen. Het drukverschil vij 50 Pa bedroeg minder dan 10%.



info@infiltrо.be - +32(0) 498 924942



www.infiltrо.be P. 5/6

Bijkomende foto: drukverdeling



ME500 Duo Folie

Productomschrijving

illbruck ME500 Duo Folie is een combinatie van een copolymeer polyethyleenfilm met een vezelvlies, voorzien van:

aan de ene kant:

- een dubbelzijdig kleefband voor bevestiging op gladde oppervlakken (kozijnen in pvc, aluminium, hout, geschilderd hout)
- een rubber profiel dat luchtdicht aansluit op diverse pvc- en aluminiumkozijnprofielen. Tevens geschikt voor een freesnaad in houten (kozijn)-profiel.

en aan de andere kant:

- een kale folie voor bevestiging m.b.v. SP025 Folielijm Eco of bij toepassing van de rubberprofielen OT015 folielijm gebruiken.
- een "stucgaas" voor bevestiging met behulp van pleister.

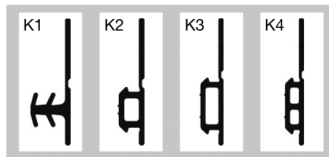
Toepassingsgebieden

ME500 Duo Folie is een lucht- en slagregendicht membraan. Dankzij zijn coëfficiënt voor waterdampdoordringbaarheid, die varieert naargelang de omgevingsvochtigheid, vermijdt dit membraan elke vorm van condensatie in de voeg. Dit membraan wordt door zijn bijzonder geringe luchtdoorlaatbaarheid vaak gebruikt voor constructies met laag energieverbruik of positieve energie.

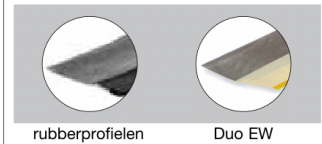
Producteigenschappen

- lucht- en slagregendicht (600 Pa)
- waterdampdoordringbaarheid varieert naargelang van de omstandigheden
- wordt in Duitsland gebruikt voor constructies met het "Passiv Haus"-label
- geschikt voor zowel nieuwbouw als renovatie

Rubberprofiel



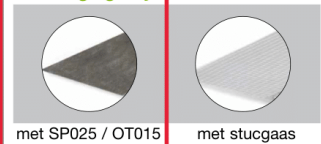
Varianten



rubberprofielen

Duo EW

Bevestigingswijze



met SP025 / OT015

met stucgaas

Technische gegevens

Eigenschappen	Normen	Waarden
Slagregendichtheid	DIN EN 1027 Klasse 9 A	600 Pa PV MPA BAU Hannover Nr. 072330.1 Sz
Luchtdoorlaatbaarheid	DIN EN 1026	$a \leq 0,1 \text{ m}^3/(\text{h.m.}(\text{dPa}))$
Waterdampdoordringbaarheid	DIN 4108-3	So varieert naargelang van de omgevingsvochtigheid: tussen 0,21 en 15 m
Kleefkracht van de butylstrip en kleefkracht van de dubbelzijdige kleefband		12N/25 mm
Compatibiliteit met de gebruikelijke bouwmaterialen	DIN 52 452	Voldoet
Temperatuurbestendigheid		- 40°C tot + 100°C
Verwerkingstemperatuur		+ 5°C tot + 45°C
UV-weerstand		ca. 3 maanden
Brandweerstandsklasse	DIN 4102	B2
Opslagduur		1 jaar

TI-NL-0513 - 09/12

Rubber profiel	min. groefdiepte in mm	groefbreedte in mm	Leverancier kozijnen
K1	± 6,5	± 3 - 5	Schüco, Rehau (PVC) en timmerindustrie (hout)
K2	± 4,0	± 5 - 7	VEKA (PVC)
K3	± 4,0	± 8 - 10	Schüco (alu)
K4	± 3,8	± 14 - 15	Euronut profiel: SAPA, Reynaers, Aluplast (alu)



ME500 Duo Folie

Leveringsvorm

Artikelnr.	type	Inhoud verpakking (m)
56639110	EW 070 mm	5 rol 50m = 250m/ds
56639111	EW 100 mm	3 rol 50m = 150m/ds
56639112	EW 140 mm	2 rol 50m = 100m/ds
56639120	EW 200 mm	2 rol 50m = 100m/ds
56639121	EW 250 mm	1 rol 50m = 50m/ds
56639124	EW 300 mm	1 rol 50m = 50m/ds
56639115	EW 060 mm + gaas	3 rol 50m = 150m/ds
56639116	EW 090 mm + gaas	2 rol 50m = 100m/ds
56639151	EW 140 mm + gaas	2 rol 50m = 100m/ds
390603	K1 100 mm	3 rol 25m = 75m/ds
390604	K1 200 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390605	K1 300 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390606	K2 100 mm	3 rol 25m = 75m/ds
390607	K2 200 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390608	K2 300 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390609	K3 100 mm	3 rol 25m = 75m/ds
390715	K3 200 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390610	K3 300 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390611	K4 100 mm	3 rol 25m = 75m/ds
390612	K4 200 mm	1 rol 25m = 25m/ds
390613	K4 300 mm	1 rol 25m = 25m/ds

Andere bandbreedtes op aanvraag.
Lengtetoleranties volgens DIN 7715 P3, breedtetoleranties ca. 2,5 mm. Het kleefband wordt aangebracht op een afstand van 1 tot 6 mm van de rand van het membraan.

Toepassing

Bevestiging op het kozijn

- Kleef het membraan met behulp van het kleefband op het kozijnprofielgedeelte aan de buitenkant (fig. 1), en dit voor de hele omtrek van het kozijn.
- Maak plooiën van ongeveer 2 tot 5 cm in elke hoek (fig. 2).
- Breng de thermische isolatielaag aan (bv. illbruck FM330 Elastic Gun Foam) in het middengedeelte van het kozijnprofielizer, voor de hele omtrek van het kozijn.
- Het Membraan stevig aandrukken/rollen (fig. 4) m.b.v. SP025 Folielijm Eco.
- De vezelvlieskant van het membraan kan gecoat worden met behulp van de gebruikelijke soorten mortel en geschilderd met dispersieverf (fig. 5).

Bevestiging op het kozijn

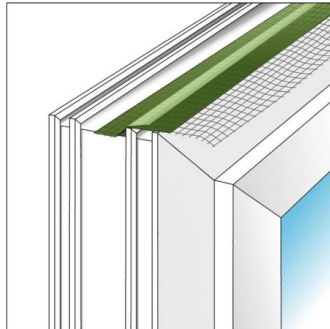


Fig. 1: kleef het membraan op het kozijn

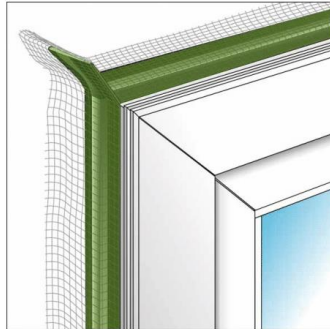


Fig. 2: maak een plooi van ongeveer 2 cm in elke hoek

Bevestiging aan de muur met SP025 Folielijm Eco

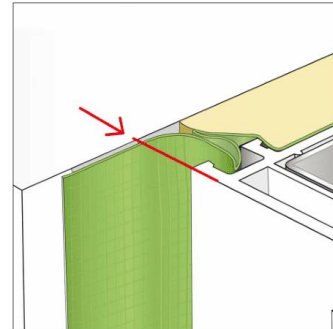


Fig. 3: aanbrengen van de folie met SP025



Fig. 4: bevestig het membraan op de muur

Vorbereiding van de hechtoppervlakken

De hechtoppervlakken moeten droog zijn en vrij van vet, stof en kleefresten. Ook de kleefkracht van pleisterkalk voor het membraan moet getest worden. Bij enig probleem zal men de voorkeur geven aan de oplossing met het stucgaas.



Fig. 5: aan de vezelvlieskant van het membraan bevindt zich het bovenstaande pictogram. Dit geeft aan dat deze kant ingesmeerd kan worden met mortel.

Bevestiging aan de muur met het stucgaas

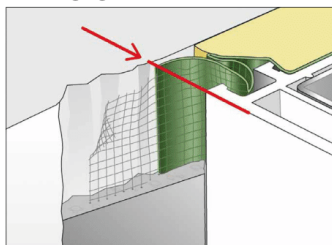


Fig. 6

- Breng in eerste instantie een fijne laag pleisterkalk aan op de muur.
- Leg het stucgaas in de vochtige pleisterkalk. Het gesloten membraan moet de voeg tussen het kozijn en de muur bedekken.

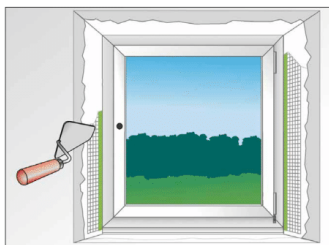


Fig. 7

- Plaats het verbindingsstuk loodrecht op de rode streep, zoals weergegeven in figuur 6.
- Werk de aangebrachte pleisterkalk af door het glad te strijken (fig. 7).

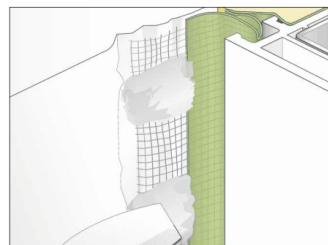


Fig. 8

- Of breng het membraan aan en bevestig het op enkele punten met behulp van mortel of dispersielijm (fig. 8).

ME500 Duo Folie met Rubberprofiel monteren op het kozijn

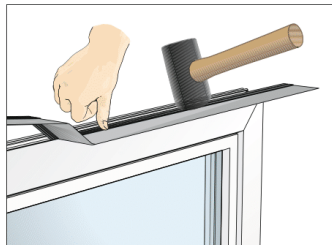


Fig. 9

- De folie met het geschikte rubberprofiel zorgvuldig in de buitenste kozijnprofiel met behulp van een rubberhamer aanbrengen (afb. 9).

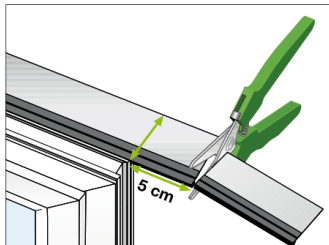


Fig. 10

- Folie rondom het gehele kozijn aanbrengen. Bij de hoeken van de kozijnen de folie met overlengte afknippen. Houdt hierbij 5 cm over (afb. 10).
- Dit bij alle zijden van het kozijn op gelijke wijze herhalen, totdat alle af te dichten zijden van ME500 Duo Folie voorzien zijn.

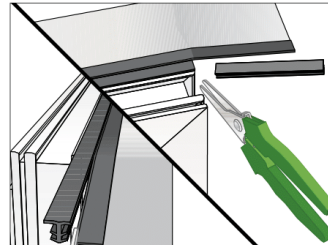


Fig. 11

- De overlengte van de folie langs het rubberprofiel insnijden en recht afknippen bij het kozijn (afb. 11).
- Het kozijn monteren en rondom FM330 Elastic Gun Foam aanbrengen voor een goede isolering van het kozijn.

Duo Folie aanbrengen op de ondergrond

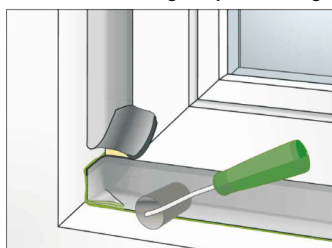


Fig. 12

- De folie gelijkmatig van het kozijn naar de wand laten lopen en deze met OT015 EPDM Folielijm verlijmen op de ondergronden. Zorgvuldig met een aandrukker aandrukken. (afb. 12).

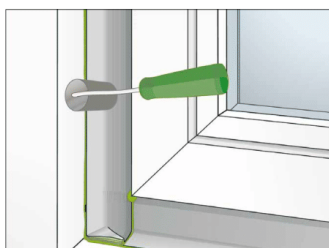


Fig. 13

- De hoeken worden overlapt en volledig verlijmd op de ondergrond, incl. rubberprofiel.

Algemene informatie:

Bovenstaande gegevens zijn naar ons beste weten verstrekt. Wij behouden ons het recht voor wijzigingen in de receptuur aan te brengen. De koper dient zich op de hoogte te stellen van de laatste ontwikkelingen van bovengenoemd product. De toepassingswijze, alsmede de omstandigheden bij applicatie, vallen buiten onze beoordeling en zijn derhalve voor uw eigen verantwoordelijkheid. Aansprakelijkheid op grond van dit productblad kan niet worden aanvaard. Leveringen uitsluitend volgens onze Algemene leverings- en betalingsvoorwaarden.

BIJLAGE F: BLOWERPROOF LIQUID



PRODUCTINFORMATIEBLAD

www.blowerproofliquid.com



BLOWERPROOF LIQUID

Watergedragen polymeerpasta die droogt tot een luchtdichte flexibele coating;
aanbrengen met airless verfspuitapparatuur.



PRODUCTBESCHRIJVING

BLOWERPROOF LIQUID is een watergedragen polymeer pasta, die geapliceerd wordt met airless verfspuitapparatuur en droogt tot een luchtdichte en dampremmende flexibele coating met goede hechting op diverse ondergronden zoals beton, metselwerk, diverse houtsoorten, ...

Toepassingen:

- » vloer/wand aansluitingen, wand/plafond aansluitingen
- » wand/wand aansluitingen
- » volledige wanden (binnen- of buitenschil)
- » gespoten dampscherm op isolatie
- » dakaansluitingen (steeldeck)
- » aansluitingen gordijngevel

APPLICATIE

Alvorens de applicatie te starten

- » Verwijder stof, losliggende delen en stilstaand water van het oppervlak.
- » Verwijder zoutuitslagen en andere oppervlaktevervuilingen die de hechting kunnen aantasten. Behandel oneffenheden, en vul voegen en openingen > 5mm in de ondergrond met polyurethaan schuim of een snelzettend cementgebaseerd product. Voegen en openingen < 5mm worden behandeld met BLOWERPROOF LIQUID BRUSH.
- » BLOWERPROOF LIQUID niet aanbrengen bij T < 5°C (ook T van oppervlakte).
- » Applicatie op vochtige ondergrond stelt geen problemen (geen stilstaand water - handdroog).

Applicatie

- » BLOWERPROOF LIQUID is klaar voor gebruik; kort mengen vooraf aan applicatie; niet verdunnen met water of solventen.
- » BLOWERPROOF LIQUID wordt aangebracht met geschikte airless verfspuitapparatuur. Tevens is de spuitopening en spuitdruk van belang: gelieve Hevadex te contacteren voor verdere informatie (info@hevadex.be).
- » Totaal indicatief verbruik: 0,8 à 1 kg/m² (afhankelijk van de ondergrond).
- » Reinigen materiaal: onmiddellijk na gebruik, met water.
- » Wacht tot na volledige droging (indicatief 24-48uur) alvorens een volgend afwerkingsmateriaal aan te brengen op het gedroogde membraan, zoals pleister. Droogtijden variëren afhankelijk van de ondergrond en lokale condities.

Pag. 1/3

BLOWERPROOF LIQUID

PRODUCTKARAKTERISTIEKEN

Testrapporten beschikbaar op aanvraag

PRODUCTKARAKTERISTIEKEN

Deze tabel bevat gemiddelde waarden op basis van onafhankelijke testrapporten. Waarden die bekomen zijn na veroudering van het testmateriaal, zijn aangeduid met de letter "v".

TESTINSTITUUT	TEST	NORM	WAARDE
wtcb.be	Dampdiffusieweerstand s-factor	EN ISO 12572 (2001)	$\mu = 76584$
wtcb.be	Aanhechting op rode baksteen Porotherm (droog)	ISO4624 (2002)	1,5 N/mm ² (v)
wtcb.be	Aanhechting op Rode baksteen Porotherm (vochtig)	ISO4624 (2002)	1,4 N/mm ² (v)
wtcb.be	Aanhechting op betonsteen (droog)	ISO4624 (2002)	1,9 N /mm ² (v)
wtcb.be	Aanhechting op betonsteen (vochtig)	ISO4624 (2002)	1,6 N /mm ² (v)
wtcb.be	Aanhechting op cellenbeton(Ytong) (droog)	ISO4624 (2002)	0,8 N /mm ² (v); 100% breuk in de ondergrond
wtcb.be	Aanhechting op cellenbeton(Ytong) (vochtig)	ISO4624 (2002)	0,7 N /mm ² (v) >70% breuk in de ondergrond
wtcb.be	Aanhechting op OSB hout	ISO4624 (2002)	0,6 N /mm ² (v) >70% breuk in de ondergrond
wtcb.be	Aanhechting op Multiplex hout	ISO4624 (2002)	0,6 N /mm ² (v) >50% breuk in de ondergrond
wtcb.be	Aanhechting op staal	ISO4624 (2002)	2,7 N /mm ²
wtcb.be	Aanhechting op EPDM (tridex)	ISO4624 (2002)	1,3 N /mm ² (v)
wtcb.be	Aanhechting op roofing	ISO4624 (2002)	0,7 N /mm ² ; 100% breuk in de ondergrond
wtcb.be	Aanhechting van pleister (knauf MP75) op Blowerproof Liquid	ISO4624 (2002)	0,4 N /mm ² (v); >40% breuk in de pleister
wtcb.be	Rek	NBN EN 12311-1 (1999)	230% (V); 20 N/50mm ² trekweerstand
UNIVERSITEIT GENT	Luchtdichtheid vloer/wand na zetting	NBN EN 12114:2000 (zetting volgens eurocode 7)	0,07 M ³ /H.M (50BAR) (V)
warringtonfiregent	Vlampropagatie	EN ISO 11925-2	<150 mm
warringtonfiregent	Brandreactie	EN ISO 11925-2	NO
VIT	VOC, TVOC, kankerverwekkende stoffen, ammoniak, formaldehyde	EN ISO 16000-9/6 EN 717-1 EN ISO 16000-28	
Mecadi	Methaandampdoorlaatbaarheid	ISO 15105	62 – 75 cm ³ (STP)-mm-m ² -day ⁻¹ -atm ⁻¹

ANDERE TESTRAPPORTEN

BCB	Luchtdichtheid van vloer/wand aansluitingen
BCB	Luchtdichtheid volledige wanden, met verankerde isolatieplaten
Luchtdichtheidsverslagen (Blowerdoor) van gerealiseerde projecten	



BLOWERPROOF LIQUID

ANDERE TECHNISCHE GEGEVENS

- » Verbruik: 0,8 – 1 kg/m² (indicatief; afhankelijk van gespoten laagdikte, substraatrelief)
- » Dichtheid : +/- 1,2 kg / liter
- » Beschikbare kleuren:
 - Blauw(droogt tot een zwarte coating)
 - Wit (droogt tot een witte coating)
- » Droogtijd: 0,5 à 24 uur (afhankelijk van omgevingstemperatuur, luchtvochtigheid, laagdikte);
- » Opslag: 5 – 20 °C; beschut, droog en uit direct zonlicht; bewaring: 12 maanden vanaf productiedatum, originele ongeopende verpakking.

VERPAKKING

Emmer 10kg – pallet : 44 x 10 kg

VEILIGHEID

Raadpleeg het veiligheidsdata blad van dit product alvorens het toe te passen. De gebruikelijke arbeidshygiëne in acht nemen. Steeds werken in voldoende geventileerde ruimten. In de natte fase dient huidcontact vermeden te worden; Het dragen van handschoenen, mondmasker en oogbescherming is vereist. Bij oogcontact onmiddellijk overvloedig spoelen met water gedurende minstens tien minuten, en steeds een arts raadplegen.

DATUM OPMAAK VAN DEZE VERSIE: 09/05/2016

De algemene verkoopvoorwaarden zijn van toepassing. Dit document heeft geen enkele contractuele waarde. Deze fiche annuleert en vervangt de vorige uitgave. De gegevens op deze fiche hebben tot doel u in te lichten en raad te geven, ze zijn gebaseerd op proeven uitgevoerd met oog op objectiviteit. Wijzigingen aan deze fiche t.g.v. de technische evolutie kunnen op ieder tijdstip aangebracht worden. Gelieve u te vergewissen van de geldigheid van de fiche in uw bezit. De bovenstaande informatie is gebaseerd op onze huidige kennis. HEVADEX bvba is niet verantwoordelijk voor het gebruik van de producten indien die niet overeenstemmen met de aanbevelingen en gebruiksaanwijzingen. De aanbevelingen en gebruiksaanwijzingen zoals hierboven beschreven zijn slechts indicatief en houden geen absolute regels in aangezien bepaalde elementen aan onze controle kunnen ontsnappen. Gelieve HEVADEX bvba te raadplegen. Zij zullen u adviseren over uw specifieke toepassing.

Pag. 3/3

BIJLAGE G: BEREKENINGEN THEORETISCHE SCHATTINGSMETHODE

Normale situatie

De gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex $R'_{w,normal}$ in de normale situatie is gelijk aan 25 dB. Gebruikmakend van (19) levert dit de volgende resultaten:

$$S_{l,dubbel} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{25-29,6520}{10}}}{10^{\frac{25}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,019604 \text{ m}^2$$

$$S_{l,enkeltvoudig} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{25-29,5313}{10}}}{10^{\frac{25}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,019316 \text{ m}^2$$

Wanneer we deze resultaten invullen in (20), dan levert dit de volgende debieten bij een drukverschil van 50 Pa:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,019604 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 379,218 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (dubbele wand)}$$

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,019316 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 373,647 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (enkeltvoudige wand)}$$

Dit geeft dit aanleiding tot de volgende ventilatievouden bij een drukverschil van 50 Pa:

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{379,218 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 10,00 \text{ h}^{-1} \text{ (dubbele wand)}$$

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{373,647 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 9,86 \text{ h}^{-1} \text{ (enkeltvoudige wand)}$$

Maatregel 1

De gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in deze situatie nadat de eerste maatregel is toegepast $R'_{w,maatregel 1}$ is gelijk aan 26 dB. Gebruikmakend van (19) levert dit de volgende resultaten:

$$S_{l,dubbel} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{26-29,6520}{10}}}{10^{\frac{26}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,013470 \text{ m}^2$$

$$S_{l,enkeltvoudig} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{26-29,5313}{10}}}{10^{\frac{26}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,013182 \text{ m}^2$$

Wanneer we deze resultaten invullen in (20), dan levert dit de volgende debieten bij een drukverschil van 50 Pa:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,013470 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 260,570 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (dubbele wand)}$$

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,013182 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 254,992 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (enkeltvoudige wand)}$$

Dit geeft dit aanleiding tot de volgende ventilatievouden bij een drukverschil van 50 Pa:

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{260,570 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 6,88 \text{ h}^{-1} \text{ (dubbele wand)}$$

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{254,992 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 6,73 \text{ h}^{-1} \text{ (enkelvoudige wand)}$$

Maatregel 2

De gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in deze situatie $R'_{w,maatregel 2}$ is gelijk aan 27 dB. Gebruikmakend van (19) levert dit de volgende resultaten:

$$S_{l,dubbel} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{27-29,6520}{10}}}{10^{\frac{27}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,008599 \text{ m}^2$$

$$S_{l,enkelvoudig} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{27-29,5313}{10}}}{10^{\frac{27}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,008311 \text{ m}^2$$

Wanneer we deze resultaten invullen in (20), dan levert dit de volgende debieten bij een drukverschil van 50 Pa:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,008599 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 166,338 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (dubbele wand)}$$

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,008311 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 160,767 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (enkelvoudige wand)}$$

Dit geeft dit aanleiding tot de volgende ventilatievouden bij een drukverschil van 50 Pa:

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{166,338 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 4,39 \text{ h}^{-1} \text{ (dubbele wand)}$$

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{160,767 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 4,24 \text{ h}^{-1} \text{ (enkelvoudige wand)}$$

Maatregel 3

De gewogen waarde van de schijnbare geluidverzwakkingsindex in deze situatie $R'_{w,maatregel 3}$ is evenzeer gelijk aan 27 dB. Gebruikmakend van (19) levert dit dezelfde resultaten als bij maatregel 2:

$$S_{l,dubbel} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{27-29,6520}{10}}}{10^{\frac{27}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,008599 \text{ m}^2$$

$$S_{l,enkelvoudig} = \left(\frac{1-10^{\frac{R'_w - R_w + C_F}{10}}}{10^{\frac{R'_w + C_F}{10}}} \right) \cdot S = \left(\frac{1-10^{\frac{27-29,5313}{10}}}{10^{\frac{27}{10}}} \right) \cdot (2,37 \cdot 3,98) = 0,008311 \text{ m}^2$$

Wanneer we deze resultaten invullen in (20), dan levert dit de volgende debieten bij een drukverschil van 50 Pa:

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,008599 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 166,338 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (dubbele wand)}$$

$$\dot{V} = S_l C_d \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,008311 \cdot 0,611 \cdot \sqrt{\frac{100}{1,293}} = 160,767 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ (enkelvoudige wand)}$$

Dit geeft dit aanleiding tot de volgende ventilatievouden bij een drukverschil van 50 Pa:

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{166,338 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 4,39 \text{ h}^{-1} \text{ (dubbele wand)}$$

$$n_{50} = \frac{\text{debiet}}{\text{volume}} = \frac{160,767 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{37,9 \text{ m}^3} = 4,24 \text{ h}^{-1} \text{ (enkelvoudige wand)}$$

Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

Luchtdichtheid: onderzoek naar een akoestische schattingsmethode

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**

Jaar: **2018**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Belien, Andrea

Jehoul, Dries

Datum: **4/06/2018**