



Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. B. Verschaffel

LUCHTDICHTHEID

Experimenteel onderzoek naar schattingsmethodes bij woningen

Nathan Van Den Bossche

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS

Scriptiebegeleiders: Ir. Arch L. WILLEMS en Arch. J. MOENS

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk Ingenieur-Architect

Academiejaar 2004-2005



Faculteit Ingenieurswetenschappen

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw
Voorzitter: Prof. Dr. B. Verschaffel

LUCHTDICHTHEID

Experimenteel onderzoek naar schattingsmethodes bij woningen

Nathan Van Den Bossche

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS

Scriptiebegeleiders: Ir. Arch L. WILLEMS en Arch. J. MOENS

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische graad van Burgerlijk Ingenieur-Architect

Academiejaar 2004-2005

Voorwoord

Deze thesis is dankzij de hulp en inspiratie van verschillende mensen tot stand gekomen. Vooreerst zou ik mijn promotor prof. A. Janssens, en begeleiders L. Willems en J. Moens willen bedanken voor alle aangereikte informatie, deskundige uitleg en kritische vragen. Een aantal bedrijven is zo vriendelijk geweest alle relevante documentatie waarover ze beschikking hadden door te sturen: c.v. De Zonnige Kempen, Isoproc, Isofloc, Ytong, Rockwool en Renson. Dankzij een aantal mensen van het WTCB, het Fraunhofer Institut Stuttgart en het Passiv Haus Intstitut Darmstadt heb ik mits het nodige aandringen bijna kosteloos interessante informatie kunnen verkrijgen.

Dit onderzoek kon niet bestaan zonder de bereidwillige medewerking van alle mensen bij wie de verschillende metingen hebben plaats gehad: Gert De Baets, Siska de Muynck, Fredie Floré, prof Janssens, Lieven Willems, Donald Desmet, Stefanie Depauw, familie Mertens, familie Van Hulle, familie Dauwe, familie Hemeryck en familie Lambert.

En last but not least zou ik mijn vriendin en mijn moeder willen bedanken voor het geduld dat ze opgebracht hebben tijdens het aanhoren van talloze verhalen over thesisperikelen.

Verantwoording

Sinds de energiecrisis in 1973 is het bewustzijn gegroeid dat energievoorraden niet eindeloos zijn. De laatste 15 jaar is ook duidelijk geworden dat de gevolgen van de vergaande industrialisering nefast zijn voor het ecologische systeem op deze wereld. De broeikasgassen tasten de ozonlaag aan, waardoor er meer UV-licht in de atmosfeer terechtkomt dat de aarde opwarmt en het risico op huidkanker bij mensen verhoogt. Bovendien zorgt een onstabiel politiek klimaat in het Midden-Oosten, en een boomende economie in China voor spectaculair hoge energieprijzen. Analisten zien op korte en middellange termijn geen veranderingen optreden in deze situatie.

In 1997 werd in Kyoto in Japan beslist om de uitstoot van broeikasgassen (onder meer CO₂) tegen 2012 te verminderen met 5 procent tegenover 1990. Per land wordt een individueel doel vooropgesteld, België moet zijn uitstoot met 7.5% doen dalen. Dit akkoord treedt echter maar in werking als 55 landen die samen 55% van de vervuiling veroorzaken dit akkoord ondertekenen. De Verenigde Staten, Australië, Rusland en China hebben altijd geweigerd hun verantwoordelijkheid op te nemen, maar eind 2004 heeft de Russische Doema het verdrag dan toch geratificeerd, zodat de 55% eindelijk gehaald wordt. Het verdrag is uiteindelijk van kracht geworden in februari 2005, 8 jaar na het opstellen ervan.

In een relatief koud klimaat met hoge comforteisen zoals in België gaat er veel energie naar de verwarming van woningen en andere gebouwen. In België gaat 37.5% van het jaarlijkse eindverbruik naar het energieverbruik in gebouwen, en 70% à 75% van die energie gaat naar ruimteverwarming. Hoewel er bijna in alle nieuwbouwwoningen isolatie geplaatst wordt zijn er nog grote veranderingen nodig: het potentieel om energie te besparen wordt slechts minimaal benut. Vanaf 1 januari 2006 wordt dan ook de nieuwe EnergiePrestatieRegelgeving van kracht die de bouwwereld verplicht om meer aandacht te besteden aan energiezuinigheid en energiehuishouding in het algemeen. Luchtdichtheid is één van de vele schakels die kunnen bijdragen tot een energiezuinig wonen.

LUCHTDICHTHEID

Experimenteel onderzoek naar schattingsmethodes bij woningen

Nathan Van Den Bossche

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: Prof. Dr. B. Verschaffel

Promotor: Prof. Dr. Ir. Arch. A. JANSSENS

Scriptiebegeleiders: Ir. Arch L. WILLEMS en Arch. J. MOENS

Scriptie ingediend tot het behalen van de academische
graad van Burgerlijk Ingenieur-Architect

Academiejaar 2004-2005

Universiteit Gent

Faculteit Ingenieurswetenschappen

Samenvatting

Naarmate woningen beter geïsoleerd worden neemt het belang van ventilatie toe in de energieverliezen. Een deel van die verliezen is afkomstig van infiltratie en exfiltratie van lucht door materialen en openingen in de gebouwhuid. Om die verliezen te beperken streeft men een goede ‘luchtdichtheid’ na van de gebouwschil, bovendien zal dit het risico op schade en tochtverschijnselen verminderen.

In het kader van de EnergiePrestatieRegelgeving die van kracht wordt op 1 januari 2006 is dit werk een bijdrage tot het inzicht in de problematiek van luchtdichtheid. Enerzijds heeft dit werk de ambitie alle relevante thema's te behandelen die verband houden met luchtdichtheid in het algemeen: meetverloop, lekkageverdeling, bouwfysische gevolgen van lekken, akoestische gevolgen, infiltratie, en praktische realisatie van een luchtdicht gebouw.

Anderzijds is het interessant om op voorhand de luchtdichtheid van een woning te kunnen schatten, om vast te stellen welke maatregelen men dient te nemen om een bepaalde luchtdichtheid na te streven. Daarom hebben we een aantal metingen uitgevoerd op woningen en alle bestaande schattingsmethodes geëvalueerd. Op basis van die resultaten stellen we een nieuwe methode op die correcter en gebruiksvriendelijker is.

Trefwoorden

Luchtdichtheid, schattingsmethode, infiltratie, ventilatie

Toelating tot bruikleen

"De auteur(s) geeft(geven) de toelating deze scriptie voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de scriptie te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze scriptie."

Gent, 20 mei 2005

Inhoudstafel

Inleiding

Titelblad.....	I
Voorwoord.....	II
Verantwoording	III
Overzicht.....	IV
Toelating tot bruikleen.....	V
Inhoudstafel.....	VI
Lijst symbolen.....	XI
Lijst afkortingen.....	XII
Lijst figuren.....	XIII
Lijst tabellen.....	XVII

1) Theorie.....	1
1.1) Inleiding.....	1
1.2) Blowerdoor meting	2
1.2.1) Grootheden.....	3
1.2.2) Correctiefactoren.....	16
1.2.3) Foutenrekening.....	22
1.2.4) Testverloop Blower Door.....	29

2) Luchtdichtheidsmetingen.....	35
2.1) Inleiding.....	35
2.2) Geometrie.....	36
2.3) Proefverloop.....	36
2.4) Resultaten.....	37
2.4.1) Correctiefactoren.....	39
2.4.2) Parameteronderzoek.....	41
2.4.3) Gebruikstoestand.....	43
2.4.4) Ventilatioorosters.....	45
2.4.5) Blowerdoor.....	46

3) Schatten luchtdichtheid.....	47
3.1) Inleiding.....	47
3.2) Schattingsmethode AIVC – « Component Air Leakage ».....	47
3.2.1) Principe.....	47
3.2.2) AIVC laag.....	53
3.2.3) AIVC midden.....	55
3.2.4) AIVC hoog.....	58
3.2.5) Besluit.....	60
3.3) Schattingsmethode AIVC – « Whole Building Leakage ».....	61
3.3.1) Principe.....	61
3.3.2) Schattingen.....	62
3.3.3) Besluit.....	65

3.4) Schattingsmethode ASHRAE.....	65
3.4.1) Principe.....	65
3.4.2) ASHRAE minimum.....	69
3.4.3) ASHRAE midden.....	71
3.4.4) ASHRAE maximum.....	73
3.4.5) Besluit.....	75
3.5) Schattingsmethode SENVIVV.....	75
3.5.1) Principe.....	75
3.5.2) Resultaten SENVIVV-studie.....	78
3.5.3) Schattingen.....	79
3.5.4) Besluit.....	82
3.6) Schattingsmethode Instituut Wonen en Umwelt	82
3.6.1) Principe.....	82
3.6.2) Schattingen.....	85
3.7) SBR schattingsmethode 1.....	86
3.7.1) Principe.....	86
3.7.2) Schattingen.....	88
3.7.3) Schattingen SENVIVV-studie.....	90
3.8) SBR schattingsmethode 2.....	90
3.8.1) Principe.....	90
3.8.2) SBR klasse 1.....	92
3.8.3) SBR klasse 2.....	95
3.8.4) Besluit.....	97
3.9) Onderling verband tussen de schattingsmethodes.....	97
3.10) Algemeen Besluit.....	99
<u>4) Schattingsmethodes lekkageverdeling.....</u>	100
4.1) Inleiding	100
4.2) Lekkageverdeling per schattingsmethode.....	100
4.2.1) Open bebouwing..	100
4.2.2) Houtskeletbouw.....	104
4.2.3) Appartementen.....	107
4.3) Absolute lekkage per gebouwcomponent.....	110
4.3.1) Wanden, vloeren, plafonds.....	110
4.3.2) Aansluitingen.....	111
4.3.3) Schrijnwerk.....	111
4.3.4) Andere.....	112
4.4) Samenstellende schattingsmethode UGENT.....	112
4.4.1) Wanden, vloeren, plafonds.....	112
4.4.2) Aansluitingen.....	113
4.4.3) Schrijnwerk.....	113
4.4.4) Andere.....	114
4.4.5) Controle opgestelde schattingsmethode.....	114
<u>5) Lekken.....</u>	119
5.1) Inleiding	119

5.2) Opsporen van lekken.....	119
5.2.1) Inleiding.....	119
5.2.2) Visueel.....	120
5.2.3) Manueel.....	120
5.2.4) Thermoanemometer.....	121
5.2.5) Rook.....	123
5.2.6) Thermografie.....	123
5.2.7) Drukproef.....	127
5.2.8) Akoestische proef.....	127
5.3) Lekkageverdeling.....	128
5.3.1) Frequentie.....	128
5.3.2) Aandeel garage en zolder in luchtlekkage.....	129
5.3.3) Aandeel kelder en zolder in luchtlekkage bij houtbouw.....	131
5.3.4) Aandeel vloer / wanden / dak.....	132
5.4) Invloed op thermische prestaties.....	133
5.4.1) Inleiding.....	133
5.4.2) VLIET-project.....	134
5.5) Invloed op vochthuishouding.....	140
5.5.1) Inleiding.....	140
5.5.2) VLIET-project.....	140
5.5.3) Diffusie – convectie.....	141
5.5.4) Bouwkundige criteria.....	144
5.6) Besluit.....	145
6) Akoestiek.....	147
6.1) Inleiding.....	147
6.2) Achtergrond.....	147
6.3) Normen.....	148
6.3.1) Criteria voor binnenruimes.....	148
6.3.2) Criteria voor wanden NBN S01-400:1977.....	149
6.3.3) Criteria voor wanden NBN S01-400: ontwerp 2004-04.....	149
6.4) Homogene wanden.....	150
6.5) Voegen in wanden.....	153
7) Infiltratie & Normering.....	157
7.1) Inleiding.....	157
7.2) Natuurlijke ventilatie.....	158
7.2.1) prEN 832 (Europa)	158
7.2.2) ASHRAE (Verenigde Staten)	158
7.2.3) Lawrence Berkely Laboratory (Verenigde Staten)	159
7.2.4) EnergiePrestatieRegelgeving (Nederland)	160
7.3) Niet gebalanceerde ventilatie.....	161
7.4) Gebalanceerde ventilatie.....	161
7.5) Energieverbruik.....	162
7.5.1) Belang.....	162
7.5.2) Energiebesparing.....	163

7.5.3) Relatief aandeel infiltratie in totaal energieverbruik.....	166
7.6) Normen en voorschriften.....	168
7.6.1) België.....	168
7.6.2) Nederland.....	169
7.6.3) Duitsland.....	170
7.6.4) Zweden.....	170
7.6.5) Noorwegen.....	171
7.6.6) Zwitserland.....	171
7.6.7) Canada.....	171
7.6.8) Verenigde Staten.....	172
7.6.9) Besluit.....	172
7.7) Luchtdichtheid in functie van ventilatiesysteem.....	174
7.8) Minimale ventilatie.....	175
8) SENVIVV-studie.....	177
8.1) Inleiding.....	177
8.2) Procedure.....	177
8.3) Analyse.....	179
8.3.1) berekeningsmethode n_{50}	179
8.3.2) Grootheden.....	183
8.3.3) Parameters.....	184
9) Uitvoering.....	194
9.1) Inleiding.....	194
9.2) Wanden, vloeren, daken.....	196
9.2.1) Bepaalde muren.....	197
9.2.2) Onbepaalde muren.....	197
9.2.3) Polyethyleenfolie.....	197
9.2.4) Papier.....	199
9.2.5) Aluminiumscherm.....	200
9.2.6) Platen.....	200
9.2.7) Prefabelementen.....	201
9.3) Lineaire aansluitingen.....	201
9.3.1) Materialen.....	202
9.3.2) Muur - vloer.....	206
9.3.3) Muur – plafond.....	211
9.3.4) Muur – dak.....	213
9.3.5) Muur – schrijnwerk.....	217
9.3.6) Muur – muur.....	221
9.3.7) Nok, kil, noordboom.....	223
9.4) Puntvormige doorboringen.....	226
9.4.1) Bepaalde wand.....	227
9.4.2) PE-folie, platen.....	227
9.5) Inbouwelementen.....	229
9.5.1) Dampkap.....	230
9.5.2) Open haard.....	230

9.5.3) Rolluiken.....	230
9.5.4) Schrijnwerk.....	231
<u>10) Besluit</u>	233
<u>Bibliografie</u>	234
<u>Appendix A:</u> Formulier blowerdoor meting.....	245
<u>Appendix B:</u> Checklist blowerdoor meting.....	247
<u>Appendix C:</u> Testverslagen woningen.....	249

Belangrijkste symbolen

$\dot{V}$	luchtvolumestroom [m ³ /h]
C	stromingscoëfficiënt [m ³ /(h Pa ⁿ)]
C_d	weerstandsgetal [-]
ρ	massadichtheid lucht [kg/m ³]
Δp	drukverschil [Pa]
n	stromingsexponent [-]
n_{50}	ventilatievoud bij $\Delta p=50 \text{ Pa}$ [h ⁻¹]
$V_{b, \text{geb}}$	binnenvolume van het gebouw [m ³]
Q_{50}	totale luchtvolumestroom bij $\Delta p=50 \text{ Pa}$ [m ³ /h]
q_{50}	luchtvolumestroom per m ² bij $\Delta p=50 \text{ Pa}$ [m ³ /(h m ²)]
q_{10}	luchtvolumestroom per m ² bij $\Delta p=10 \text{ Pa}$ [m ³ /(h m ²)]
A_{geb}	wandoppervlakte van een gebouw [m ²]
A_n	netto vloeroppervlakte [m ²]
$\dot{m}$	massastroom [kg/h]
μ	dynamische viscositeit [kg/m.s]
Nu	nusselt getal [-]
R	geluidsverzwakkingsindex [dB(A)]
D_n	genormaliseerde bruto akoestische isolatie [dB(A)]
$L_{I,z}$	geluidsdrukkniveau aan de zenzijde [dB(A)]
$L_{I,ont}$	geluidsdrukkniveau aan de ontvangstzijde [dB(A)]
S	oppervlakte van het beproefde gedeelte [m ²]
$A_{T,0}$	totaal absorptieoppervlak of equivalent open raam [m ²]
ED	equivalente A-gewogen geluidbelasting overdag [dB(A)]
EN	equivalente A-gewogen geluidbelasting 's nachts [dB(A)]
N	Lawrence Berkely Laboratory correlatiefactor [-]
n_x	natuurlijk infiltratievoud [h ⁻¹]
e	beschuttingsfactor [-]
Q_h	jaarlijkse energiebehoefte voor verwarming [kWh]

G_b^a	aantal graaddagen per jaar [K.dag]
$V_{in/exfilt}$	gemiddeld in/exfiltratiedebiet [m ³ /h]

Belangrijkste afkortingen

AIVC	Air Infiltration and Ventilation Centre
ASHRAE	American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers
CFM	Cubic Feet per Minit
HVAC	Heating Ventilation and Air-Conditioning
IWU	Institut Wohnen und Umwelt
LBL	Lawrence Berkely Laboratory
PHI	Passiv Haus Institut
RV	Relatieve Vochtigheid
SBR	Stichting BouwResearch
SENVIVV	Studie van Energieaspecten van Nieuwbouwwoningen in Vlaanderen: Isolatie, Ventilatie en Verwarming
VLIET	Vlaams Impulsprogramma voor Energie Technologie
WBL	Whole Building Leakage

Lijst figuren

Figuur 1. “Opstelling blowerdoor”	2
Figuur 2. “vergelijking n_{50} – q_{50} in het kader van de SENVIVV-studie”	13
Figuur 3. “significant verschil tussen metingen”	23
Figuur 4. “verschil tussen metingen dat niet significant is”	24
Figuur 5. “gemeten n_{50} -waardes bij testwoningen”	37
Figuur 6. “verband tussen onderdruk en overdruk”	39
Figuur 7. “invloed van temperatuursverschillen op gemeten waardes”	40
Figuur 8. “verband temperatuursverschil - correctiefactor”	41
Figuur 9. “verband luchtdichtheid - gebouwschiloppervlak”	42
Figuur 10. “verband luchtdichtheid - aansluitingen”	42
Figuur 11. “schattingsmethodes AIVC laag”	53
Figuur 12. “schattingsmethodes AIVC laag – open bebouwing”	54
Figuur 13. “schattingsmethodes AIVC midden”	55
Figuur 14. “schattingsmethodes AIVC midden – open bebouwing”	57
Figuur 15. “schattingsmethodes AIVC hoog”	58
Figuur 16. “schattingsmethodes AIVC hoog – open bebouwing”	59
Figuur 17. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage”	63
Figuur 18. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage – open bebouwing”	64
Figuur 19. “schattingsmethodes ASHRAE minimum”	69
Figuur 20. “schattingsmethodes ASHRAE minimum – open bebouwing”	70
Figuur 21. “schattingsmethodes ASHRAE middel”	71
Figuur 22. “schattingsmethodes ASHRAE middel – open bebouwing”	72
Figuur 23. “schattingsmethodes ASHRAE maximum”	73
Figuur 24. “schattingsmethodes ASHRAE maximum – open bebouwing”	74
Figuur 25. “relatie tussen de visuele schatting van de luchtdichtheid en de gemeten waarde zoals vermeld in de SENVIVV-studie”	78
Figuur 26. “schattingsmethodes SENVIVV”	80
Figuur 27. “schattingsmethodes SENVIVV – open bebouwing”	81
Figuur 28. “schattingsmethodes IWU”	86
Figuur 29. “schattingsmethodes SBR ”	88
Figuur 30. “schattingsmethodes SBR – open bebouwing”	89
Figuur 31. “schattingsmethodes SBR klasse 1”	93
Figuur 32. “schattingsmethodes SBR klasse 1 – open bebouwing”	94
Figuur 33. “schattingsmethodes SBR klasse 2”	95
Figuur 34. “schattingsmethodes SBR klasse 2 – open bebouwing”	96
Figuur 35. “onderlinge afhankelijkheid schattingsmethodes”	98
Figuur 36. “lekkageverdeling AIVC – open bebouwing”	100
Figuur 37. “lekkageverdeling ASHRAE – open bebouwing”	101
Figuur 38. “lekkageverdeling SENVIVV – open bebouwing”	101
Figuur 39. “lekkageverdeling IWU – open bebouwing”	102
Figuur 40. “lekkageverdeling SBR – open bebouwing”	102
Figuur 41. “lekkageverdeling AIVC – houtskeletbouw”	104
Figuur 42. “lekkageverdeling ASHRAE – houtskeletbouw”	104

Figuur 43. “lekkageverdeling SENVIVV – houtskeletbouw”	105
Figuur 44. “lekkageverdeling IWU – houtskeletbouw”	105
Figuur 45. “lekkageverdeling SBR – houtskeletbouw”	106
Figuur 46. “lekkageverdeling AIVC – appartementen”	107
Figuur 47. “lekkageverdeling ASHRAE – appartementen”	107
Figuur 48. “lekkageverdeling SENVIVV – appartementen”	108
Figuur 49. “lekkageverdeling IWU – appartementen”	108
Figuur 50. “lekkageverdeling SBR – appartementen”	109
Figuur 51. “schattingmethoden UGENT”	114
Figuur 52. “schattingmethoden UGENT – open bebouwing”	115
Figuur 53. “lekkageverdeling UGENT – open bebouwing”	116
Figuur 54. “schattingmethoden UGENT - houtskeletbouw”	117
Figuur 55. “lekkageverdeling UGENT - houtskeletbouw”	117
Figuur 56. “schattingmethoden UGENT - appartementen”	118
Figuur 57. “manueel lekken opsporen”	121
Figuur 58. “lekken opsporen met rook”	121
Figuur 59. “thermoanemometer”	122
Figuur 60. “rook in overdruk schrijnwerk”	123
Figuur 61. “rook in overdruk dakrand”	123
Figuur 62. “hoekaansluiting: foto”	125
Figuur 63. “hoekaansluiting: thermogrammen”	125
Figuur 64. “zolderluik: thermogrammen”	126
Figuur 65. “dakkapel: thermogrammen”	126
Figuur 66. “drukproef op stopcontact”	127
Figuur 67. “aandeel garage en zolder in luchtlekkage”	130
Figuur 68. “vergelijking n_{50} -waardes met en zonder garage”	131
Figuur 69. “aandeel kelder en zolder in luchtlekkage bij houtbouw”	132
Figuur 70. “VLIET-proefgebouw”	136
Figuur 71. “proefopstelling wand”	136
Figuur 72. “Nusseltgetal in functie van windsnelheid voor een dak type 03”	138
Figuur 73. “Nusseltgetal in functie van windsnelheid voor een dak type 01”	138
Figuur 74. “vochttransport in functie van drukverschil en voegbreedte”	143
Figuur 75. “vergelijking vochttransport diffusie - convectie”	143
Figuur 76. “beslissingsgrafiek voor beheersing van condensatie door luchtlekkage”	144
Figuur 77. “bouwschade door luchtlekkage”	145
Figuur 78. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie - afwerking”	151
Figuur 79. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie - bepleistering”	152
Figuur 80. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie - afwerking”	153
Figuur 81. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie – voegen 1-10mm”	154
Figuur 82. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie – voeg 0.12mm”	154
Figuur 83. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie – samedrukking schuimband”	156
Figuur 84. “gemeten infiltratie bij 312 energiezuinige nieuwbouwwoningen”	159
Figuur 85. “gemeten infiltratie bij 266 woningen van ongeveer 30 jaar oud”	159
Figuur 86. “infiltratie en energieverlies in functie van n_{50} -waarde”	165
Figuur 87. “de energiestromen in een eengezinswoning met vier personen”	167

Figuur 88. “de verschillende eisen naar luchtdichtheid naargelang het ventilatiesysteem”	173
Figuur 89. “aangewezen ventilatiesysteem in functie van luchtdichtheid - SBR”	174
Figuur 90. “minimaal benodigde ventilatiestromen volgens NBN D50-001”	176
Figuur 91. “gemiddelde n_{50} -waardes naar gebouwtypologie”	179
Figuur 92. “gemeten n_{50} -waardes bij appartementen”	181
Figuur 93. “gemeten n_{50} -waardes bij woningen in gesloten bebouwing”	181
Figuur 94. “gemeten n_{50} -waardes bij woningen in halfopen bebouwing”	182
Figuur 95. “gemeten n_{50} -waardes bij woningen in open bebouwing”	182
Figuur 96. “ n_{50} en q_{50} waardes in functie van compactheid van de woning”	183
Figuur 97. “verschil n_{50} - q_{50} in functie van compactheid van de woning”	184
Figuur 98. “verband tussen luchtdichtheid en globaal isolatiepeil”	185
Figuur 99. “verband tussen luchtdichtheid en globaal isolatiepeil - beperkte selectie”	185
Figuur 100. “verband tussen luchtdichtheid en verhouding oppervlakte glas tot wand” ..	186
Figuur 101. “verband tussen luchtdichtheid en verhouding oppervlakte glas tot wand – voor woningen in open bebouwing”	187
Figuur 102. “verband tussen luchtdichtheid en omtrek schrijnwerk”	188
Figuur 103. “verband tussen luchtdichtheid en verhouding omtrek schrijnwerk / netto binnenvolume”	189
Figuur 104. “verband tussen luchtdichtheid en stromingsexponent”	190
Figuur 105. “verband tussen luchtdichtheid en stromingscoëfficiënt”	191
Figuur 106. “verband luchtdichtheid - bewonersappreciatie luchtkwaliteit”	192
Figuur 107. “verband luchtdichtheid - bewonersappreciatie geluidscomfort”	193
Figuur 108. “aanduiding luchtdichtheidsscherm – regel 1”	194
Figuur 109. “verkleaving PE-folie: enkelzijdig plakband”	198
Figuur 110. “verkleaving PE-folie: dubbelzijdig plakband”	198
Figuur 111. “verkleaving PE-folie: dubbelzijdig plakband op een structuur”	199
Figuur 112. “verkleaving PE-folie met dubbelzijdig plakband: frequente fout”	199
Figuur 113. “toepasbaarheid PAVATEX-tape in functie van materialen”	200
Figuur 114. “OSB-platen als luchtdichte afwerking in passiefwoningen”	201
Figuur 115. “tape met aluminium coating”	203
Figuur 116. “profiel in prefabgevel”	204
Figuur 117. “verschillende types EPDM-profielen”	204
Figuur 118. “cellenband op rol”	204
Figuur 119. “compressieband op rol”	205
Figuur 120. “afkitten prefabelementen”	206
Figuur 121. “PUR-schuim”	206
Figuur 122. “aansluiting PE-folie bij vloerconstructie 1”	208
Figuur 123. “aansluiting PE-folie bij vloerconstructie 2”	209
Figuur 124. “aansluiting PE-folie bij vloerconstructies 3”	209
Figuur 125. “lekkage bij vloeraansluiting”	211
Figuur 126. “aansluiting betonnen vloer op houten wand”	212
Figuur 127. “aansluiting betonnen vloer op prefabwand”	213
Figuur 128. “aansluiting muur – dak: hoe het niet moet”	214
Figuur 129. “aansluiting wand op houten dak 1”	215
Figuur 130. “aansluiting wand op houten dak 2”	216
Figuur 131. “aansluiting wand – plat dak: PE-folie met pleisterdrager”	217

Figuur 132. “aansluiting houten wand – schrijnwerk: PE-folie”	218
Figuur 133. “raam met luchtschermbekleding tijdens fabricage”	218
Figuur 134. “aansluiting raamkader: kitvoeg”	219
Figuur 135. “aansluiting vensterbank: folie of tape op cementlaag”	220
Figuur 136. “luchtstromen van en naar dakisolatie bij dakraam”	220
Figuur 137. “aansluitingsschermbekleding dakraam VELUX”	221
Figuur 138. “aansluiting stenen muur op betonmuur”	222
Figuur 139. “gordingen: plaatsing folie tijdens opbouw dak”	224
Figuur 140. “gordingen: folie luchtdicht aansluiten op balk”	224
Figuur 141. “gordingen: omhullen van balk met isolatie en folie”	225
Figuur 142. “aansluiting dampscherm bij nok”	225
Figuur 143. “aansluiting dampscherm bij kilgoot op prefabconstructie”	226
Figuur 144. “perforaties luchtdichtheidsschermbekleding voor contactdozen en inbouwspots”	227
Figuur 145. “inbouwdoos stopcontacten 1”	227
Figuur 146. “inbouwdoos stopcontacten 2”	227
Figuur 147. “doorvoer leiding PE-folie”	228
Figuur 148. “manchet PE-folie”	228
Figuur 149. “aansluiting bepleisterde schouw – dampscherm”	229
Figuur 150. “aansluiting schouw – dampscherm met plakband en manchet”	229

Lijst tabellen

Tabel 1. “invloed toepassing correctiefactoren”	21
Tabel 2. “foutenmarge bij blowerdoor metingen”	28
Tabel 3. “normen en voorschriften ivm verloop blowerdoor proef”	33
Tabel 4. “algemene gegevens testwoningen”	35
Tabel 5. “geometrische gegevens testwoningen”	36
Tabel 6. “gemeten waardes blowerdoor proef”	38
Tabel 7. “lekkage componenten ASHRAE - ramen”	49
Tabel 8. “lekkage componenten ASHRAE - deuren”	49
Tabel 9. “lekkage componenten ASHRAE – voegen schrijnwerk”	50
Tabel 10. “lekkage componenten ASHRAE - wanden”	50
Tabel 11. “lekkage componenten ASHRAE – voegen tussen plafond/muur/vloer”	51
Tabel 12. “lekkage componenten ASHRAE – voegen tussen muren”	51
Tabel 13. “lekkage componenten ASHRAE - doorboringen”	52
Tabel 14. “lekkage componenten ASHRAE - schouwen”	52
Tabel 15. “schattingsmethodes AIVC laag”	54
Tabel 16. “schattingsmethodes AIVC laag - houtskeletbouw”	54
Tabel 17. “schattingsmethodes AIVC laag - appartementen”	55
Tabel 18. “schattingsmethodes AIVC midden”	56
Tabel 19. “schattingsmethodes AIVC midden - houtskeletbouw”	57
Tabel 20. “schattingsmethodes AIVC midden - appartementen”	57
Tabel 21. “schattingsmethodes AIVC hoog”	59
Tabel 22. “schattingsmethodes AIVC hoog - houtskeletbouw”	59
Tabel 23. “schattingsmethodes AIVC hoog - appartementen”	60
Tabel 24. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage”	63
Tabel 25. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage - houtskeletbouw”	64
Tabel 26. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage - appartementen”	64
Tabel 27. “lekkage componenten ASHRAE deel 1”	67
Tabel 28. “lekkage componenten ASHRAE deel 2”	68
Tabel 29. “lekkage componenten ASHRAE deel 3”	68
Tabel 30. “schattingsmethodes ASHRAE minimum – open bebouwing”	69
Tabel 31. “schattingsmethodes ASHRAE minimum - houtskeletbouw”	70
Tabel 32. “schattingsmethodes ASHRAE minimum - appartementen”	70
Tabel 33. “schattingsmethodes ASHRAE middel – open bebouwing”	71
Tabel 34. “schattingsmethodes ASHRAE middel - houtskeletbouw”	72
Tabel 35. “schattingsmethodes ASHRAE middel - appartementen”	72
Tabel 36. “schattingsmethodes ASHRAE maximum – open bebouwing”	73
Tabel 37. “schattingsmethodes ASHRAE maximum - houtskeletbouw”	74
Tabel 38. “schattingsmethodes ASHRAE maximum - appartementen”	74
Tabel 39. “lekkage componenten SENVIVV - wanden”	76
Tabel 40. “lekkage componenten SENVIVV - schrijnwerk”	77
Tabel 41. “lekkage componenten SENVIVV - doorboringen”	77
Tabel 42. “lekkage componenten SENVIVV - andere”	78
Tabel 43. “schattingsmethodes SENVIVV – open bebouwing”	80

Tabel 44. “schattingsmethodes SENVIVV – houtskeletbouw”	81
Tabel 45. “schattingsmethodes SENVIVV – appartementen”	81
Tabel 46. “lekkage componenten IWU - regenscherm”	83
Tabel 47. “lekkage componenten IWU – afscherming isolatie”	83
Tabel 48. “lekkage componenten IWU – structurele elementen”	83
Tabel 49. “lekkage componenten IWU – afwerking binnenruimte”	84
Tabel 50. “lekkage componenten IWU - dampscherm”	85
Tabel 51. “schattingsmethodes IWU”	85
Tabel 52. “schattingsmethodes SBR – open bebouwing”	88
Tabel 53. “schattingsmethodes SBR – houtskeletbouw”	89
Tabel 54. “schattingsmethodes SBR – appartementen”	89
Tabel 55. “lekkage doorvoeren in vloeren en daken SBR”	91
Tabel 56. “lekkage componenten SBR”	91
Tabel 57. “schattingsmethodes SBR klasse 1 – open bebouwing”	93
Tabel 58. “schattingsmethodes SBR klasse 1 - houtskeletbouw”	94
Tabel 59. “schattingsmethodes SBR klasse 1 - appartementen”	94
Tabel 60. “schattingsmethodes SBR klasse 2 – open bebouwing”	95
Tabel 61. “schattingsmethodes SBR klasse 2 - houtskeletbouw”	96
Tabel 62. “schattingsmethodes SBR klasse 2 - appartementen”	96
Tabel 63. “vergelijking lekkageverdeling wanden”	110
Tabel 64. “vergelijking lekkageverdeling aansluitingen”	111
Tabel 65. “vergelijking lekkageverdeling schrijnwerk”	111
Tabel 66. “vergelijking lekkageverdeling andere”	112
Tabel 67. “lekkage componenten UGENT - wanden”	112
Tabel 68. “lekkage componenten UGENT - aansluitingen”	113
Tabel 69. “lekkage componenten UGENT - schrijnwerk”	113
Tabel 70. “lekkage componenten UGENT - andere”	114
Tabel 71. “schattingsmethodes UGENT – open bebouwing”	115
Tabel 72. “schattingsmethodes UGENT - houtskeletbouw”	116
Tabel 73. “schattingsmethodes UGENT - appartementen”	118
Tabel 74. “warmteweerstand wanden in functie van plaatsingskwaliteit”	135
Tabel 75. “warmteweerstand wanden in functie van plaatsingskwaliteit & luchtscherm”.	136
Tabel 76. “warmteweerstand Onderaan, Midden en Bovenaan het dak en de relatieve invloed van wind op de warmteweerstand op die plaatsen” ...	139
Tabel 77. “criteria voor maximaal toelaatbare luchtlekkage”	145
Tabel 78. “criteria wanden volgens NBN S01-400 ontwerp”	149
Tabel 79. “eigenschappen voegen naar akoestiek en luchtdoorlatendheid toe”	155
Tabel 80. “schatting infiltratie natuurlijk verluchte woningen prEN 832”	158
Tabel 81. “schatting infiltratie in functie van beschutting en aantal verdiepingen”	160
Tabel 82. “aangewezen ventilatiesysteem in functie van luchtdichtheid – H.Hens”	175

1) Theorie

1.1) Inleiding

De luchtdoorlatendheid van de gebouwschil heeft een belangrijke invloed op het energieverbruik van een gebouw. Hoeveel energie door infiltratie en exfiltratie precies verloren gaat kan niet zonder meer gemeten worden. Dit is afhankelijk van de luchtdichtheid van het gebouw, de gewoontes van de bewoners, de winddrukken die voorkomen op de gebouwschil, de binnen- en buitentemperaturen...

Men kan dus onmogelijk door een simpele meting deze energieverliezen bepalen. Nu zijn er twee mogelijkheden die zich aanbieden. We kunnen de werkelijke luchtdebieten meten die gedurende een bepaalde periode door winddrukken door de gebouwschil gedrukt worden met gebruik van de tracer-gas methode. Deze methode heeft het voordeel dat we de werkelijk voorkomende debieten kennen, en zodoende vrij nauwkeurig de werkelijke energieverliezen kunnen bepalen door in- en exfiltratie. Deze meting duurt echter nogal lang, is niet eenvoudig, zegt niets over de spreiding van lekken, is afhankelijk van de specifieke meteorologische omstandigheden, en de resultaten zijn moeilijk onderling vergelijkbaar.

Een tweede mogelijkheid bestaat in het gebruik van een blowerdoor. Door een overdruk te realiseren over de gebouwschil kan gemeten worden welk volume lucht gedurende een periode bij bepaalde druk door de gebouwschil geperst wordt. Deze methode heeft als voordeel dat de meting snel kan gebeuren, dat ze goedkoop is, de individuele lekken kunnen gesitueerd worden en de resultaten zijn onderling goed vergelijkbaar.

1.2) Blowerdoor meting

Internationaal wordt de luchtdichtheid van een gebouw bijna altijd getest door een drukproef waarbij een statische overdruk gerealiseerd wordt over de gebouwschil. In Zweden is de eerste statische drukproef al in 1977 uitgevoerd, en er bestaat een normering voor het verloop van drukproeven sinds 1980 [1]. De beproeving met een blowerdoor is internationaal een standaard geworden. Bijna alle gebruikte grootheden ter beschrijving van luchtdichtheid van gebouwen zijn dan ook gebaseerd op proeven met blowerdoors.



Figuur 1. “Opstelling blowerdoor”

1.2.1) Grootheden

1.2.1.0 Inleiding

Naast de vraag ‘hoe’ luchtdichtheid gerealiseerd kan worden, is het ook van belang te kijken welke karakteristieke waarde de luchtdichtheid van een gebouw het best kan weergeven. Zo een grootheid heeft als doel een complexe samenhang van bepalende elementen op een eenvoudige manier te kwantificeren. Op die manier kan er een meetmethode vooropgesteld worden om deze grootheid te bepalen, en kunnen resultaten van verschillende proeven onderling vergeleken worden.

Zo een grootheid mag enkel afhangen van relevante parameters. Toevallige externe invloeden moeten zoveel mogelijk uitgeschakeld worden, omdat een onderlinge vergelijking van testresultaten anders onzinnig zou zijn en valse informatie zou opleveren.

Het meten van luchtdichtheid is vooral interessant met betrekking tot het kwantificeren van energieverliezen, het vermijden van schadegevallen en het verhogen van het comfort. Zoals gezegd kunnen we de energieverliezen niet afleiden uit een enkele ‘luchtdichtheidswaarde’. Ook de mogelijke kans op bouwschade of comfortvermindering kunnen we niet tot uiting brengen door een enkele meetwaarde op te tekenen. Deze hangen namelijk vooral af van de lokale verdeling van lekken, en de absolute grootte van kieren en spleten. Een eenvoudige meetmethode op basis van enkele parameters kan onmogelijk in één getalwaarde zo gedetailleerde informatie leveren.

Een luchtdichtheidsmeting is veeleer een beproeving van de uitvoeringskwaliteit van het luchtdichtheidsscherm. Om de kwaliteit van dat luchtdichtheidsscherm te vergelijken moeten we een meetgrootheid kiezen die de luchtdichtheid van de buitenschil van een gebouw als belangrijkste parameter heeft.

De stroming door gaten, kieren en spleten kunnen we volledig definiëren door 3 onbekenden: het drukverschil over de opening, de geometrie van de opening en het volume lucht dat erdoor geperst wordt. Als twee van de drie parameters gekend zijn, kan de derde berekend worden. De correcte formule [2] om luchtstroming door openingen te beschrijven is:

$$\dot{V} = C_d A \left(\frac{2}{\rho} \Delta p \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

maar in praktijk blijkt deze minder eenvoudig bruikbaar dan de stromingvergelijking die algemeen gehanteerd wordt bij de verwerking van drukproeven [3] [4]:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

waarbij $\dot{V}$ = luchtvolumestroom [m³/h]
 C = stromingscoëfficiënt [m³/(h Paⁿ)]
 C_d = weerstandsgetal [-]
 A = oppervlakte van de opening [m²]
 ρ = massadichtheid lucht [kg/m³]
 Δp = drukverschil [Pa]
 n = stromingsexponent [-]

De gegeven stromingsvergelijking is slechts benaderend voor de realiteit. De verkregen stromingsexponent en stromingscoëfficiënt zijn afhankelijk van het interval waarover het element beproefd wordt, en zijn aldus niet rechtstreeks afgeleid van de geometrie van de opening. Bij onze berekeningen hebben we steeds met hetzelfde interval van drukverschillen te maken, en is de afwijking ten opzichte van de werkelijke volumestromen minimaal.

$\dot{V}$ en Δp worden rechtstreeks gemeten bij de blowerdoor proef, C en n kunnen dan met behulp van de kleinste kwadratenmethode afgeleid worden uit die testresultaten.

C is een constante die afhankelijk is van de geometrie van de opening en doorgang, het is ook het debiet bij een drukverschil van 1 Pa.

n is een waarde die afhankelijk is van het stromingsregime in de doorgang. Als hier een laminair regime heerst, zal n gelijk zijn aan 1, als er een turbulent regime is, zal n gelijk zijn aan 0.5. Fijne lange doorgangen zullen pas bij zeer hoge drukverschillen turbulente regimes vertonen. Bij brede, grote openingen, zal er al bij lage drukverschillen sprake zijn van turbulente regimes. Naarmate de stroming laminair is zal er dus relatief meer lucht door de opening vloeien. Bij een constante druk zullen grote openingen een lage n -waarde hebben, turbulent, en fijne openingen een grote n -waarde, laminair. Uit een meting over de totale

gebouwschil, verkrijgen we een gemiddelde n waarde over alle openingen. In de praktijk blijkt deze meestal tussen 0.6 en 0.7 te liggen.

Theoretisch kan men stellen dat hoe groter deze waarde is, hoe minder turbulent het regime en hoe kleiner de openingen zullen zijn. Hoe lager de n -waarde, des te groter de spleten en openingen zullen zijn. Natuurlijk kunnen enkele openingen door hun absolute grootte een vertekend beeld geven. Aangezien de lekverdeling niet of nauwelijks gekend is, laat staan de absolute grootte van individuele lekken, kan men zeer moeilijk uitspraken doen over de vorm en afmetingen van de spleten aan de hand van bepaalde n -waardes.

1.2.1.1 Luchtwisseling bij $\Delta p = 50\text{Pa}$ (n_{50} -waarde) [3] [5] [6] [7]

Engels: ACH_{50} (Air Changes per Hour)

Duits: Volumenbezogene Luftdurchlässigkeit n_{50}

De n_{50} -waarde is de meest voorkomende grootheid om de luchtdichtheid van een gebouw te karakteriseren. Het is de verhouding van het volume lucht bij een drukverschil van 50 Pascal door de gebouwschil gedurende één uur, gedeeld door het binnenvolume van het gebouw.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{b, geb}} [h^{-1}]$$

waarbij: n_{50} = luchtwisselingen per uur bij $\Delta p = 50\text{Pa}$ [h^{-1}]

$\dot{V}_{50}$ = luchtvolumestroom bij $\Delta p = 50\text{Pa}$ [m^3/h]

$V_{b, geb}$ = het binnenvolume van het gebouw [m^3]

Deze n_{50} -waarde is zeer sterk afhankelijk van de manier waarop het binnenvolume berekend wordt, daarop komen we in 1.2.1.11.1 nog terug. In ieder geval moet bij elke berekening duidelijk aangegeven worden welke delen zich binnen dit volume bevinden, en welke delen er buiten. De begrenzing van dit volume moet in overeenstemming zijn met de praktische testuitvoering. De architect of ingenieur dient de grenzen te bepalen van het beschermde volume, en overeenkomstig dient de berekening van het binnenvolume deze grenzen te respecteren. Bij twijfel waar het luchtdichtheidsscherm zich bevindt, kunnen eventueel meerdere testen gedaan worden, waarna de n_{50} -waarde dan ook berekend wordt met verschillende binnenvolumes.

De luchtvolumestroom wordt gemeten tijdens de proefneming door gekalibreerde apparatuur.

In Engelstalige teksten wordt meestal de eenheid Cubic Feet per Minit CFM gebruikt. Deze kan omgerekend worden naar de eenheid m³/h door de formule:

$$1 \text{ CFM} = 1.699 \text{ m}^3/\text{h}$$

Waarbij: 1 voet = 0.3048 m

1.2.1.2 Oppervlakte afhankelijke luchtdoorlatendheid bij $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ (q_{50})

Engels: Minneapolis Leakage Ratio MLR

Duits: Hüllflächenbezogene Luftdurchlässigkeit q_{50} of VFB_{50}

Een andere mogelijkheid om de luchtdichtheid van een gebouw te specificeren, is de luchtvolumestroom te delen door de totale wandoppervlakte die het beschermde volume begrenst [5] [8] [9] [10]. Dit debiet geeft dan het gemiddelde volume lucht dat per uur door 1m² wandoppervlakte wordt gedrukt.

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_{geb}} \text{ [m}^3/(\text{h m}^2) \text{]}$$

waarbij: q_{50} = luchtvolumestroom per vierkante meter [m³/(h m²)]

$\dot{V}_{50}$ = luchtvolumestroom bij $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ [m³/h]

A_{geb} = wandoppervlakte van het gebouw [m²]

Ook hier dient opgemerkt te worden dat de gemeten oppervlakte een zeer grote invloed heeft op de uiteindelijk bekomen q_{50} -waarde. Het is vooralsnog niet in normen vastgelegd hoe deze oppervlakte moet berekend worden. Het al dan niet in rekening brengen van de kelderwanden, schoorsteenoppervlaktes en andere kan het resultaat sterk beïnvloeden. Een duidelijke normering terzake dringt zich dan ook op. Internationaal bestaan geen uniforme regels hieromtrent.

Een q_{50} -waarde kan gelezen worden als een maat voor de gemiddelde luchtdichtheid per vierkante meter van de toegepaste materialen. In de West-Europese bouwwijze zijn het echter niet de bouwmaterialen maar vooral de verwerkingsmethode van deze materialen die de luchtdichtheid zullen bepalen. Deze kenwaarde kan voor in situ proeven dus onmogelijk herleid worden tot een materiaaleigenschap.

1.2.1.3 Luchtvolumestroom bij $\Delta p = 10 \text{ Pa}$ (q_{v10}) [11] [12] [13] [17] [69]

Deze grootheid wordt enkel in Nederland gebruikt, als karakteristieke waarde voor luchtdichtheid bij de invoer in EPR-rekenprogramma's. De waarde q_{v10} staat voor het totale volume lucht dat per seconde door de gebouwhuid gedrukt wordt bij een drukverschil van 10 Pa. Op zich is deze waarde niet representatief, omdat ze niet gerelateerd is aan de grootte van het gebouw. In de Nederlandse normen wordt deze waarde dan ook gekoppeld aan het binnenvolume van het gebouw.

Voor luchtdichtheidsklasse 1 geldt bvb:

Woningvolume tot 250 m^3	maximale $q_{v10} = 100 \text{ dm}^3/\text{s}$
Woningvolume tussen 250 m^3 en 500 m^3	maximale $q_{v10} = 150 \text{ dm}^3/\text{s}$
Woningvolume groter dan 500 m^3	maximale $q_{v10} = 200 \text{ dm}^3/\text{s}$

Anderzijds worden ook aanbevelingen gemaakt op basis van het lekkagedebiet per vierkante meter. Een richtwaarde voor de karakteristieke luchtdoorlatendheid bij natuurlijke ventilatie is $1,43 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$.

In Nederland rekent men met een drukverschil van 10 Pa, omdat volgens NEN 2687 'het gemiddelde drukverschil over de voor de ventilatie bepalende opening' gelijk is aan 8 Pa, wat wordt afgerond naar 10 Pa [17]. Dit ligt natuurlijk dicht bij de werkelijkheid dan 50 Pa, maar het is minder eenvoudig om deze waarde te meten omdat de relatieve afwijking door wind en temperatuursverschillen groter wordt. Ook de callibratie van de meettoestellen is meestal minder nauwkeurig bij lagere drukverschillen (zie 1.2.3), en de absolute fout door aflezing wordt groter.

We kunnen deze waarde relateren aan andere grootheden aan de hand van volgende formules:

Uit NEN 5128: $C = q_{v10} / 10^n [\text{ dm}^3/\text{s}]$

Dus: $V_{50} = q_{v10} \cdot (50^n / 10^n) \cdot 3600 / 1000 [\text{ m}^3/\text{h}]$

$$V_{50} = q_{v10} \cdot 3,6 \cdot 5^n [\text{ m}^3/\text{h}]$$

Stellen we nu $n = 0.625$ [17], dan krijgen we

$$V_{50} = 9,84 q_{v10} [\text{ m}^3/\text{h}]$$

Willen we dit nu relateren aan de n_{50} -waarde:

$$n_{50} = q_{50} / V_{\text{net,geb}} [1/\text{h}]$$

$$V_{50} = C \cdot 50^n \text{ [m}^3\text{/h]}$$

En $n_{50} = 9,84 \cdot q_{v10} / V_{\text{net,geb}} \text{ [1/h]}$

Waarbij $V_{\text{net,geb}} = \text{netto binnenvolume van het gebouw [m}^3\text{]}$

1.2.1.4 Effectieve lekoppervlakte (ELA of ELA₄) [3] [9] [14]

Engels: ELA (Effective Leakage Area)

Duits: Effektive Leckfläche

De effectieve lekoppervlakte is de oppervlakte van een opening in een dunne plaat (weerstandsgetal $C_d = 1$) die bij een overdruk hetzelfde volume lucht doorlaat per uur als de gebouwschil. Deze waarde wordt vooral in de Verenigde Staten en Canada gebruikt: men gaat niet uit van een n_{50} -waarde, maar extrapoleert deze als het ware naar een n_4 -waarde. Men bekomt aldus het volume dat per uur door de gebouwschil geperst wordt ten gevolge van een overdruk van 4 Pa. Dit ligt dicht bij de werkelijk optredende luchtdrukvariaties over een gebouwschil, maar het nadeel is dat de extrapolatie naar zo lage drukverschillen grote onnauwkeurigheden met zich kan meebrengen, hierop komen we later nog terug. Deze methode wordt gebruikt in het 'Lawrence Berkeley Laboratory's infiltration model' (zie 7.2.3).

Uit de hydrodynamica [2] weten we door de formule van Bernoulli:

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = C^{te} \text{ [-]}$$

waarbij $p = \text{de absolute druk [Pa]}$

$\rho = \text{massadichtheid fluïdum [kg/m}^3\text{]}$

$g = \text{graviteitconstante (= 9.81 in Gent) [m/s}^2\text{]}$

$h = \text{hoogte ter berekening van potentiële energie [m]}$

$v = \text{snelheid van het fluïdum [m/s]}$

Nu beschouwen we een lek over de gebouwschil met de formule van Bernoulli. De hydrodynamische druk aan de ene zijde van de opening zal gelijk zijn aan de hydrodynamische druk aan de andere zijde van de opening (want is steeds C^{te}) We mogen het hoogteverschil tussen de binnenzijde en de buitenzijde van het lek verwaarlozen, dus $\rho gh = 0$. Aangezien we een drukverschil realiseren over de gebouwschil van 50 Pa, kunnen we de absolute drukken hierdoor vervangen.

We krijgen dus

$$\Delta p = C_{te} \frac{1}{2} \rho v^2$$

als we dit extrapoleren naar een geheel gebouw (waarbij $\dot{V}$ wordt uitgedrukt in m³/s):

$$\Delta p = \frac{C_{te}}{A^2} \frac{1}{2} \rho \dot{V}^2$$

Dit kunnen we omrekenen naar de algemene formule die luchtstroming door een opening

beschrijft:
$$\dot{V} = C_d A \left(\frac{2}{\rho} \Delta p \right)^{\frac{1}{2}}$$

en na omrekening:
$$A = \frac{1}{C_d} \left(\frac{\rho}{2 \Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}$$

Specifiek voor de effectieve lekoppervlakte te berekenen stellen we C_d nu gelijk aan 1:

$$ELA(\Delta p) = \left(\frac{\rho}{2 \Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}(\Delta p)$$

waarbij: $ELA(\Delta p)$: effectieve lekoppervlakte bij bepaalde druk [m²]

Stellen we Δp gelijk aan 4 Pa, en houden we rekening met omrekenfactoren

$$ELA(4 Pa) = \frac{1}{0,36} \left(\frac{1,226}{2.4} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}(4 Pa) = 1,087 \frac{cm^2}{m^3/h} \cdot \dot{V}(4 Pa)$$

Waarbij: 1/0,36 = factor om de eenheden te converteren [-]

$\rho = 1,226$ [kg/m³] in overeenstemming met NBN B03-002

Een meer algemene formule vinden we in [18] *Technical note AIVC 44*:

$$ELA_4 = C_4^{n-\frac{1}{2}} \left(\frac{\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Het mag duidelijk zijn dat deze ‘effectieve’ lekoppervlakte niet te verwarren is met de som van alle oppervlaktes van alle lekken. De berekende ELA is een rekenwaarde, bij een geëxtrapolerde waarde van 4Pa, en met aanname van $C_d = 1$. De werkelijke luchtstromen zijn veel te complex om dergelijke vereenvoudigingen te kunnen doorvoeren.

Wij raden echter af om deze grootheden te gebruiken. Als men proefnemingen doet bij 50 Pa, en men extrapoleert daaruit volumestromen bij 4 Pa, dan kunnen er grote afwijkingen

voorkomen. Door onnauwkeurige callibratie bij lagere toerentallen kunnen fouten optreden tot 40% [9]. Het is bovendien niet eenvoudig om de afstelling van het blaastoestel te controleren, en zodoende kan men de meetfout niet corrigeren door gebrek aan gegevens. Dit geldt voor alle grootheden die gebruik maken van extrapolatie naar lagere drukverschillen.

In Angelsaksische landen wordt vaak gerekend met square inches:

$$1 \text{ inch}^2 = 6,4516 \text{ cm}^2$$

waarbij: $1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$

1.2.1.5 Equivalente lekoppervlakte (EqLA of EqLA₁₀) [3] [9]

Engels: Equivalent Leakage Area EqLA

Duits: Äquivalente Leckfläche

De equivalente lekoppervlakte is vergelijkbaar met de effectieve lekoppervlakte, met dat verschil dat er met een drukverschil van 10 Pa ipv 4 Pa gerekend wordt, en dat de opening in de plaat nu scherpe kanten heeft, waardoor $C_d = 0,61$. Ook hier wordt de waarde $\dot{V}(10 \text{ Pa})$ geëxtrapoleerd uit de blowerdoor testen bij hogere drukverschillen.

Vertrekken we opnieuw van de formule:

$$A = \frac{1}{C_d} \left(\frac{\rho}{2\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}$$

krijgen we
$$EqLA(\Delta p) = \frac{1}{0,61} \left(\frac{\rho}{2\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}(\Delta p) \text{ [cm}^2 \text{]}$$

waarbij: $EqLA(\Delta p)$ = equivalente lekoppervlakte [cm²]

$\dot{V}(\Delta p)$ = luchtvolumestroom [m³/s]

Na het converteren van eenheden in invullen van het drukverschil van 10 Pa krijgen we:

$$EqLA(10 \text{ Pa}) = \frac{1}{0,36} \frac{1}{0,61} \left(\frac{1,226}{2,10} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}(10 \text{ Pa}) = 1,127 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^3/\text{h}} \dot{V}(10 \text{ Pa})$$

Indien we de equivalente lekoppervlakte zouden berekenen bij een drukverschil van 50 Pa,

bekomen we:
$$EqLA(50 \text{ Pa}) = \frac{1}{0,36} \frac{1}{0,61} \left(\frac{1,226}{2,50} \right)^{\frac{1}{2}} \dot{V}(50 \text{ Pa}) = 0,5 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}^3/\text{h}} \dot{V}(50 \text{ Pa})$$

:

1.2.1.6 Genormaliseerde lekoppervlakte (NLA₄) [3] [9]

Duits: Normalisierte Leakagefläche NLA₄

De genormaliseerde lekoppervlakte is de verhouding tussen de effectieve lekoppervlakte tot de totale wandoppervlakte die het beschermde volume begrenst. Deze waarde wordt onder andere gebruikt in de Canadese voorschriften voor luchtdichtheidsmetingen.

Definitie:
$$NLA_4 = \frac{ELA_4}{A_{geb}} [cm^2 / m^2]$$

Waarbij: NLA₄ = genormaliseerde lekoppervlakte bij 4 Pa [cm²/m²]

ELA₄ = effectieve lekoppervlakte bij 4 Pa [cm²]

A_{geb} = wandoppervlakte van het gebouw [m²]

1.2.1.7 Genormaliseerde lekoppervlakte (NLA₁₀) [3] [9]

Engels: Leakage Ratio [inch² / foot²]

Duits: Normalisierte Leakagefläche NLA₁₀

De genormaliseerde lekoppervlakte is de verhouding tussen de equivalente lekoppervlakte tot de totale wandoppervlakte die het beschermde volume begrenst. Deze waarde wordt onder andere gebruikt in de Canadese voorschriften en wordt beschreven in de Canadese norm CAN/CGSB 149.10 M86

Definitie:
$$NLA_{10} = \frac{EqLA_{10}}{A_{geb}} [cm^2 / m^2]$$

Waarbij: NLA₁₀ = genormaliseerde lekoppervlakte bij 10 Pa [cm²/m²]

EqLA₁₀ = equivalente lekoppervlakte bij 10 Pa [cm²]

A_{geb} = wandoppervlakte van het gebouw [m²]

In Angelsaksische landen wordt gerekend met inch²/voet²:

$$\begin{aligned} 1 \text{ inch}^2/\text{voet}^2 &= 6,4516 \text{ cm}^2/0.0929\text{m}^2 \\ &= 69.45 \text{ cm}^2/\text{m}^2 \end{aligned}$$

waarbij: 1 inch = 2.54 cm

1 voet = 0.3048 m

1.2.1.8 Genormaliseerde lekoppervlakte (NLR₇₅) [19]

Engels: Normalised Leakage Ratio NLR₇₅

Deze grootheid is vergelijkbaar met de q_{v10} -waarde die gebruikt wordt in de Nederlandse normen, maar het drukverschil bedraagt hier 75 Pa in plaats van 10 Pa. De gemeten luchtvolumestroom bij een drukverschil van 75 Pa wordt gedeeld door de totale gebouwschiloppervlakte. Deze grootheid wordt vooral in Canada gebruikt. Willen we deze gegevens nu relateren aan andere grootheden bekomen we de volgende formules:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

En
$$\text{NLR}_{75} = V_{75} / A \quad [\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})]$$

$$V_{75} = C \cdot 75^n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$V_{50} = C \cdot 50^n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Dus
$$V_{50} = V_{75} \cdot (50^n / 75^n) \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$V_{50} = V_{75} \cdot 0.66^n$$

Stellen we nu $n = 0.625$ [17] , dan krijgen we

$$V_{50} = 0.776 \cdot V_{75} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

1.2.1.9 Vloeroppervlakte afhankelijke luchtdoorlatendheid bij $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ [9]

Engels: CFM₅₀ / square foot of floor area

Duits: Nettogrundflächbezogener Volumenstrom NBV₅₀

Deze grootheid is een maat voor het volume uitgeperste lucht per vierkante meter vloeroppervlakte. Indien men deze waarde vermenigvuldigt met de gemiddelde verdiepingshoogte bekomt men bij benadering het aantal volumewisselingen per uur n_{50} .

Definitie:
$$\text{NBV}_{50} = \frac{\dot{V}}{A_n} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

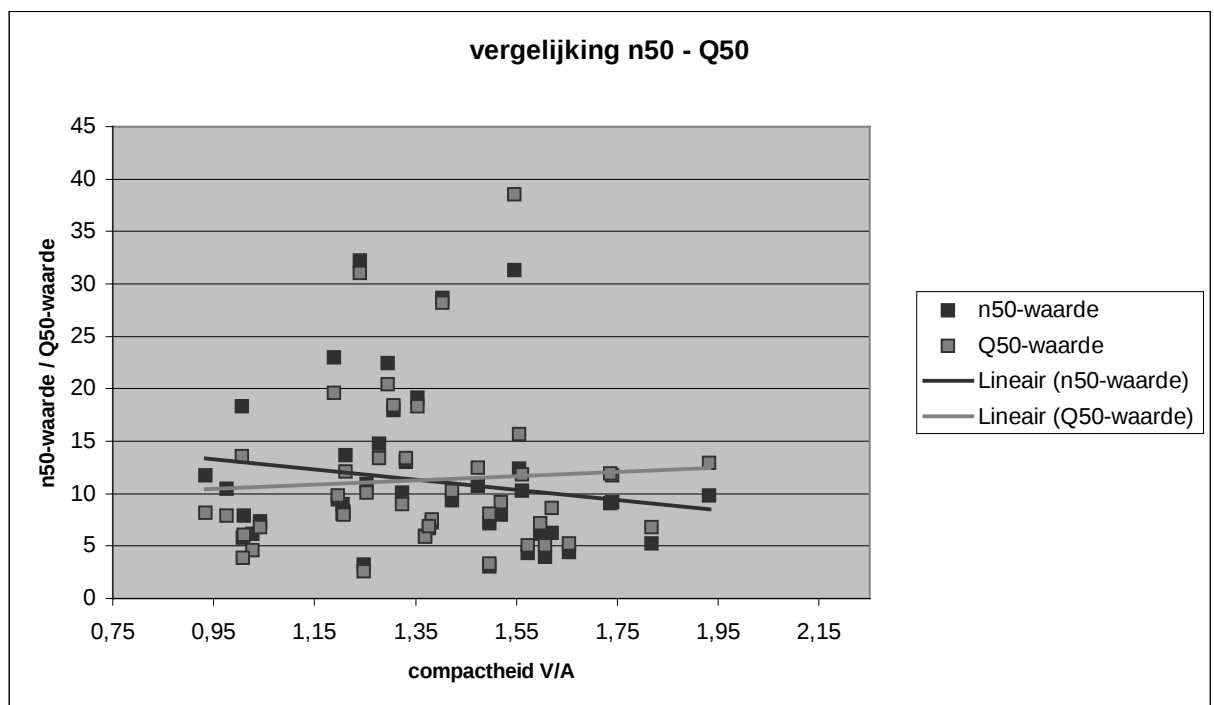
Waarbij: NBV_{50} = vloeroppervlakte afhankelijke luchtdoorlatendheid $[\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})]$

$$A_n = \text{netto vloeroppervlakte} \quad [\text{m}^2]$$

1.2.1.10 Discussie over de grootheden

Een grootheid om luchtdichtheid te beschrijven, moet vooral afhankelijk zijn van fysische parameters die betrekking hebben op de luchtdichtheid van de gebouwschil. Hoe sterker deze varieert door externe factoren, hoe moeilijker resultaten onderling vergelijkbaar zijn. De meeste grootheden zijn echter ook afhankelijk van de geometrie van een gebouw, het is dus interessant te kijken hoe groot de invloed van de geometrie is, en wat de meest significante grootheid is om luchtdichtheid van gebouwen te beschrijven.

De meest gebruikte grootheden zijn de n_{50} -waarde en de q_{50} -waarde. De vraag is nu of de lucht volumestroom gerelateerd moet worden aan gebouwschiloppervlakte of aan het netto binnenvolume van de woning. Daarom is het interessant de resultaten van de SENVIVV-studie [20] [21] te gebruiken om deze grootheden te vergelijken, zoals weergegeven in figuur 2.



Figuur 2. “vergelijking n_{50} – q_{50} in het kader van de SENVIVV-studie”

De compactheid varieert van 0,93 tot 1,93, met een gemiddelde van 1,37. Het binnenvolume van een woning is gemiddeld gelijk aan 1,37 maal de gebouwschiloppervlakte. Woningen met een grote compactheid zullen dus voordeel hebben als met de n_{50} -waarde gerekend wordt: als men deelt door het binnenvolume zal de getalwaarde kleiner zijn. Stel dat we twee woningen hebben van 500m^3 binnenvolume, de een met een compactheid van 0,93, de andere een

compactheid van 1.93. De eerste woning zal een gebouwschiloppervlakte hebben gelijk aan 538m², de andere 259m². Als men de luchtdichtheid uitdrukt aan de hand van een q₅₀-waarde dan lijkt de niet-compacte woning opeens meer dan twee maal luchtdichter dan de compacte woning.

De n₅₀-waarde kan men omrekenen naar een aantal volumewisselingen per uur bij andere drukverschillen dan 50 Pa, en dit zal interessant blijken met betrekking tot infiltratie. De q₅₀-waarde is veeleer een indicator voor de uitvoeringskwaliteit van de gebouwschil. Bovendien is het aandeel van de wanden in de totale lekkage te klein opdat een gemiddelde waarde echt een praktische betekenis zou hebben (zie 4.2 en 5.3)

Bij de berekening van het K-peil van een woning, is volgens[22] NBN B62-301:

$$K = U_s \frac{300}{\frac{V}{A} + 2}$$

Men belooft op die manier compacte woningen: hoe groter de compactheid, hoe lager het K-peil. Een compacte woning heeft een kleiner verliesoppervlak, en zal minder energie vergen om warm gehouden te worden. Het is dan ook logisch dat een regelgeving inzake luchtdichtheid eerder compactheid zal belonen.

Daarom is de n₅₀-waarde het meest geschikt inzake regelgeving. Bovendien kan men luchtdichtheid enkel een praktische betekenis geven door deze om te rekenen naar infiltratie en exfiltratie.

1.2.1.11 Vastleggen van meetgegevens

De Zweedse norm SS 02 15 51 schrijft voor dat alle vertrekken die verwarmd kunnen worden tot boven 10°C moeten ingesloten worden in het beschermde volume [9] [23]. Tijdens de meting moet het drukverschil tussen de verschillende ruimtes nul zijn, dus moeten alle binnendeuren open staan. In sommige gevallen kan het nuttig zijn van de Zweedse norm af te wijken, afhankelijk van de conceptie van het gebouw en de ligging van het luchtdichtheidsscherm. Ook indien men de luchtdichtheid wil testen in functie van de verluchttingsinstallatie is het nuttig bepaalde ruimtes uit te sluiten. Indien men de oppervlakteafhankelijke luchtdoorlatendheid (q₅₀) wil testen om uitspraken te doen over het

luchtdichtheidsscherm, dan moet het beschermde volume beschouwd worden als dat deel dat door dat scherm omsloten wordt. Dus als dat scherm in het dak zit, moet men vb het luik naar de zolder openlaten om een ideale doorstroming te hebben.

1.2.1.11.1 Volume

In de Belgische norm NBN D50-001 [24] staan grenzen voor de n_{50} -waarde voor woningen met verluchttingsinstallatie. We moeten dus de volumestroom lucht aan de ventilator meten, en het volume van het gebouw. Het volume is bepaald als de som van alle ruimtes die zich binnen de luchtdichtheidsschermen bevinden. Het scherm bevindt zich meestal aan de binnenzijde van een wand (vb bij houtskeletbouw, of pleisterwerk bij massiefbouw), dus men kan gemakkelijkheidshalve de netto vloeroppervlakte vermenigvuldigen met de gemiddelde hoogte om zo het binnenvolume te bekomen. Men houdt geen rekening met nissen van deuren en ramen, en het volume van meubilair wordt niet afgetrokken. Om het meetwerk te verlichten vermenigvuldigt men soms het buitenvolume met 0.8 om het binnenvolume te bekomen [9]. Deze werkwijze wordt echter afgeraden, omdat de verhouding tussen binnen- en buitenvolume zeker niet constant is voor verschillende gebouwen en constructiemethoden. Uit ons eigen onderzoek blijkt de variatie hier zeer groot te zijn. Bovendien is de bepaling van het binnenvolume erg belangrijk met betrekking tot de uiteindelijke n_{50} -waarde, dus ruwe schattingen raden we ten stelligste af.

Volgens prEN 13829 moet men geen rekening houden met het volume van de binnenmuren. Hier zal men de bruto binnenoppervlakte vermenigvuldigen met de verdiepingshoogte (is gelijk aan de kamer hoogte plus de dikte van de vloerplaat). Voor de tien woningen die wij getest hebben blijkt het bruto binnenvolume (volgens prEN 13829) 11.3% groter te zijn dan het netto binnenvolume. Dit is dus een belangrijk verschil: als men gegevens vergelijkt moet men goed weten hoe het binnenvolume bepaald is.

.

1.2.1.11.2 Gebouwschiloppervlak

In principe moet men rekenen met de oppervlakte van het luchtdichtheidsscherm. In praktijk rekent men vaak met het binnenoppervlak van de gebouwschil. Dus ook de aansluitingen van muren op vloeren en dergelijke behoren tot dat oppervlak. Bij rijwoningen is ook de gemene muur onderdeel van het gebouwschiloppervlak en bij appartementen zijn ook de vloer en het plafond onderdeel van dat oppervlak. Er bestaat discussie over het al dan niet in rekening

brenge van keldermuren: dit zal afhangen van het feit of de kelder al dan niet beschouwd wordt als een geconditioneerde ruimte. We kunnen ons inderdaad afvragen of het zinvol is de wanden van appartementen in rekening te brengen. Onder normale meteorologische omstandigheden zal er zo goed als geen drukverschil bestaan tussen appartementen onderling.

1.2.2) Correctiefactoren

De hier beschreven correctiemethode is in overeenstemming met de norm ISO/DIS 9972.

Meestal hebben de binnen- en buitentemperaturen verschillende waarden. Bij een blowerdoor test wordt een hoeveelheid binnenlucht met constant debiet vervangen door buitenlucht. Deze twee stromen zijn in absolute massa gelijk aan elkaar, maar niet in volume [9] [25]. De massadichtheid van koude lucht is hoger dan de massadichtheid van warme lucht. Dit verschil is zo groot dat de resultaten van de test aangepast moeten worden. Door omrekening worden de equivalente waarden bekomen zoals de test deze zou opleveren bij normomstandigheden. Dit is ook de enige betrouwbare basis om verschillende metingen onderling te vergelijken. Op die manier wordt de invloed van toevallige variaties geweerd: de ‘luchtdichtheid’ als meetgegeven mag enkel parameters bevatten die in relatie staan tot de specifieke constructieve eigenschappen van een gebouw .

In onderstaande berekeningen worden volgende indexen gebruikt:

G = index voor meetinrichting van het blaastoestel (Gebläse)

H = index voor eigenschappen van de gebouwschil (Hülle)

K = index voor gekalibreerde meetwaarden (Kalibriert)

N = index voor genormeerde meetwaarden (Normen)

In de berekeningen wordt de massadichtheid van de lucht in verscheidene formules gebruikt: deze is afhankelijk van de absolute luchtdruk, partiële waterdampdruk en de temperatuur. Volgens ISO/DIS 9972, annex B bekomen we hiervoor de formule [2]:

$$\rho = \frac{p_{bar} - (0,37802 \cdot p_D)}{287,055 \cdot T} \quad \left[\frac{kg \cdot K}{m^3 \cdot Pa} \right]$$

Waarbij: $p_{\text{bar}} = \text{luchtdruk [Pa]}$
 $p_D = \text{partiële waterdampdruk [Pa]}$
 $T = \text{absolute temperatuur [K]}$

Uit onze berekeningen kunnen we opmaken dat de invloed van de relatieve vochtigheid op de uiteindelijke correctiefactor gemiddeld gelijk is aan 0.3%, dus verwaarloosbaar klein.

Voor de dynamische viscositeit [9] geldt volgens ISO/DIS 9972, annex B:

$$\mu = \frac{b \cdot T^{\frac{1}{2}}}{1 + \frac{s}{T}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s.m}} \right]$$

Waarbij: $b = 1,459 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{kg}}{\frac{\text{s.m}}{\text{K}^{0.5}}} \right]$
 $s = 110,4 \text{ [K]}$

Zoals gezegd kunnen we uit de formule van Bernoulli [2] afleiden:

$$\Delta p = C^{te} \frac{1}{2} \rho \dot{V}^2$$

Waarbij: $\Delta p = \text{gemeten drukverschil over gebouwschil [Pa]}$
 $\rho = \text{massadichtheid van de lucht [kg/m}^3 \text{]}$
 $\dot{V} = \text{luchtvolumestroom [m}^3/\text{h]}$

verder geldt: $\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$

Waarbij: $\dot{m} = \text{massastroom [kg/h]}$

Daaruit volgt: $\Delta p = \frac{C^{te}}{2 \cdot \rho} \dot{m}^2$ of nog $\dot{m} = \left(\frac{\Delta p \cdot 2 \cdot \rho}{C^{te}} \right)^{\frac{1}{2}}$

Als we kijken naar een specifieke luchtstroom, weten we dat de absolute massastromen dezelfde zijn, maar de volumestromen verschillend. Nu weten we dat de constante enkel afhankelijk is van de geometrie van de opening. Bij eenzelfde drukverschil, maar met massadichtheden ρ_1 en ρ_2 voor binnen- en buitenlucht kunnen we uit vorige formule afleiden:

$$\frac{\dot{m}(\rho_1)}{\dot{m}(\rho_2)} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

De effectieve massastroom $\dot{m}_G$ met massadichtheid ρ_G die aan het blaastoestel wordt gemeten moeten we nu aanpassen aan de gegevens waarbij het meettoestel gekalibreerd is [26]. Het toestel zal onder de omstandigheden waarvoor het gekalibreerd is aangeven dat bij hetzelfde drukverschil een massastroom $\dot{m}_G$ met massadichtheid ρ_G gemeten wordt. Uit vorige formule kunnen we nu afleiden:

$$\dot{m}_G(\rho_G) = \dot{m}_G(\rho_K) \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_K} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Een meetsysteem meet dus noch de volumestroom noch de massastroom onafhankelijk van de dichtheid. Bij koude temperaturen is de massadichtheid van de lucht groter, en dus zal de massastroom groter worden, en de volumestroom relatief kleiner.

Als we deze theorie nu toepassen op een gebouw, moeten we rekening houden met de verschillende stromingsregimes die mogelijk zijn. Indien we te maken hebben met een volledig turbulente stroming, waarbij de stromingsexponent n gelijk is aan 0.5, dan kunnen we de formules onmiddellijk toepassen voor de gehele gebouwschil. Bij meer laminaire stroming zal de stromingsexponent n groter zijn dan 0.5, en zal de dynamische viscositeit μ van de laminaire stroming invloed hebben op de absolute massa- en volumestroom.

We kunnen nu de equivalente volumestroom $\dot{V}_H(\rho_N)$ onder normomstandigheden afleiden uit de gemeten volumestroom $\dot{V}_H(\rho_H)$ door de gebouwschil tijdens de proef, uitgevoerd bij dezelfde drukverschillen, volgens de Duitse norm ISO/DIS 9972:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Waarbij: μ = dynamische viscositeit [kg/m.s]

Door substitutie van de formule $\rho = \frac{\dot{m}}{\dot{V}}$ in voorgaande vergelijking verkrijgen we:

$$\dot{m}_H(\rho_N) = \dot{m}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^n$$

Voor $n = 0.5$ is deze formule gelijk aan de eerder gemaakte theoretische beschouwing. Door het constante drukverschil weten we door de wet van behoud van massa dat de volumestroom door de gebouwschil en de volumestroom dat door het blaastoestel gaat, gelijk aan elkaar moeten zijn:

$$\dot{m}_H(\rho_H) = \dot{m}_G(\rho_G)$$

Waarbij: $\dot{m}_H(\rho_H)$ = de massastroom lucht door de gebouwschil [kg/h]

$\dot{m}_G(\rho_G)$ = de massastroom lucht door het blaastoestel [kg/h]

Daaruit volgt:

$$\dot{m}_H(\rho_N) = \dot{m}_G(\rho_G) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^n$$

Houden we nu ook nog rekening met het verschil tussen de normomstandigheden en de omstandigheden waarvoor het toestel gekalibreerd is dan krijgen we door substitutie van

formule

$$\dot{m}_G(\rho_G) = \dot{m}_G(\rho_K) \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_K} \right)^{\frac{1}{2}}$$

in de vorige formule:

$$\dot{m}_H(\rho_N) = \dot{m}_G(\rho_K) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_K} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^n$$

Als de callibratie van de meetapparatuur nu gebeurd is bij normomstandigheden (Duitse norm: 20°C, 1013 hPa) zoals dat het geval is voor de Minneapolis Blower Door dan geldt: $\rho_K = \rho_N$ en kunnen we de formule schrijven als [9]:

$$\dot{m}_H(\rho_N) = \dot{m}_G(\rho_N) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_N} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^n$$

of nog

$$\dot{m}_H(\rho_N) = \dot{m}_G(\rho_N) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_H} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^{n-0.5}$$

Omdat de massadichtheden in het linker- en het rechterlid gelijk zijn, gelden voor de volumestromen dezelfde verhoudingen als voor de massastromen:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_G(\rho_N) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_H} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^{n-0.5}$$

In de verwerking van de resultaten van de verschillende proeven die we uitvoeren maken we gebruik van deze correctieformule.

Het is ook mogelijk om te rekenen met correctiefactoren die enkel uitgaan van een volstrekt turbulente stroming (vb de Zweedse norm SS 02 15 51) Praktisch blijkt een perfect turbulente stroming nooit voor te komen, waardoor het gebruik van die formules grote onnauwkeurigheden teweeg kunnen brengen. Het is zelfs zo dat in bepaalde gevallen de afwijking door gebruik van de verkeerde correctieformules grotere onnauwkeurigheden kunnen teweeg brengen dan de afwijking die zou bestaan als er geen correctie op de meetgegevens wordt toegepast.

De fout die gemaakt wordt door geen correctie toe te passen op de bekomen meetgegevens kan maximaal ongeveer 10% bedragen. Bij onze metingen loopt deze op tot 7.3%.

In tabel 1 wordt een vergelijking gemaakt tussen de verschillende correctiemethodes bij verschillende omstandigheden (temperaturen, stromingsexponenten). In de tabel wordt de procentuele afwijking van de genormeerde luchtvolumestroom gegeven ten opzichte van de door ons gevolgde correctie volgens ISO/DIS 9972.

Meetomstandigheden				Zonder correctie	Met correctie			
	Te (°C)	Ti (°C)	n (-)	Meet- doos	hittedraad	AIVC	SS021551	Minneapolis
Onder- druk	0	20	0.5	3.6%	3.6%	-3.5%	3.6%	0.0%
	0	20	0.8	9.4%	9.4%	1.9%	9.4%	5.6%
	0	5	0.5	0.9%	3.6%	-3.5%	3.6%	0.0%
	0	5	0.8	6.5%	9.4%	1.9%	9.4%	5.6%
	30	30	0.5	0.0%	-1.7%	1.7%	-1.7%	0.0%
	30	30	0.8	-2.5%	-4.1%	-0.9%	-4.1%	-2.5%
Over- druk	0	20	0.5	-3.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	0	20	0.8	-3.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	0	5	0.5	-0.9%	2.7%	-2.6%	2.7%	0.0%
	0	5	0.8	3.2%	6.9%	1.4%	6.9%	4.1%
	30	30	0.5	0.0%	-1.7%	1.7%	-1.7%	0.0%
	30	30	0.8	-2.5%	-4.1%	-0.9%	-4.1%	-2.5%
Gemid- delde	0	20	0.5	0.1%	1.8%	-1.7%	1.8%	0.0%
	0	20	0.8	3.0%	4.7%	1.0%	4.7%	2.8%
	0	5	0.5	0.0%	3.1%	-3.0%	3.1%	0.0%
	0	5	0.8	4.9%	8.1%	1.7%	8.1%	4.8%
	30	30	0.5	0.0%	-1.7%	1.7%	-1.7%	0.0%
	30	30	0.8	-2.5%	-4.1%	-0.9%	-4.1%	-2.5%

Tabel 1. “invloed toepassing correctiefactoren” [9]

1.2.3) Foutenrekening

1.2.3.0 Inleiding

In de toekomst zullen steeds meer metingen gedaan worden met betrekking tot luchtdichtheid. Om de onderlinge vergelijkbaarheid en de nauwkeurigheid van die metingen te verhogen, is het nodig een betrouwbaarheidsinterval aan te duiden. Bij wetenschappelijk onderzoek is het altijd nodig betrouwbaarheidsintervallen te definiëren om gefundeerde uitspraken te kunnen maken: of een bepaalde afwijking al dan niet relevant is, of deze nog binnen de marges van de foutrekening ligt, vormt een basis van onderzoek. De reproduceerbaarheid van blowerdoor metingen met constante drukverschillen hangt van verschillende parameters af. Deze kunnen ingedeeld worden in twee groepen: enerzijds zij die tijdens de meting zelf optreden, anderzijds de parameters die tijdens de verwerking voorkomen. Anderzijds kunnen we ze ook indelen naar aanpasbaarheid toe.

Enkele belangrijke parameters zijn

- 1.) de parameters die te veranderen zijn
 - 1.1) aantal en plaats van omgevingsdrukmeters
 - 1.2) plaats waar blowerdoor wordt ingebouwd
 - 1.3) keuze van het meetsysteem (massastroommeters/volumestroommeters)
 - 1.4) aantal en plaats van drukverschilmeetpunten
 - 1.5) meteorologische parameters (door tijdsverschillen tussen metingen)
- 2.) de parameters die niet te veranderen zijn
 - 2.1) meteorologische parameters tijdens de meting zelf
 - 2.2) gebouwgeometrie
 - 2.3) lekverdeling
 - 2.4) nauwkeurigheid van meettoestellen zelf (drukmeters, volumestroommeters...)

Onder ‘verwerking’ verstaan we het aflezen en optekenen van de meetgegevens, de keuze van correctiemethode, berekening van afwijking, keuze van parameters om berekeningen te maken (afbakening oppervlakte, vastleggen volumes...)

Bij het bepalen van een betrouwbaarheidsinterval, van een foutenmarge, is het de bedoeling de afzonderlijke invloed van verschillende parameters op de luchtdichtheidsmeting te

analyseren. Op basis van die afzonderlijke invloeden kan dan een globale foutenmarge afgeleid worden. Een dergelijke omvattende foutenmarge gaat uit van een soort theoretisch optimale situatie waarbij de luchtdichtheidsmetingen kunnen uitgevoerd worden.

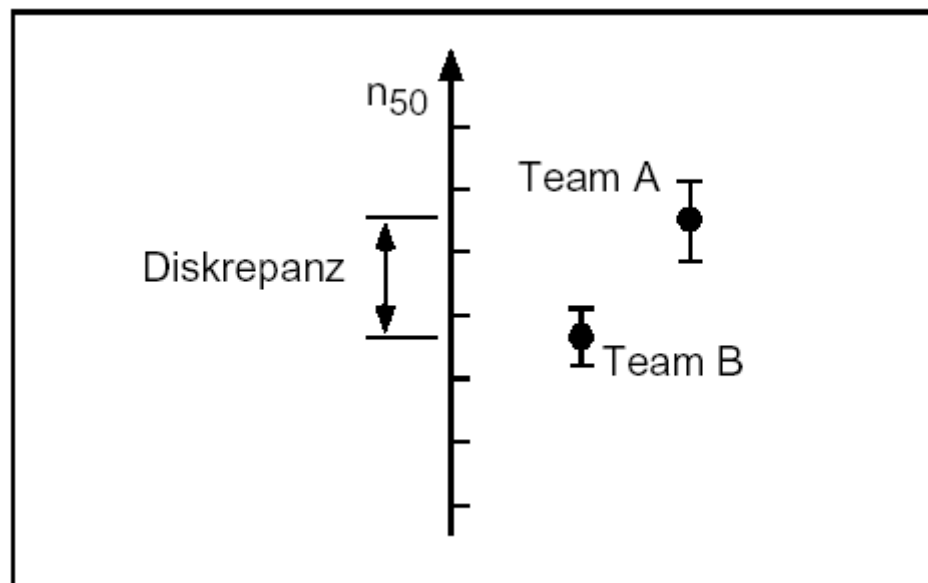
1.2.3.1 Principe

De meetnauwkeurigheid wordt algemeen aangegeven door:

“beste schatting” $\pm$ de onzekerheid

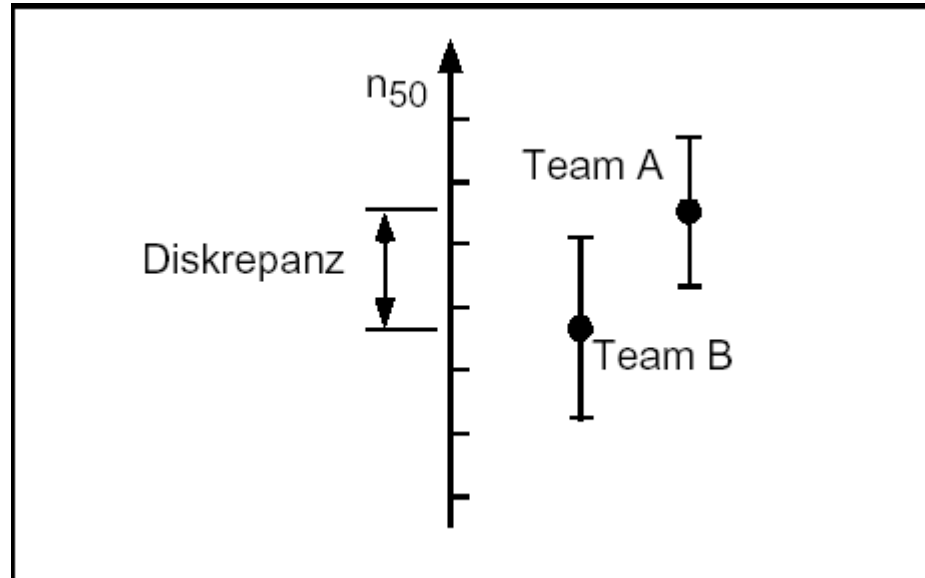
Het aantal beduidende cijfers wordt bepaald door de nauwkeurigheid van de meting, en wordt op een zinvolle manier weergegeven. Vb. stel dat na metingen een n_{50} -waarde bekomen wordt van 2,3568. Er wordt aan de hand van de gebruikte apparatuur en de gegeven omstandigheden van de meting een foutschatting gemaakt van $\pm 10\%$. Nu zal het uiteindelijke resultaat zinvoller weergegeven worden door $n_{50} = 2,4 \pm 0,2$ dan door $n_{50} = 2,3568 \pm 0,2356$. De bepaling van de foutenmarge blijft echter ook slechts een schatting.

Om te bepalen of twee metingen al dan niet significant verschillend zijn wordt gekeken naar het verschil in absolute waarde van de beste schatting. Stel dat er twee metingen zijn, waarbij elke meting een eigen nauwkeurigheid en betrouwbaarheidsinterval met zich meebrengt. Indien de som van de foutmarges groter is dan het verschil van de beste schattingen, dan is er geen significant verschil tussen de resultaten. Er is namelijk een overlapping van de afzonderlijke nauwkeurighedsintervallen.



Figuur 3. “significant verschil tussen metingen”

Indien de som van de foutenmarges kleiner is dan het verschil van de beste schattingen, is er een significant verschil tussen de metingen. De afzonderlijke nauwkeurighedsintervallen overlappen elkaar niet.



Figuur 4. “verschil tussen metingen dat niet significant is”

De totale fout bij metingen bestaat uit vermijdbare, systematische en toevallige fouten. De vermijdbare fouten worden door de foutrekening niet behandeld: bvb foutieve aflezing. De bepaalde foutenmarge behandelt zowel systematische fouten als toevallige fouten. Systematische fouten zijn vb onnauwkeurige meettoestellen, toevallige fouten zijn vb veranderingen in meettoestellen of omgevingsparameters door externe factoren waarvan de invloed op de meetresultaten niet op een adequate manier kan gemeten worden.

Naast de absolute meetnauwkeurigheid is ook de reproduceerbaarheid van metingen over een langere tijdsperiode van belang. Het verschil tussen metingen op hetzelfde object kan ook het gevolg zijn van het effectief veranderen van de luchtdichtheid ervan tijdens de periode tussen de metingen. Indien deze metingen met dezelfde meetapparatuur uitgevoerd worden, is de absolute nauwkeurigheid van de meettoestellen niet meer relevant (in zoverre dat zij geen tijdsgebonden veranderingen ondergaan) [9] [26].

1.2.3.2 Meettechniek

Een vergelijkende studie in een laboratorium toont aan dat de typische standaard drukmeter van blowerdoor systemen een relatief kleine nauwkeurigheid vertoont. Ook door de

gebruikersafhankelijkheid (aflezen van waarden) is er een zekere verscheidenheid in reproduceerbaarheid van de resultaten. Twee van de drie geteste identieke apparaten vertonen bij drukmetingen boven de 30 Pa een reproduceerbaarheid die beter is dan 5%. Uit testen blijkt evenwel dat variatie van verschillende toestellen buiten de grenzen liggen van de door de fabrikant aangegeven nauwkeurigheid [25]. Hiermee kan bekeken worden wat voor een luchtdichtheidsmeting de maximale theoretische nauwkeurigheid kan zijn. [82]

Testen van de callibratie van de ventilatoren tonen dat boven drukverschillen van 100 Pa de onnauwkeurigheid van de afregeling van de ventilatoren nagenoeg volledig verantwoordelijk is voor de totale fout op de luchtstroommeting [25].

Bij het uitvoeren van luchtdichtheidsmetingen moet zowel de fout op de luchtdrukverschilmetingen als de fout op de volumestroommeting in rekening gebracht worden.

Bij het omrekenen van de gegevens naar bruikbare grootheden moet men ook gebruik maken van afmetingen, oppervlaktes, volumes die opgemeten worden. Deze gegevens zijn ook niet altijd eenduidig te bepalen. Een gebrek aan duidelijke normering over wat het binnenvolume is, hoe oppervlaktes moeten opgemeten worden en waar de grenzen liggen van het beschermde volume zorgen ervoor dat men ook hier terdege rekening moet houden met een foutenmarge tussen de 5 en 10 %. Een realistische foutschatting bij het opmeten van volumes is 10%, en de fout bij het opmeten van oppervlaktes is 5%. Deze foutenmarges worden natuurlijk meegedragen in verdere berekeningen [25].

1.2.3.3 Windinvloed

De wind oefent door haar werking ook drukken uit op de gevels van gebouwen tijdens metingen. Deze winddrukken zijn zeer variërend van intensiteit en richting. Een absolute meting van hun invloed is bijzonder moeilijk, zoniet onmogelijk. Het is wel mogelijk een aantal basisregels voorop te stellen [14][8][26].

- 1.) de invloed van de wind op de totale lekkage is eerder klein
- 2.) de invloed van de verticale lekverdeling is gering

- 3.) de horizontale verdeling van de lekken kan een grote invloed hebben. Als de lekken gelijkmatig verspreid zijn over de verschillende façades wordt de invloed kleiner. Hoe meer de lekken zich situeren aan één zijde, des te groter kan de invloed worden.
- 4.) De plaats en het aantal referentiedrukmeters tonen een aanzienlijke invloed. Blijkt dat vier referentiedrukmeters meestal de beste resultaten geven, dus aanleiding geven tot een minimale rekenfout.
- 5.) Door het gemiddelde te nemen van over- en onderdrukken worden de meetfouten ten gevolge van drukverschillen door de wind niet opgeheven. Dit is enkel het geval indien de stromingsexponent $n = 1,0$ maar dit is praktisch onmogelijk bij gebouwen.

Als er een gemiddelde windsnelheid is tot 3 m/s, dan is de afwijking die deze veroorzaakt in de grootteorde van de afwijking die voorkomt bij normale drukmeettoestellen. Indien de windsnelheden oplopen tot 4,7 m/s, dan kan de veroorzaakte afwijking vergeleken worden met de calibratienauwkeurigheid van volumestroommeters. Bij windsnelheden tot 6 m/s is de afwijking vergelijkbaar met de afwijking op de totale meetgrootte. Bij ongunstige situaties door de lekverdeling en de windrichting, is het mogelijk dat er nog veel grotere afwijkingen optreden [9] [25].

1.2.3.4 Temperatuursverschil

In een normaal gebruik van een gebouw zal er bij een temperatuursverschil tussen binnen en buiten thermische trek ontstaan. [8] [26] Koude lucht heeft een grotere massadichtheid dan warme lucht. In wintersituatie (buiten koud, binnen warm) zal de warme lucht binnen stijgen omdat deze minder weegt dan koudere lucht, en bovenaan een overdruk creëren, onderaan een onderdruk. Het drukverschil op een bepaalde plaats kunnen we berekenen met volgende formule [14]:

$$\Delta p = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot (h - h_{NL})$$

$$\Delta p = \rho_i \cdot g \cdot (h - h_{NL}) \frac{(T_i - T_e)}{T_e}$$

Waarbij: h = afstand van punt tot de grond [m]

h_{NL} = afstand van neutrale lijn tot de grond [m]

T_i = binnentemperatuur [K]

T_e = buitentemperatuur [K]

ρ_i = massadichtheid lucht binnen [kg / m³]

ρ_e = massadichtheid lucht buiten [kg / m³]

Het gemiddelde drukverschil is de helft van het maximale drukverschil (aanvaardbare veronderstelling dat het drukverloop lineair is). Bijvoorbeeld voor een woning van 8 meter hoog en een temperatuursverschil binnen-buiten van 20°C (buiten 0°C, binnen 20°C) zorgt dit voor een gemiddeld drukverschil van 1,74 Pa. Boven de neutrale lijn is dit positief, onder de neutrale lijn negatief. Als we een gelijkaardige berekening maken voor een gebouw van 20 verdiepingen van elk 4m hoog, en een temperatuursverschil van 25 graden dan bekomen we een totaal drukverschil van 40 Pa. Dit maakt al duidelijk dat er in deze berekening geen rekening gehouden is met de weerstand die de lucht ondervindt om zich verticaal door het gebouw te verplaatsen. Bij hoge gebouwen is het niet evident dit drukverschil correct in te schatten, bovendien is dit vrij eenvoudig te meten.

Bij een blowerdoor meting is het mogelijk dat het verschil in temperaturen bovenaan en onderaan het gebouw geen invloed geeft, omdat de twee luchtstromen (boven en onder de neutrale lijn) elkaar compenseren en dus niet tussenkomen in het volume dat door het blaastoestel uitgedrukt wordt. Bovendien zijn de drukverschillen heel klein ten opzichte van de opgelegde stromen. Er kan echter wel een invloed zijn als de luchtlekken verticaal een grote spreiding vertonen. Gecombineerde effecten van opgelegde drukverschillen en thermische trek kunnen de meting licht doen afwijken. Dit effect wordt grotendeels teniet gedaan door metingen te doen bij zowel overdruk als onderdruk.

1.2.3.5 Samenvatting

Bron van onzekerheid	Min.	Max.
Drukverschil over gebouwschil	< 1 %	3 %
Volumestroommeting lucht	3 %	7 %
Massadichtheid lucht	0 %	10 %
Keuze grootheid	5 %	15 %
<i>Ten gevolge van wind</i>		
Alle façades	7 %	11 %
Twee façades	7 %	13 %
Over één façade verdeeld	17 %	42%
<i>Totale foutschatting</i>		
Zonder wind	6 %	35 %
Met wind (min.)	9 %	36 %
Met wind (max.)	21%	55%

Tabel 2. “foutenmarge bij blowerdoor metingen” [9]

1.2.3.6 Absolute fout

Niet alle fouten kunnen we uitdrukken als fractie van de gemeten grootheid. Dit wordt belangrijker naarmate de gemeten waardes kleiner zijn natuurlijk. De absolute fout dienen we te bepalen aan de hand van de afleesnauwkeurigheid van de verschillende toestellen. Om tot een n_{50} -waarde te komen maken we gebruik van een thermometer, twee drukmeters en een lengtemeter. Uit onderzoek op de relatieve invloed van omgeving bij de correctiefactoren kunnen we besluiten dat de afleesnauwkeurigheid van de thermometer van ondergeschikt belang is. Ook de afleesnauwkeurigheid bij de lengtemeter is kunnen we beter uitdrukken als relatieve fout dan als absolute fout.

We stellen voorop dat de afleesfout voor het drukverschil over de woning 0.5 Pa is, en over de ventilator 1 Pa. Om deze gegevens nu om te zetten naar een absolute foutenmarge op de n_{50} -waarde maken we gebruik van de metingen die we uitgevoerd hebben. Voor de woning Desmet (meest luchtdichte woning uit de test) komt de absolute fout op 0.02 h^{-1} op een n_{50} -waarde van 0.97 h^{-1} , wat overeenkomt met een relatieve fout van 2%. Voor de woning Depauw (minst luchtdichte woning uit de test) komt de absolute fout op 0.2 h^{-1} op een n_{50} -waarde van 18.1 h^{-1} , wat overeenkomt met een relatieve fout van 1%.

De absolute fout ten gevolge van aflezen is dus altijd kleiner dan de relatieve fout die eigen is aan de nauwkeurigheid van de apparatuur zelf. Bijgevolg kunnen we verder altijd blijven rekenen met de relatieve fout.

1.2.4) Testverloop Blower Door

We bespreken enkel een aantal basismethodes die uit te voeren zijn met één blowerdoor. De bespreking van specifieke methodes zoals ‘open a door’, ‘adding a hole’, ‘guard zone’ en andere zou ons te ver leiden. Meer informatie hieromtrent is te vinden in [27][33][36].

1.2.4.1 Ontwikkeling

In de nadagen van de energiecrisis van begin de jaren 70 is men mondiaal onderzoek gaan doen naar energiehuishouding in gebouwen. Landen met een kouder klimaat hadden natuurlijk een grotere ervaring op het gebied van isolatie en dergelijke meer. Het is dan ook niet toevallig dat de Scandinavische landen en Canada nog steeds toonaangevend zijn op het gebied van energieconservatie in gebouwen. De eerste vorm van de blowerdoor zoals we die nu kennen is ontwikkeld in Zweden in 1977 [1] [7]. Op dat moment was het nog een ‘blowerwindow’. In 1979 is men in de Princeton University begonnen met onderzoek naar infiltratie, en het gebruik van de blowerwindow om luchtdichtheid te testen. Daar is men het blaastoestel in de deuropening gaan plaatsen, omdat deze meer uniforme afmetingen heeft. Op dat moment is men ook het belang van infiltratie op de totale energiehuishouding van een woning gaan inzien. In 1985 waren er in Amerika ongeveer 13 producenten, die gezamenlijk voor 1.2 miljoen dollar blowerdoor toestellen en luchtdichtheidsschermen verkochten.

Het toestel werd verder ontwikkeld, de DC-motor werd vervangen door een AC-motor, het frame werd lichter, het toestel werd kleiner, het vermogen werd opgevoerd en de meettoestellen verfijnd.

De eerste afnemers van de toestellen waren vooral bedrijven actief in de sector HVAC. Het werd duidelijk dat op warme dagen de airconditioning 30-60% van zijn capaciteit kon verliezen door in- en exfiltratie. Door het gebruik van de blowerdoors konden grote lekken opgespoord worden, en zodoende kon de installatie ook beter afgeregeld worden naar het gebruik toe. Bij het uitvoeren van de test werden vaak ook de eigenaars uitgenodigd, om ze

fysiek te laten aanvoelen hoe de energiehuishouding kon beïnvloed worden door luchtlekkage.

Een andere tak van de ontwikkeling vond plaats in Canada: daar werd een toestel ontwikkeld om de in situ plaatsing van ramen te controleren op luchtdichtheid. Na het aanbrengen van een kader wordt een overdruk gecreëerd van 75 Pa. De Canadese normen leggen maximale waarden op om de goede plaatsing te garanderen (zie ook EN 12207:1999).

Een derde tak waar veel gebruik gemaakt werd van blowerdoor toestellen is brandveiligheid. In sommige installaties wordt er geopteerd voor blusinstallaties met Halon (wordt momenteel van de markt verdrongen door te hoog gehalte aan CFK's) om waterschade bij blusacties te vermijden. Halon is een inert gas, dat als inhibitor gaat inwerken op het verbrandingsproces. Vanaf een 3%-volumegehalte in de ruimte zal de brand uitdoven. Om te vermijden dat het vuur weer kan opflakkeren door het weglekken van het gas moet de ruimte dus ook voldoende luchtdicht zijn.

1.2.4.2 Benodigheden^[42] ^[43]

- 1.) blowerdoor met accessoires:
 - extra tube voor lucht aan te zuigen (uitzonderlijk)
 - afscherming van meters tegen wind
 - thermometers
 - anemometer (om lekken te onderzoeken)
 - externe drukmeters om buiten op te stellen (ideaal 4 toestellen)
 - eventueel computer
- 2.) rekenmachine, checklists, invulbladen (zie bijlage A en bijlage B)
- 3.) materiaal om openingen te dichten, vb tape
- 4.) ladder, zaklamp, meetlint
- 5.) flesje met rookpoeder om plaatselijke lekken op te sporen

1.2.4.3 Testverloop

Een vast stramien bij het uitvoeren van de test draagt bij tot de reproduceerbaarheid ervan, en vermindert de kans op fouten en vergetelheden bij de uitvoering [36] [37] [83] [84]. In 1990 heeft de Internationale Standaardisatie Organisatie (ISO) in Genf een normontwerp

voorgesteld met de titel “Determination of Building Air Tightness – Fan Pressurization Method” (ISO/DIS 9972). Deze geeft nauwkeurig aan hoe de proef moet uitgevoerd worden, welke randvoorwaarden in acht dienen genomen te worden, en hoe het gebouw moet voorbereid worden[42]. De latere norm [28] EN 13829 is hier op gebaseerd.

- 1.) Opmeten van het gebouw: vastleggen waar de grenzen van het beschermde volume zich bevinden, oppervlaktes en volumes bepalen.
- 2.) Meet de temperatuur binnen en buiten, meet de windsnelheid
- 3.) Schakel de verwarmingsinstallatie uit

Eigenaars die verwarmen met hout of kolen moeten op voorhand op de hoogte gebracht worden. Ook de klep van de schouw moet gesloten worden. Toestellen die op gas werken mogen geen waakvlam meer hebben.

- 4.) Controleer alle openingen:

- ramen en deuren gesloten, binnendeuren open, openingen die ook zullen voorkomen tijdens het gebruik worden zo gelaten, vb een briefbusopening
- sluit de openingen van de mechanische ventilatie, en eventueel van droogkast
- controleer of alle waterafvoeren met water gevuld zijn, indien dit niet mogelijk is worden deze afgekleefd.

- 5.) beslis of deuren naar halfgeconditioneerde ruimte open of dicht moeten (zie hoger)

- normaal worden ook gedeeltelijk verwarmde ruimtes opgenomen
- als er twijfel bestaat, kunnen de beide mogelijkheden getest worden

- 6.) Installeer de blowerdoor:

- volg de instructies van de producent
- met de huidige systemen kan het frame van de blower door ingebouwd worden zonder dat deze met vijzen moeten vastgezet worden. De bestaande deur en kader worden dus niet beschadigd.
- indien mogelijk een deur gebruiken die onmiddellijk uitgeeft op buitenomgeving, is dit niet mogelijk, maak dan dat de tube voor lucht volledig doorloopt tot buiten.
- indien mogelijk een terrasdeur gebruiken: deze heeft dezelfde luchtdichtheid als de ramen, en deze is vrij goed over het algemeen. De luchtdichtheid van de voordeur laat meestal te wensen over, en wil men dus betrekken in de meting.

7.) Controleer de meettoestellen, en zet ze op nul: maak gebruik van de instructies van de producent.

8.) Voer de metingen uit:

- Probeer ten minste 5 metingen te doen in gelijke intervallen van 10 tot 60 Pa
- De combinatie van proeven bij over- en onderdruk geven de beste resultaten.
- Indien de meters te veel schommelen, gebruik dan verschillende meettoestellen buiten, of probeer de invloed van de wind op de toestellen te verminderen.
- Als de metingen worden uitgezet in een grafiek met logaritmische schaal van de drukken en een logaritmische schaal van de luchtvolumes, moeten de metingen een minimale correlatie van 98% (of zelfs 99%) hebben met de functie van de stromingsvergelijking (wordt dan voorgesteld door rechte).
- De stromingsexponent kan niet kleiner zijn dan 0.5, en niet groter dan 1.0: indien dit toch het geval zou zijn, controleer dan alle meters en proefopstelling en voer de test opnieuw uit (hier komen we op terug in 2.4).

9.) Controleer waar de lekken zich bevinden:

- creëer een onderdruk van 30 Pa of meer: vaak kan men de tochtgaten dan al voelen of horen. Bij warmer weer worden hogere drukverschillen gebruikt, bij kouder weer kleinere, want een koude luchtstroom is sneller voelbaar.
- Controleer de ruimtes waar er comfortproblemen zijn
- Controleer de openingen naar aanpalende binnenruimtes die niet tot het beschermde volume behoren.
- Controleer alle evidente problemen: ramen, deuren, vensterbanken, plinten, stopcontacten, niet gepleisterde stukken muur, aansluitingen muur/dak...
- Kijk vooral naar de specifieke problemen die goedkoop op te lossen zijn.

10.) Verwijder alle meettoestellen, maak alle afgedichte openingen weer vrij, schakel de verwarming weer in.

1.2.4.4 Testverloop bij grote gebouwen[29] [30] [35]

Bij grote gebouwen (bvb $> 4000\text{m}^3$) is het niet evident een drukverschil te creëren van 50 Pa. Ondertussen zijn er wel al speciale propellers op die markt die debieten kunnen realiseren tot $300.000\text{m}^3/\text{h}$, maar die zijn in België nog niet in omloop. Er kunnen ook verschillende ventilatoren parallel geschakeld worden, zodoende kan men de vermogens van de afzonderlijke toestellen optellen. Indien de verschillende ventilatoren niet in dezelfde ruimte geplaatst worden dient men er over te waken dat er in het gebouw geen drukverschillen ontstaan tussen de verschillende ruimtes.

Om een schatting te kunnen maken van het benodigde vermogen stelt men de lekkage per vierkante meter per uur gelijk aan 10 m^3 . Als dit getal dan vermenigvuldigd wordt met het gebouwschiloppervlak bekomen we een ruwe schatting van het lekdebiet. Dit kan nogal laag lijken, maar men aanvaard ook dat een drukverschil van 50 Pa niet altijd gehaald wordt, een minimum vereiste is 35 Pa om de meting te kunnen aanvaarden.

1.2.4.5 Normen

Internationaal worden in verschillende normen voorwaarden gesteld om de proef goed te kunnen uitvoeren [9]. Deze worden kort weergegeven in tabel 3:

Norm	Bereik drukverschillen	Rand- voorwaarden	Gebruikte grootheden	Vereiste nauwkeurigheid
ASTM E 779-87	12.5-75 Pa over- of onderdruk	$v < 2\text{ m/s}$ $5 < q < 35^\circ\text{C}$	$q(\Delta p)$ ELA	$\dot{V}$ 5% Δp 2.5 Pa
BRE code	5-55 Pa over- of onderdruk	$v < 5\text{ m/s}$	$q(\Delta p)$, C^{te} , n , n_{50}	$\dot{V}$ 5%
CAN/CGSB 149.10-M86	0-50 Pa onderdruk	$v < 5.6\text{ m/s}$	ELA	$\dot{V}$ 5% Δp 2 Pa
ISO 9972	10-60 Pa over- of onderdruk	$\Delta p_0 < 3\text{ Pa}$	C^{te} , n ELA	$\dot{V}$ 5% Δp 5%
NEN 2686	15-100 Pa over- of onderdruk	$\Delta p_0 < 5\text{ Pa}$ $v < 6\text{ m/s}$	C^{te} , n , $\dot{V}$ bij 1 en 10 Pa	$\dot{V}$ 5% Δp 5%
NS-INSTA 130 SS 02 15 51	0-55 Pa over- of onderdruk	$v < 6\text{ m/s}$ op 10m afstand	n_{50}	$\dot{V}$ 6%, Δp 3 Pa, samen 10%

Tabel 3. “normen en voorschriften ivm verloop blowerdoor proef”

De statische drukproef meet de volumestroom lucht die bij een bepaald drukverschil naar buiten geperst wordt. Deze proef wordt bij een aantal verschillende drukken gedaan, om dan door afleiding de volumestroom te krijgen bij exact $\Delta p = 50 \text{ Pa}$. Dit komt overeen met een waterkolom van 5mm of een winddruk op een gebouw als de windsnelheid ongeveer 9 m/s of 33 km/h (windkracht 5) bedraagt . In realiteit zal zelden zo een constante windsnelheid voorkomen, dit is zeker geen gemiddelde windsnelheid in België. Indien men kleinere drukverschillen neemt, dan is de invloed van externe factoren (vooral wind) op de meetresultaten te groot, de gegevens worden teveel verstoord, en de relatieve schommelingen van de resultaten onderling worden te groot. Natuurlijk is het wel de bedoeling de metingen uit te voeren onder condities die zo dicht mogelijk aanleunen bij de situatie waarbij het gebouw zal gebruikt worden. Bij hogere drukken wordt het verschil met de in realiteit voorkomende drukken te groot, en de nauwkeurigheid van de meettoestellen vermindert (vooral van de luchtstroommeting en callibratie van de ventilator).

Meestal worden zowel proeven in overdruk als in onderdruk uitgevoerd. Vaak geven deze verschillende resultaten: de gemiddelde waarde is dan representatief. Afhankelijk van over- of onderdruk kunnen de afmetingen van een opening veranderen, vb een spleet die dichtgedrukt wordt, of een raam dat naar binnen opengaat kan bij onderdruk een grotere opening hebben dan bij overdruk. Een tweede verklaring is dat bepaalde openingen asymmetrisch zijn en een andere stromingsvergelijking hebben bij verschillende doorstromingsrichting. Ook de verticale verdeling van de lekken kan een invloed hebben: het samenwerken van thermische trek en de opgelegde drukverschillen kan tot een grotere luchtlekkage aanleiding geven als de meeste lekken bovenaan de woning te vinden zijn.

2) Luchtdichtheidsmetingen

2.1) Inleiding

De opzet van deze thesis is een onderzoek naar de verschillende schattingsmethodes voor luchtdichtheid. De verschillende methodes kunnen we onderling vergelijken door ze te toetsen aan een aantal doorgemeten woningen. In de periode 07/03/05 – 17/03/05 stond er een Minneapolis Blower Door van de universiteit van Leuven ter onzer beschikking om een aantal testen uit te voeren. In totaal zijn er 43 drukproeven gedaan over 14 woningen. Helaas hebben we 4 woningen moeten schrappen: voor twee woningen was het vermogen van de blower door te klein, bij één woning ontbrak er een meting bij overdruk, en een andere woning was door verbouwingswerken niet meer representatief genoeg om schattingsmethodes te evalueren.

Bij de keuze van de verschillende woningen hebben we getracht diverse types te selecteren. Van de tien woningen zijn er zeven in open bebouwing, één in halfopen bebouwing en twee appartementen. Zes woningen zijn uitgevoerd in baksteen, twee in beton, en twee in houtskeletbouw. Vijf woningen zijn minder dan vijf jaar oud, vijf woningen zijn tussen de tien en zestig jaar oud. Vier woningen hebben balansventilatie, twee extractie en vier woningen worden op natuurlijke wijze geventileerd. Van de tien woningen zijn er drie uitgesproken lage-energie woningen.

Een uitgebreid verslag van elke woning is teug te vinden in bijlage C.

NAAM	type woning	bouwwijze	ventilatie	leeftijd
DE SMET	open bebouwing	houtskeletbouw	balansventilatie	1
MERTENS	open bebouwing	houtskeletbouw	balansventilatie	1
HEMERYCK	open bebouwing	traditioneel	balansventilatie	1
DE BAETS	halfopen bebouwing	traditioneel	Natuurlijke ventilatie	13
JANSSENS	open bebouwing	traditioneel	natuurlijke ventilatie	45
FLORE	appartement	betonbouw	Extractie in natte cellen	31
DE MUYNCK	open bebouwing	traditioneel	Balansventilatie	17
DE BOEI	appartement	betonbouw	extractie in natte cellen	1
VAN HULLE	open bebouwing	traditioneel	natuurlijke ventilatie	2
DEPAUW	open bebouwing	traditioneel	natuurlijke ventilatie	52

Tabel 4. “algemene gegevens testwoningen”

2.2) Geometrie

Van alle woningen zijn de afmetingen bepaald die van belang zijn voor het opstellen van de schattingen van de luchtdichtheid. In de meeste gevallen zijn deze afmetingen verzameld op basis van plannen en doorsneden van de woning, in de overige gevallen is alles ter plaatse opgemeten.

NAAM	bi volume	buitenvolume	compactheid	vloeropp	lm aansl
DE SMET	570,85	813,96	0,70	247,67	406,71
MERTENS	563,06	820,78	1,47	204,12	387,46
HEMERYCK	703,155	991	1,12	292,78	553,67
DE BAETS	419,3	607,25	0,69	201,8	299,85
JANSSENS	390,89	612,15	0,85	159,3	376,59
FLORE	225,288	<i>appartement</i>	0,72	98,04	69,36
DE MUYNCK	522	723,74	0,90	238,74	498,3
DE BOEI	100,45	<i>appartement</i>	0,81	42,88	26,4
VAN HULLE	533,95	782,1	0,68	225,73	423
DEPAUW	365,92	472,72	0,94	163,34	309,09

Tabel 5. “geometrische gegevens testwoningen”

2.3) Proefverloop

Alle metingen zijn in de mate van het mogelijke uitgevoerd conform de bepalingen vermeld in hoofdstuk 1. Aan enkele voorwaarden is echter niet voldaan tijdens de proeven.

Er was slechts één drukmeter aanwezig om het drukverschil te meten tussen binnen en buiten, terwijl het er in het ideale geval vier zijn. Daardoor verkleint de nauwkeurigheid van de meting: we hebben berekend dat een afwijking van 1 Pa drukverschil tussen binnen en buiten een afwijking veroorzaakt van maximaal 1.5%, wat binnen de algemene foutenmarge aanvaardbaar is.

In enkele gevallen kon de blowerdoor enkel in de voordeur ingebouwd worden. Op basis van de metingen op deuren wordt daardoor de luchtvolumestroom maximaal 30m³/h kleiner, dit komt overeen met een relatieve fout tussen de 0,4 en 1,6% op die specifieke woningen.

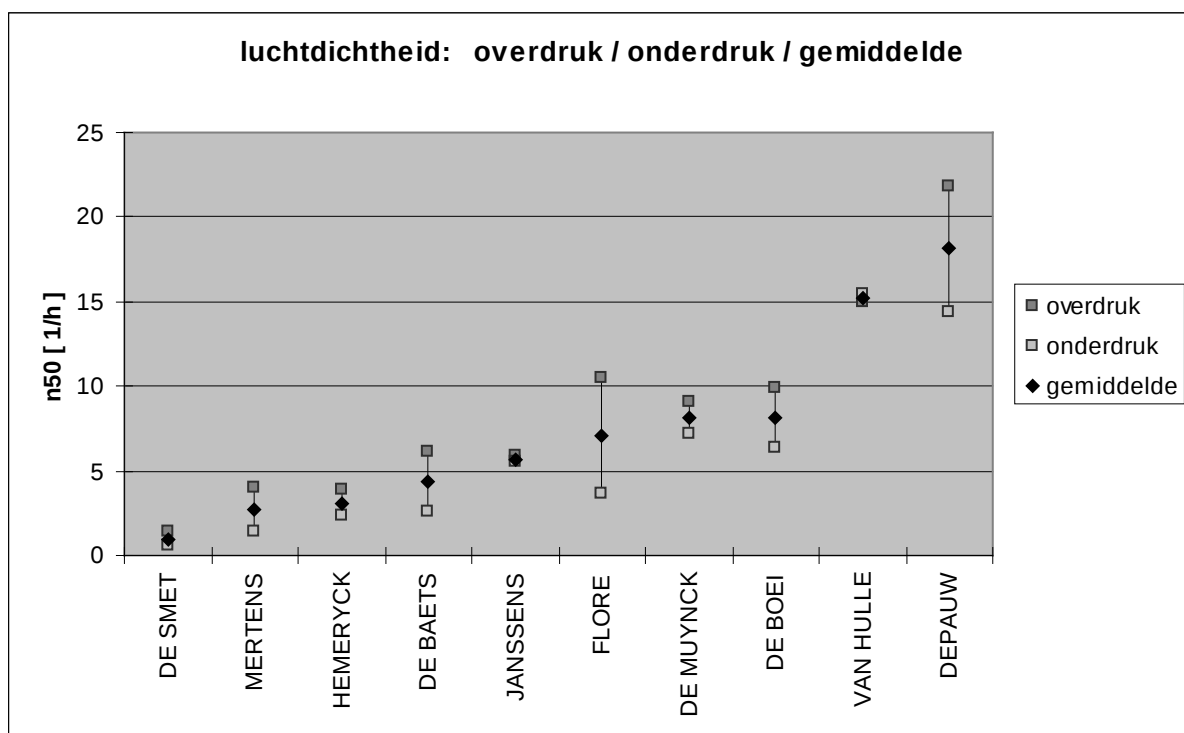
In enkele gevallen was de stromingsexponent kleiner dan 0,5, wat theoretisch niet mogelijk is. Voor een bepaalde woning hebben we daarom alle aansluitingen, deuren, ramen, zolderluiken en de meettoestellen gecontroleerd en de proef opnieuw uitgevoerd. Bij de tweede meting was

de stromingsexponent echter opnieuw kleiner dan 0,5. De enige verklaring is dat de geometrie van de openingen zodanig verandert naargelang het drukverschil over het gebouw. Het is ook logisch dat een raam meer opengedrukt wordt als men het drukverschil verhoogt.

De bekomen n_{50} -waarden zijn het gemiddelde van de meting bij overdruk en de meting bij onderdruk, en alle resultaten zijn omgerekend naar equivalente waarden bij normomstandigheden volgens de correctieformule uit 1.2.2.

2.4) Resultaten

In figuur 5 zijn de gecorrigeerde resultaten weergegeven van de metingen bij onderdruk en overdruk. De n_{50} -waarde is bij bepaling het gemiddelde van de twee. De waarden worden weergegeven in stijgende lijn. Er is geen verband tussen de woningen onderling, maar het is een eenvoudige manier van voorstellen.



Figuur 5. “gemeten n_{50} -waarden bij testwoningen”

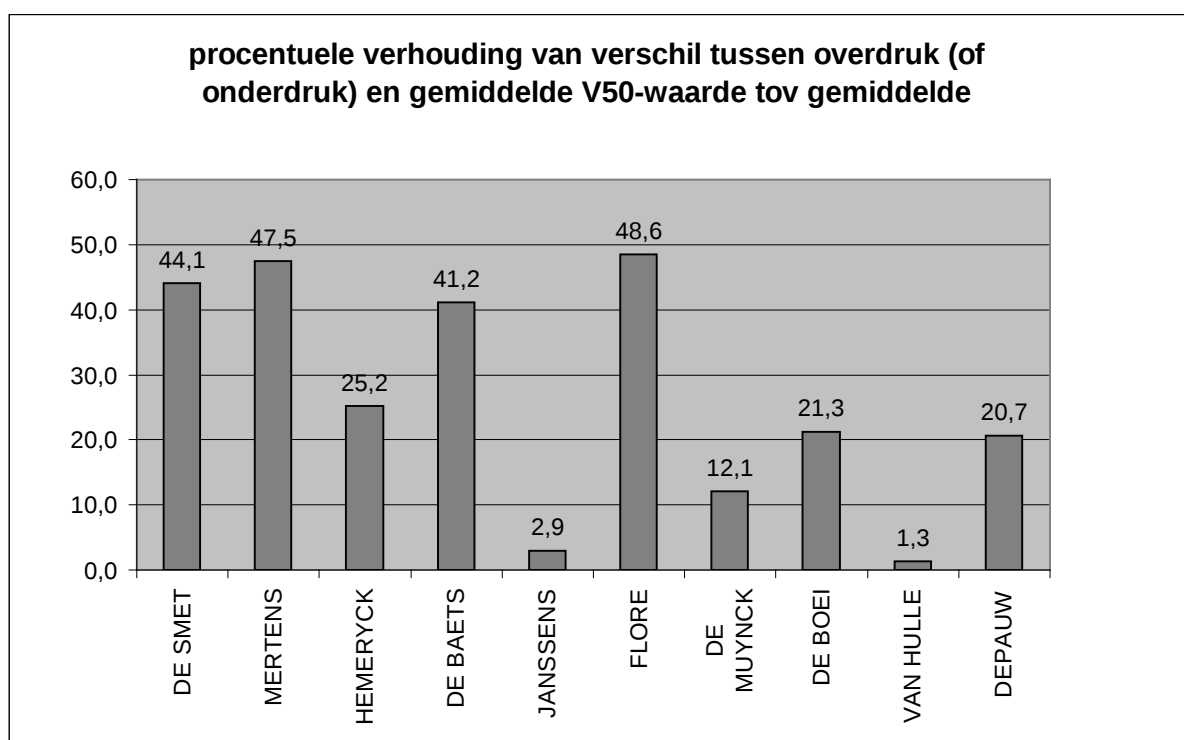
NAAM	n50 overdruk	n50 onderdruk	n50 gemiddeld	q50	compactheid
DE SMET	1,39	0,54	0,97	0,98	0,70
MERTENS	3,98	1,41	2,70	3,96	1,47
HEMERYCK	3,88	2,32	3,10	3,12	1,12
DE BAETS	6,11	2,55	4,33	4,13	0,69
JANSSENS	5,87	5,54	5,70	4,84	0,85
FLORE	10,54	3,65	7,09	5,13	0,72
DE MUYNCK	9,11	7,14	8,13	7,28	0,90
DE BOEI	9,88	6,41	8,14	6,13	0,81
VAN HULLE	15,03	15,43	15,23	11,84	0,68
DEPAUW	21,84	14,36	18,10	16,02	0,94

Tabel 6. “gemeten waardes blowerdoor proef”

Opvallend is het verschil tussen de metingen bij overdruk en die bij onderdruk. In negen van de tien gevallen is de luchtvolumestroom groter bij overdruk. Dit is te wijten aan de stromingscoëfficiënt van een opening: als de stromingsrichting wijzigt kan de stromingscoëfficiënt ook veranderen. In de Vlaamse bouwwijze zit het luchtdichtheidsscherp meestal aan de binnenzijde van de wand (scherp of pleisterwerk). Daardoor moet de lucht bij onderdruk van buiten naar binnen als het ware door een trechter, wat voor een lagere stromingscoëfficiënt zorgt. Bij overdruk wordt de trechter in omgekeerde richting doorlopen, wat in veel gevallen een hoger debiet toelaat bij hetzelfde drukverschil.

Een tweede verklaring zouden we kunnen vinden in de aansluitingen van ramen en deuren. Bij een drukverschil over een raam zal de sluiting van het opengaand deel dichtgedrukt of opengedrukt worden, afhankelijk van de luchtstroming. In Vlaanderen gaan de meeste ramen en deuren echter naar binnen open, waardoor bij overdruk alle delen dicht gedrukt worden. Blijkbaar zijn de gevolgen hiervan verwaarloosbaar, anders zou de luchtvolumestroom bij onderdruk duidelijk groter moeten zijn.

Verder kunnen we er van uitgaan dat bij veel aansluitingen een soort ventiel-effect optreedt: bij overdruk worden de verschillende materialen uit elkaar gedrukt, bij onderdruk worden ze naar elkaar toegezogen. Het is moeilijk de juiste oorzaak te vinden omdat er nog geen specifiek onderzoek gedaan is naar de luchtdoorlatendheid van bouwcomponenten in relatie tot de stromingsrichting. Afgaande op de gegevens die beschikbaar zijn, en het relatieve aandeel van aansluitingen in de totale luchtvolumestroom bij woningen, is het waarschijnlijk dit laatste fenomeen niet te verwaarlozen is voor het grote verschil in debieten.

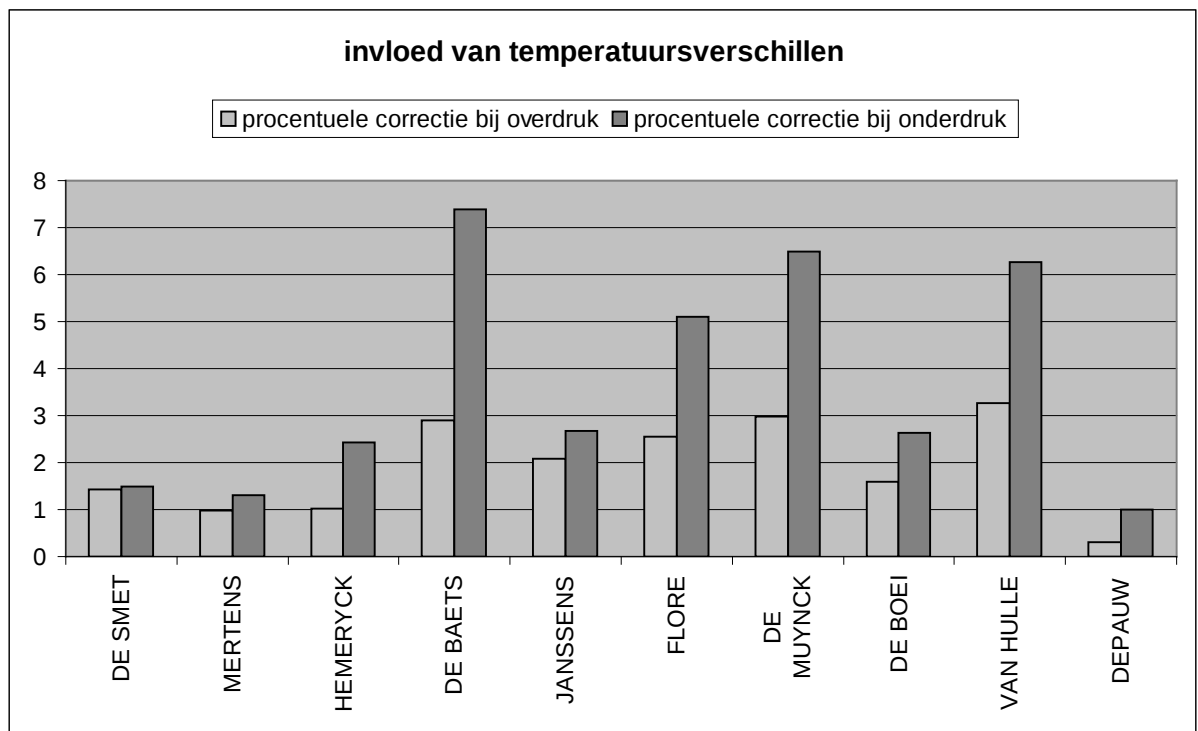


Figuur 6. “verband tussen onderdruk en overdruk”

2.4.1) Correctiefactoren

In de figuur 7 wordt de procentuele correctie aangeduid voor elke meting. Bij overdruk varieert de correctie tussen de 0,3 en 3,3%, bij onderdruk tussen de 1,0 en 7,4%. De correctie ten gevolge van temperatuursverschillen tussen binnen en buiten is dus niet verwaarloosbaar. In principe is ook de relatieve vochtigheid een parameter die voorkomt in de correctieformules, maar als de relatieve vochtigheid stijgt van 25% naar 75% gaat dit gemiddeld slechts gepaard met een afwijking van 0.13% op de uiteindelijke n_{50} -waarde, bovendien kan de relatieve vochtigheid van de binnenruimte schommelen ten gevolge van de proef wat de meting ervan bemoeilijkt.

De correctie is duidelijk groter bij onderdruk metingen, en naarmate het buiten kouder is. Om de verschillende resultaten te vergelijken moeten we de luchtdebieten omrekenen naar debieten bij normomstandigheden: 20°C en 1013hPa. Naarmate de lucht volumestroom over de ventilator kouder is, is de afwijking ten opzicht van normomstandigheden groter. Bij onderdruk wordt er koude buitenlucht via de ventilator naar binnen gezogen, zodat er een grotere correctie nodig is.



Figuur 7. “invloed van temperatuursverschillen op gemeten waardes”

Als we nu de correctie uitzetten ten opzichte van het temperatuursverschil binnen-buiten, zien we dat vooral de correctie bij overdruk lineair evenredig is. Bij overdruk is de correctie vooral gerelateerd aan het verschil in massa tussen koude en warme lucht die door de spleten naar binnen komt.

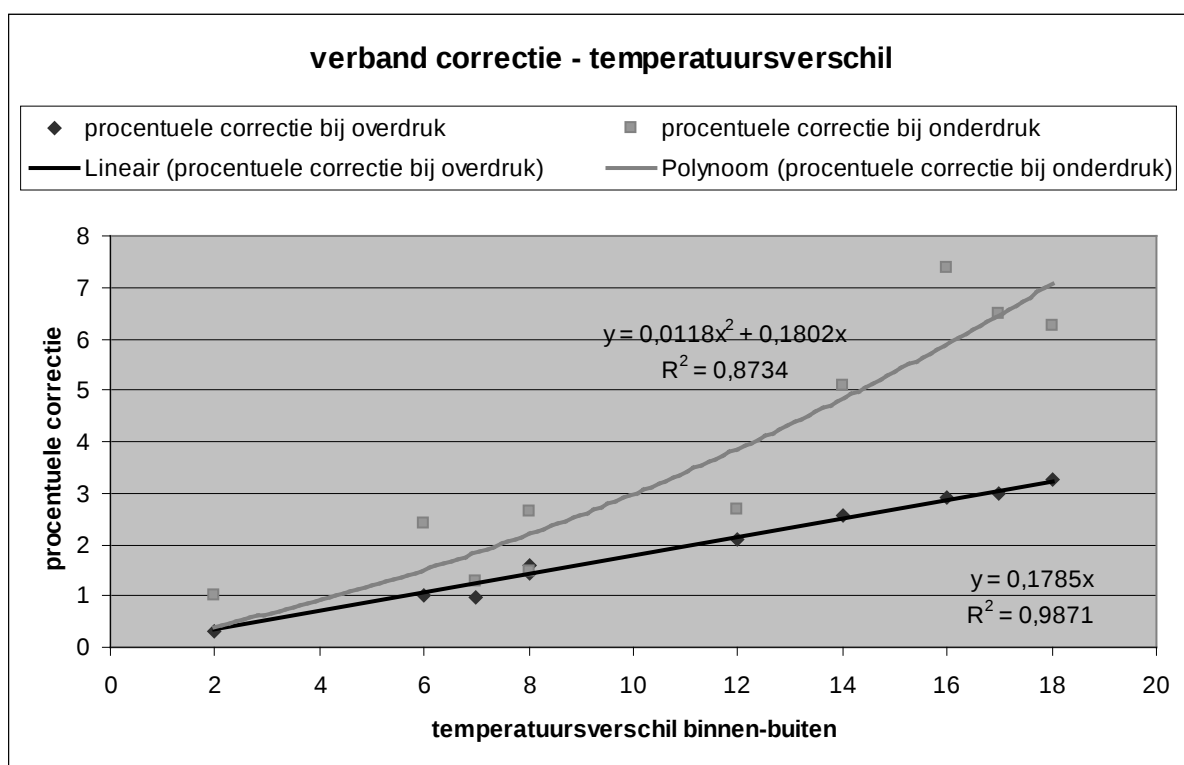
Uit de formule
$$\rho = \frac{p_{bar} - (0,37802 \cdot p_D)}{287,055 \cdot T} \quad \left[\frac{kg \cdot K}{m^3 \cdot Pa} \right]$$

weten we dat de massadichtheid omgekeerd evenredig is met de temperatuur, zodat er inderdaad een lineair verband verwacht kan worden.

Bij onderdruk wordt er koude lucht over de ventilator naar binnen gezogen. Dit temperatuursverschil zal echter niet lineair tot uiting komen in de correctiefactor:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_G(\rho_N) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_H} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\rho_N}{\rho_H} \right)^{n-0.5}$$

Dit komt dan ook tot uiting als we de correctie uitzetten ten opzichte van het temperatuursverschil in figuur 8:

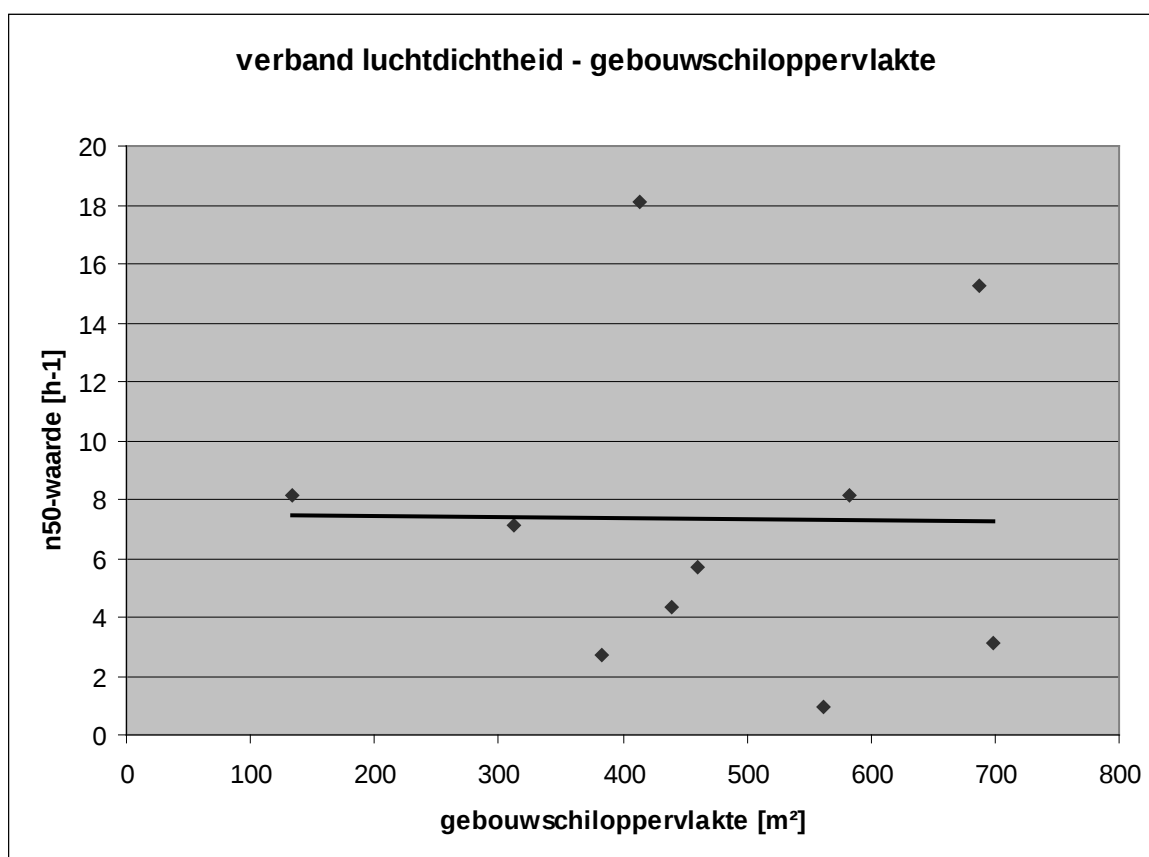


Figuur 8. “verband temperatuursverschil - correctiefactor”

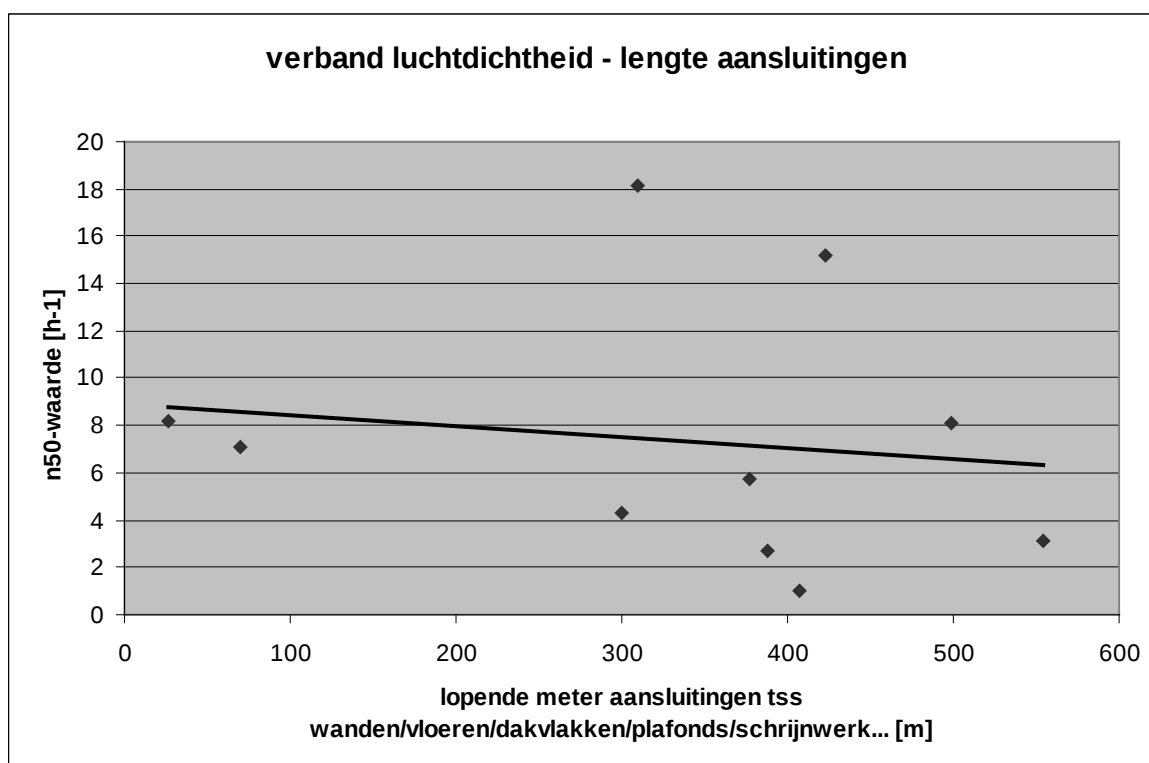
2.4.2) Parameteronderzoek

Aangezien de ‘populatie’ slechts tien woningen bedraagt is het moeilijk om onderzoek te doen naar parameters. Er zijn zoveel factoren die invloed hebben op de luchtdichtheid dat de metingen niet homogeen genoeg zijn om trends waar te nemen. Er is geen eenduidig verband te vinden tussen luchtdichtheid en leeftijd / compactheid / grondoppervlak / dakoppervlak / lopende meter raamaansluiting... Bij wijze van voorbeeld wordt het verband tussen luchtdichtheid en gebouwschiloppervlakte enerzijds en aansluitingen anderzijds weergegeven in figuur 9 en figuur 10.

De oppervlakte van de gebouwschil (grondoppervlak, gevels en dak) blijkt geen goede parameter te zijn om luchtdichtheid aan te relateren. Als we de extreme waarden weglaten krijgen we zelfs een dalende trend, in tegenstelling tot hetgeen we zouden verwachten. Ook de som van alle aansluitingen van gebouwcomponenten blijkt niet evenredig te zijn met de n_{50} -waarde. Bij verschillende schattingsmethodes vormen de aansluitingen in de gebouwschil toch belangrijke factoren voor de luchtdichtheid te bepalen, maar dit kunnen we in onderstaande grafiek niet terug vinden. In tegendeel, hoe meer aansluitingen, hoe beter de luchtdichtheid. Anderzijds is het aantal metingen te klein om duidelijke trends te kunnen onderscheiden.



Figuur 9. “verband luchtdichtheid - gebouwschiloppervlak”



Figuur 10. “verband luchtdichtheid - aansluitingen”

2.4.3) Gebruikstoestand

Als men de blowerdoor proef uitvoert om de n_{50} -waarde te bepalen van een gebouw dienen ventilatieroosters, dampkappen, open haard etc afgeplakt te worden. Daarmee verkrijgen we dus vooral informatie over de algemene luchtdichtheid van de constructie, en minder over de luchtstromen in gebruikstoestand. De invloed van die verschillende elementen is echter te groot om tijdens de meting zo te laten: de meting wordt teveel verstoord en de relatieve invloed ervan is niet altijd even eenvoudig te bepalen. Ook de dampkap, open haard en ventilatieroosters geven aanleiding tot al dan niet gewenste luchtstromen in de ruimte. In verscheidene woningen hebben we het verschil in luchtdebiet gemeten om het relatieve aandeel van die componenten te bepalen ten opzichte van de volumestroom bij normomstandigheden.

2.4.3.1 woning Hemeryck

Bij deze woning werd de mond van de grondbuis in de tuin open gelaten om de gebruikstoestand te simuleren. De metingen werden zowel bij over- als bij onderdruk uitgevoerd. De n_{50} -waarde onder normomstandigheden bedroeg $3,10\text{h}^{-1}$, bij gebruikstoestand $3,31\text{ h}^{-1}$, wat 6,7% hoger is. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van $146\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

2.4.3.2 woning De Baets

Hier werd de dampkap opengelaten om de gebruikstoestand te simuleren. De metingen werden zowel bij over- als bij onderdruk uitgevoerd. De n_{50} -waarde onder normomstandigheden bedroeg $4,33\text{h}^{-1}$, bij gebruikstoestand $4,49\text{ h}^{-1}$, wat 3,5% hoger is. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van $63\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

2.4.3.3 woning Floré

In dit appartement werden de twee extractiemonden in de natte cellen opengelaten. De metingen werden zowel bij over- als bij onderdruk uitgevoerd. De n_{50} -waarde onder normomstandigheden bedroeg $7,10\text{h}^{-1}$, bij gebruikstoestand $7,87\text{ h}^{-1}$, wat 10,8% hoger is. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van $173\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

2.4.3.4 woning De muynck

In deze woning werden de roosters van de mechanische ventilatie (enkel pulsie) open gelaten, en de dampkap werd niet afgeplakt. De metingen werden zowel bij over- als bij onderdruk uitgevoerd. De n_{50} -waarde onder normomstandigheden bedroeg $8,13\text{h}^{-1}$, bij gebruikstoestand $8,23\text{h}^{-1}$, wat 1,2% hoger is. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van $49\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

2.4.3.5 woning Janssens

Hier werd de open haard open gelaten, de dampkap en de rooster van de droogkast niet afgeplakt, maar de verluchttingsroosters werden wel gesloten en afgeplakt. Het effect van de roosters komt hier dus niet in tussen. Er zijn enkel metingen uitgevoerd in overdruk. De n_{50} -waarde onder normomstandigheden en in overdruk bedroeg $5,88\text{h}^{-1}$, bij gebruikstoestand $6,49\text{h}^{-1}$, wat 10,5% hoger is. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van $242\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

2.4.3.6 woning De Boei

In dit appartement werden de extractiemonden in de natte cellen open gelaten. Er zijn enkel metingen uitgevoerd in onderdruk. De n_{50} -waarde onder normomstandigheden in onderdruk bedroeg $6,42\text{h}^{-1}$, bij gebruikstoestand $6,97\text{h}^{-1}$, wat 8,6% hoger is. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van $56\text{m}^3\text{h}^{-1}$.

2.4.3.7 Besluit

De luchtvolumestromen in gebruikstoestand ligt tussen de 1% en de 11% hoger dan de gemeten waardes bij normomstandigheden, op voorwaarde dat er geen roosters voor natuurlijke ventilatie in de buitengevel aanwezig zijn. Verder bekwamen we volgende gegevens:

Grondbuis	146m ³ /h	
Dampkap	63m ³ /h	
Extractiemonden	56m ³ /h	173m ³ /h
Dampkap + ventilatie	49m ³ /h	
Dampkap + open haard + rooster droogkast	242m ³ /h	

Voor een dampkap (met afsluiting) vinden we in SENVIVV $10 - 20 \text{ m}^3/\text{h}$, zonder afsluiting $300 - 600 \text{ m}^3/\text{h}$. Voor een open haard (klep gesloten) vinden we in ASHRAE $48,7 - 209,4 - 448,0 \text{ m}^3/\text{h}$, in SENVIVV $20 \text{ m}^3/\text{h}$. Voor een droogkast met rooster vinden we in ASHRAE $14,1 - 14,6 - 34,1 \text{ m}^3/\text{h}$. (zie hoofdstuk 4)

Alle waarden liggen binnen de grenzen van wat verwacht kon worden. Alleen het lekdebiet door de dampkap is blijkbaar groter. Bovendien zijn de waardes uit de SENVIVV-studie eerder aan de lage kant, de gegevens van ASHRAE sluiten beter aan bij de resultaten.

2.4.4) Ventilatioorosters

Ventilatioorosters bespreken we afzonderlijk omdat deze juist bedoeld zijn om de luchtverversing te regelen in functie van de drukverschillen over de woning. We hebben twee woningen kunnen testen waar er ventilatioorosters ingewerkt waren boven de ramen.

2.4.4.1 Woning Janssens

Er werden metingen uitgevoerd met de ventilatioorosters open en dicht, telkens in overdruk. In totaal zijn in de woning zeven roosters RENSON kleprooster TH90/20 geplaatst. Volgens de technische specificaties zouden deze ongeveer rond de $50 \text{ m}^3/\text{h}$ per lopende meter doorlaten bij 2 Pa drukverschil.

In totaal zijn de roosters samen ongeveer $5,2$ meter lang. Door de roosters open te zetten stijgt de luchtdichtheid van $5,9 \text{ h}^{-1}$ naar $8,3 \text{ h}^{-1}$, wat overeen komt met een stijging van 39% of een lucht volumestroom van $914 \text{ m}^3/\text{h}$. Dit komt op $176 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ per lopende meter bij een drukverschil van 50 Pa . Gaan we uit van een stromingsexponent gelijk aan 0.625 , dan geeft dit een lucht volumestroom door de rooster van $23.5 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ per lopende meter bij een drukverschil van 2 Pa . Dit is de helft van de vooropgestelde waarde van Renson, maar de afwijking door de omrekening kan vrij groot zijn. Het verschil tussen gesloten roosters, en gesloten roosters die bovendien met plakband zijn afgedicht, bedraagt $18 \text{ m}^3/\text{h}$, of een verschil van $0,8\%$.

2.4.4.2 Woning Lambert

In deze woning werden enkel proeven gedaan in onderdruk. Ook hier steeg de luchtdichtheid van $5,9 \text{ h}^{-1}$ naar $8,3 \text{ h}^{-1}$ bij overdruk. Dit komt overeen met een stijging van 39% of een luchtvolumestroom van $1092 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

2.4.5) Blowerdoor

In één woning hebben we getest wat de invloed is van de plaatsing van de blowerdoor. Een meting in onderdruk is uitgevoerd met een standaardplaatsing van het frame, en nadien werd een tweede test uitgevoerd waarbij alle randen van het frame met plakband afgedicht waren. Door de randen af te dichten daalde de luchtvolumestroom met $119 \text{ m}^3/\text{h}$, waardoor de luchtdichtheid verminderde van $8,5 \text{ h}^{-1}$ naar $8,3 \text{ h}^{-1}$ (daling van 3%).

Het belang van een juiste plaatsing van de blowerdoor is dus niet te onderschatten. Bij kleine luchtdichte woningen kan het relatieve aandeel van de installatie zelf dus zeer hoog oplopen. Dezelfde luchtvolumestroom zou theoretisch in een passiefwoning verantwoordelijk kunnen zijn voor 50% van het totale lekdebiet. Verder onderzoek is hier evenwel nodig: in dit geval werd de blowerdoor geplaatst in het kader van een binnendeur naar de garage toe, in een buitendeur is de invloed misschien kleiner.

3) Schatten luchtdichtheid

3.1) Inleiding

Op 1 januari 2006 treedt er een nieuwe wetgeving in voege die de architect verplicht de EnergiePrestatieRegelgeving na te leven. Eén van de aspecten die daar in naar voor komt is de luchtdichtheid van de woning. Architecten kunnen dus speculeren op een bepaalde luchtdichtheid om uiteindelijk te voldoen aan de criteria van het primaire energieverbruik. Om dan die vooropgestelde luchtdichtheid ook daadwerkelijk te realiseren moeten architecten kunnen inschatten welke specifieke maatregelen ze moeten nemen. Als men wacht tot het gebouw voltooid is zullen de kosten voor nabetering veel hoger oplopen dan als de nodige maatregelen al in initiële fase genomen waren. Daarom is het interessant om de luchtdichtheid te kunnen schatten op basis van empirische gegevens en de geometrie van het gebouw. De luchtdichtheid van een woning is echter niet eenvoudig te schatten [67]: deze hangt af van de gebruikte materialen, de afwerkingkwaliteit en de geometrie van de woning. De manier waarop bepaalde materialen bevestigd en gemanipuleerd worden kunnen een hele grote invloed hebben.

3.2) Schattingsmethode AIVC – « Component Air Leakage »^{[18] [32]}

3.2.1) Principe

In Groot-Brittannië heeft men veel ervaring met luchtdichtheidsmetingen op verschillende gebouwonderdelen, zowel in situ als in laboratoria. Op die manier bepaalt men van elk onderdeel de stromingsvergelijking. Bij de methode is men uitgegaan van de mediaan, het 25%-fractiel en het 75%-fractiel. Het 25%-fractiel is de waarde waaronder slecht 25% van de waardes van de testobjecten zich bevinden, wat dus zeer goed is. De 75%-fractiel is de waarde waarvoor 75% van de waardes van de geteste objecten beter of gelijkwaardig is. Telkens zijn de stromingsconstante en de stromingsexponent gegeven, dus als het drukverschil gekend is kunnen we de effectieve luchtstroom berekenen per onderdeel. Deze waardes bestaan voor oppervlaktes, lineaire voegen of spleten, en plaatselijke openingen. De totale luchtstroom

(lekdebiet) door een gebouwschil bij hetzelfde drukverschil is dan de som van alle afzonderlijke stromen vermenigvuldigd met hun respectievelijke oppervlaktes en lengtes.

De visuele schatting kan leiden tot een overschatting of een onderschatting van het reële lekdebiet, want we baseren ons op gemiddeldes per lek. Bij de controle kunnen we bepaalde lekken niet zien of meten, zodat we mogen verwachten dat de schatting meestal een ondergrens zal zijn voor het werkelijke lekdebiet. Deze methode ligt ook aan de basis van de schattingen in de SENVIVV-studie[20].

Hier bestaat de moeilijkheid er in de juiste waardes te kiezen, en te bepalen wat we beschouwen als een slechte, een gemiddelde en een goede uitvoering van een aansluiting. In onderstaande tabellen worden de waardes uit de *technical note AIVC 44* omgezet naar gegevens die eenvoudig te verwerken zijn. Bij de uiteindelijke resultaten moet men er wel rekening mee houden dat:

1. de waardes enkel geldig zijn bij een drukverschil van 50 Pa
2. bij gebrek aan gegevens voor een bepaald element werd de stromingsexponent gelijkgesteld aan 0.66 (waarde overgenomen van het AIVC)
3. er is gerekend met een gemiddelde luchttemperatuur van 20°C, hetgeen overeenkomt met een $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$
4. *Technical note 44* verschenen is in maart 1994. Dezelfde gegevens zijn echter wel herhaald in ‘*Applicable models for air infiltration and ventilation calculations*’ van 1999 [32], hetgeen er op wijst dat de gegevens op dat moment niet achterhaald waren.

In tabellen 7 tot 14 werden niet alle gegevens uit technical note 44 overgenomen. Indien de beschrijving van het gebouwonderdeel te vaag was, of indien de gegevens gebaseerd waren op één enkel testobject hebben we er voor gekozen deze niet over te nemen.

3.2.1.1 Ramen

Gegevens per lopende meter voeg	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50} : m^3.h^{-1}.m^{-1}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Ramen met tochtlat									
Draaiend	0.086	0.6	3.24	0.13	0.6	4.89	0.41	0.6	15.4
Schuivend	0.079	0.6	2.97	0.15	0.6	5.65	0.21	0.6	7.91
Ramen zonder tochtlat									
Draaiend	0.39	0.6	14.7	0.74	0.6	27.9	1.1	0.6	41.4
Schuivend	0.18	0.6	6.78	0.23	0.6	8.66	0.37	0.6	13.9

Tabel 7. “lekkage componenten ASHRAE - ramen”

3.2.1.2 Deuren

Gegevens per lopende meter voeg	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50} : m^3.h^{-1}.m^{-1}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Buitendeuren									
Met tochtlat									
Draaiend	0.082	0.6	3.09	0.27	0.6	10.2	0.84	0.6	31.6
Ronddraaiend	1.0	0.6	37.6	1.5	0.6	56.5	2.0	0.6	75.3
Buitendeuren									
Zonder tochtlat									
Draaiend	1.1	0.6	41.4	1.2	0.6	45.2	1.4	0.6	52.7
Binnendeuren									
Zonder tochtlat	1.1	0.6	41.4	1.3	0.6	48.9	2.0	0.6	75.3

Tabel 8. “lekkage componenten ASHRAE - deuren”

3.2.1.3 Voegen tussen schrijnwerk en muur

Gegevens per lopende meter voeg	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50} : m^3.h^{-1}.m^{-1}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Geplamuurde voegen	3.3 x 10^{-4}	0.6	0.01	2.5 x 10^{-3}	0.6	0.09	12 x 10^{-3}	0.6	0.45
Niet-geplamuurde voegen	53 x 10^{-3}	0.6	2.00	61 x 10^{-3}	0.6	2.30	67 x 10^{-3}	0.6	2.52

Tabel 9. “lekkage componenten ASHRAE – voegen schrijnwerk”

3.2.1.4 Muren, vloeren en plafonds

Gegevens per m ² oppervlakte, voegen inbegrepen	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: dm³.s⁻¹.m⁻².Pa⁻ⁿ $\dot{V}_{50} : m^3.h^{-1}.m^{-2}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Baksteen	0.022	0.84	2.12	0.043	0.80	3.53	0.094	0.76	6.62
Baksteen gepleisterd	0.016	0.86	1.66	0.018	0.85	1.80	0.021	0.84	2.02
Baksteen met gipsplaat	0.010	0.88	1.12	0.042	0.81	3.60	0.18	0.72	10.8
Planchetten zonder dichting	0.010	0.88	1.12	0.032	0.82	2.84	0.10	0.76	7.06
Planchetten met dichting	6.9 x 10 ⁻³	0.90	0.83	0.012	0.87	1.30	0.015	0.86	1.55
Betonblok bloot	0.082	0.77	6.01	0.13	0.74	8.46	2.0	0.59	72.4
Betonblok + binnenbepleistering	0.021	0.84	2.02	0.021	0.84	2.02	0.021	0.84	2.02
Prefabpaneel beton	0.050	0.80	4.10	0.11	0.75	7.45	0.12	0.74	7.81
Metalen panelen (muren)	0.076	0.77	5.58	0.090	0.76	6.34	0.13	0.74	8.46
Gordijngewel	0.089	0.76	6.26	0.12	0.74	7.81	0.14	0.74	9.11
Gipsplaat plafond	0.042	0.81	3.60	0.11	0.75	7.45	0.20	0.72	12.0

Tabel 10. “lekkage componenten ASHRAE - wanden”

3.2.1.5 Voegen tussen plafond / muur / vloer

Gegevens per lopende meter voeg	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50}: m^3.h^{-1}.m^{-1}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
muur vloer/plafond									
Geplamuurd									
Baksteen/ beton	5.0 x 10^{-3}	0.6	0.18	0.024	0.6	0.9	0.11	0.6	4.14
Hout hout / vezelplaat	6.6 x 10^{-3}	0.6	0.01	0.011	0.6	0.43	0.015	0.6	0.58
Hout beton	0.052	0.6	1.94	0.083	0.6	3.13	0.11	0.6	4.14
Niet geplamuurd									
Baksteen/ beton	0.45	0.6	17.0	0.49	0.6	18.4	0.53	0.6	16.3
Hout hout / vezelplaat	0.008	0.6	0.29	0.023	0.6	0.86	0.030	0.6	1.12

Tabel 11. “lekkage componenten ASHRAE – voegen tussen plafond/muur/vloer”

3.2.1.6 Voegen tussen muren

Gegevens per lopende meter voeg	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50}: m^3.h^{-1}.m^{-1}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Geplamuurd									
Hout hout	6.7 x 10^{-4}	0.6	0.04	1.6 x 10^{-3}	0.6	0.07	3.4 x 10^{-3}	0.6	0.14

Tabel 12. “lekkage componenten ASHRAE – voegen tussen muren”

3.2.1.7 Doorboringen

Gegevens per lopende meter omtreksvoeg	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50}: m^3.h^{-1}.m^{-1}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Buizen	0.63	0.6	23.7	0.74	0.6	27.9	0.84	0.6	31.6

Tabel 13. “lekkage componenten ASHRAE - doorboringen”

3.2.1.8 Schouwen

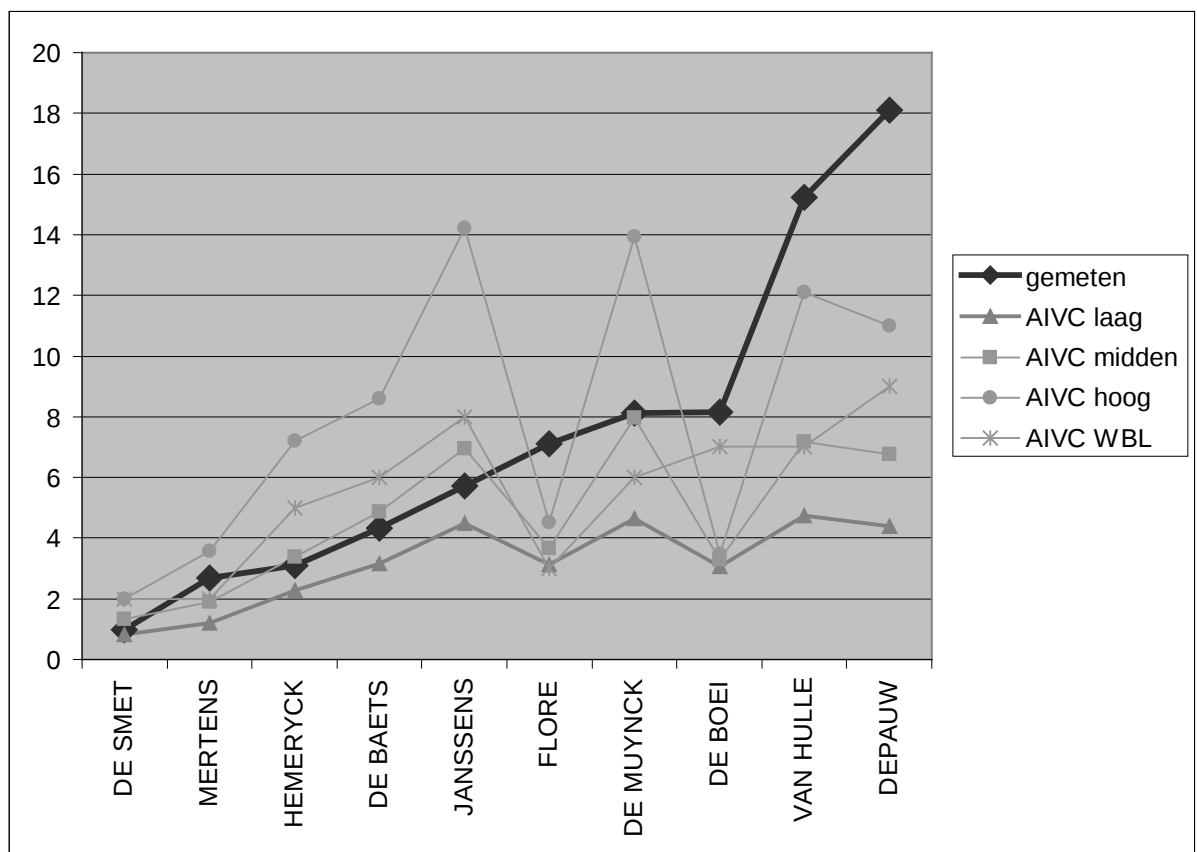
Gegevens per m ² schouwdoorsnede	Lager kwartiel			Mediaan			Hoger kwartiel		
	<i>Stromingsvgl: $dm^3.s^{-1}.m^{-2}.Pa^{-n}$ $\dot{V}_{50}: m^3.h^{-1}.m^{-2}$</i>								
	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$	C	n	$\dot{V}_{50}$
Open schouw	670	0.5	17 x 10 ³	750	0.5	19 x 10 ³	790	0.5	20 x 10 ³
Schouw met houten klep	180	0.5	4.6 x 10 ³	180	0.5	4.6 x 10 ³	180	0.5	4.6 x 10 ³

Tabel 14. “lekkage componenten ASHRAE - schouwen”

In veel gevallen is het moeilijk in te schatten of een constructieonderdeel of –aansluiting tot het lager kwartiel behoort, de mediaan, dan wel het hoger kwartiel. Daarom hebben we de methode opgesplitst naar drie aparte berekeningen: één met lage waarden, één met de mediaanwaarden en één met de hoge waarden.

3.2.2) AIVC laag

De resultaten vormen een duidelijke ondergrens voor de werkelijke luchtdichtheid: geen enkele gemeten waarde ligt lager dan de schatting. De gemiddelde afwijking is 45%, zonder een opdeling te maken naar de typologie van de woningen.



Figuur 11. “schattingsmethodes AIVC laag”

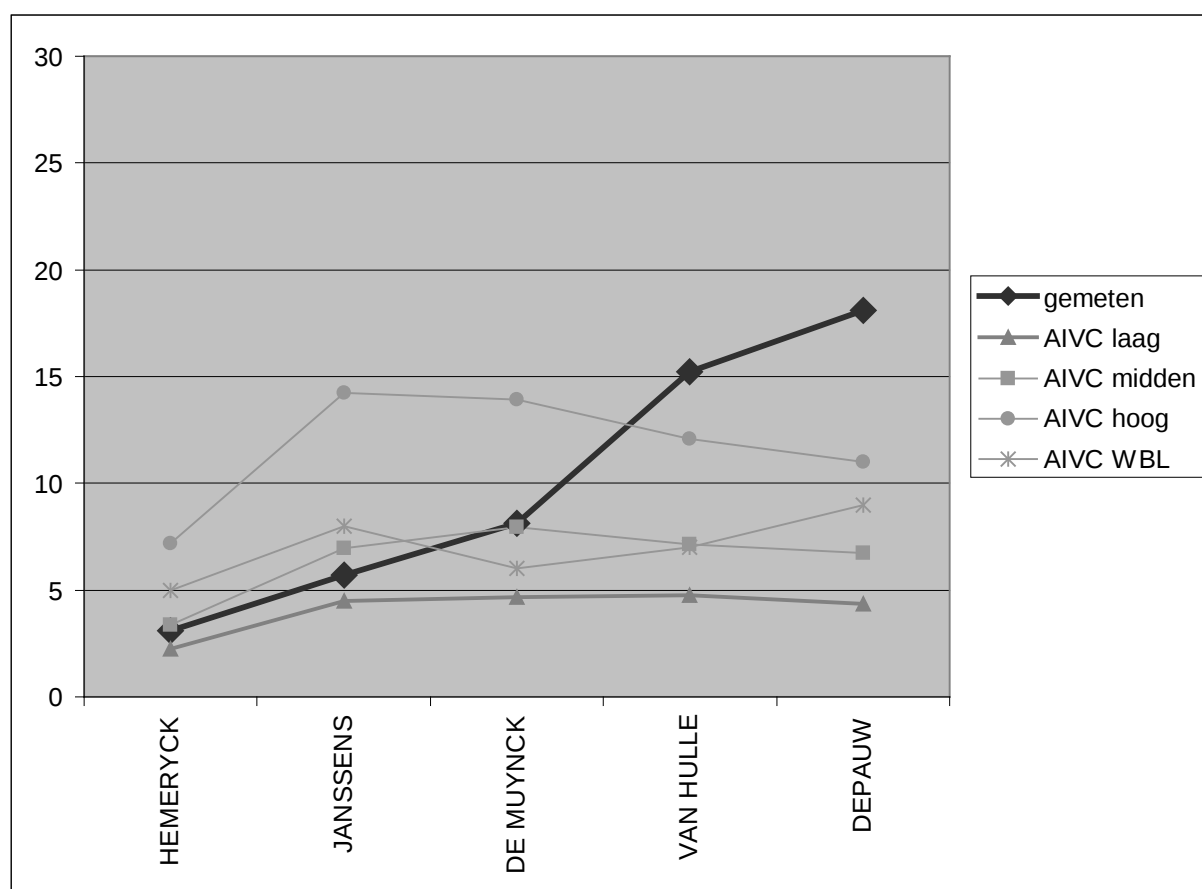
Bij de meer luchtdichte woningen is er nog een verband te zien, maar bij de andere duidelijk niet. De relatieve fout loopt op tot 76%: een woning met een n_{50} -waarde van 18.10 wordt geschat op 4.38. Bij de vijf meest luchtdichte woningen is de schatting nog redelijk aanvaardbaar, op de woning Mertens na.

3.2.2.1 Open bebouwing

Als we enkel naar de open bebouwing kijken is de gemiddelde afwijking met de gemeten waarden 47%.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	AIVC laag	% AFW
HEMERYCK	3,1	2,27	-27
JANSSENS	5,71	4,49	-21
DE MUYNCK	8,13	4,65	-43
VAN HULLE	15,23	4,75	-69
DEPAUW	18,10	4,38	-76

Tabel 15. “schattingsmethodes AIVC laag”



Figuur 12. “schattingsmethodes AIVC laag – open bebouwing”

3.2.2.2 Houtskeletbouw

De gemiddelde afwijking bij houtskeletbouw is 35%. De woningen in houtskeletbouw zijn zeer luchtdicht uitgevoerd, dus het is te verwachten dat de afwijking kleiner zal zijn.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	AIVC laag	% AFW
DE SMET	0,97	0,84	-14
MERTENS	2,7	1,2	-56

Tabel 16. “schattingsmethodes AIVC laag - houtskeletbouw”

3.2.2.3 Appartementen

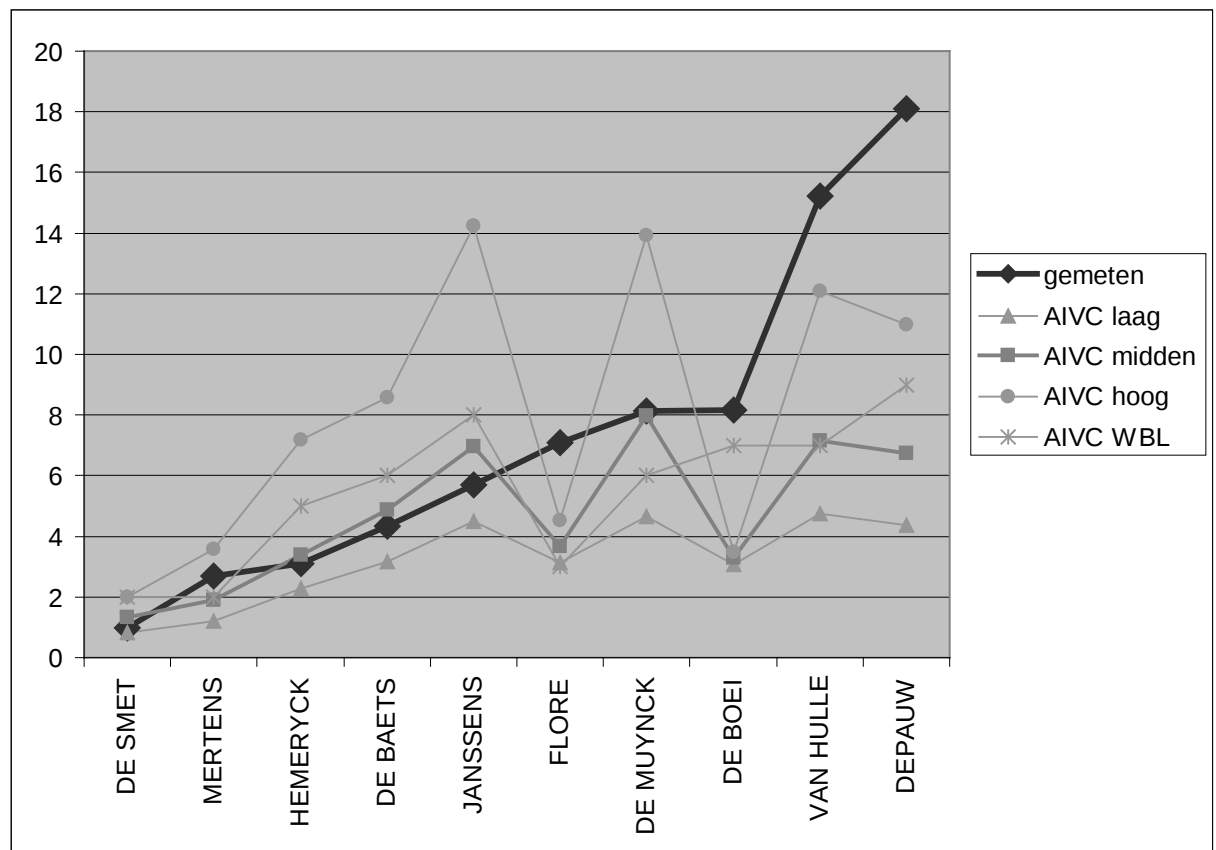
Bij appartementen is de gemiddelde afwijking 60%, wat dus nogal hoog is.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	AIVC laag	% AFW
FLORE	7,10	3,13	-56
DE BOEI	8,15	3,06	-63

Tabel 17. “schattingsmethodes AIVC laag - appartementen”

3.2.3) AIVC midden

De gemiddelde afwijking over alle beproefde woningen is 34%, wat het beste is van alle schattingsmethodes. De grootste afwijking is 63%.



Figuur 13. “schattingsmethodes AIVC midden”

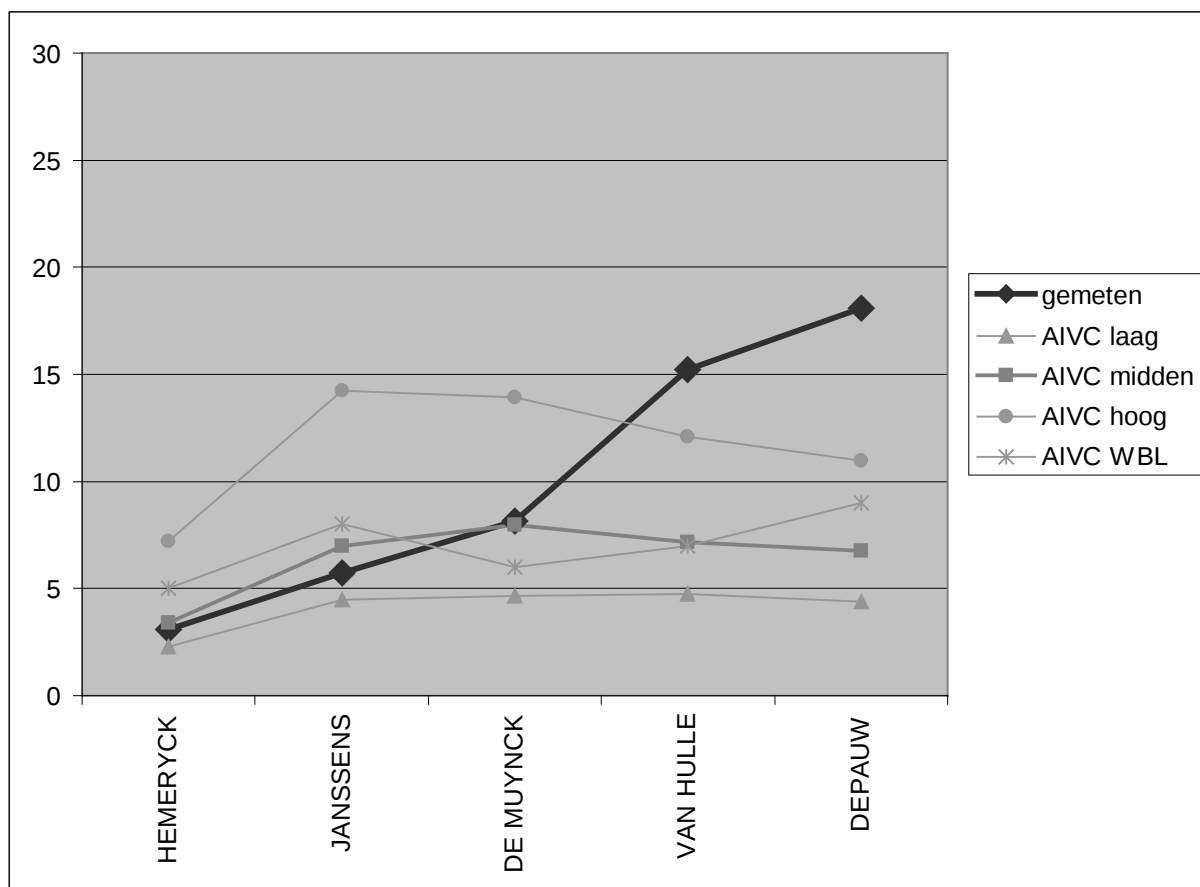
Deze methode blijkt vrij accuraat te zijn, behalve voor appartementen en heel luchtopen woningen. Daar tegenover staat natuurlijk dat we moeilijk kunnen schatten of een woning erg luchtopen is of niet, daarom maken we juist gebruik van de schattingsmethodes.

3.2.3.1 Open bebouwing

De afwijking bij open bebouwing bedraagt 30%, waardoor deze methode de beste schattingen maakt. Ook hier blijven de afwijkingen bij de minder luchtdichte woningen vrij groot. Deze methode mag dan al gemiddeld de kleinste afwijking vertonen met de gemeten waarde, de resultaten zijn in sommige gevallen te afwijkend. Specifieke elementen die zorgen voor een slechte luchtdichtheid worden niet in rekening gebracht. Dit heeft dus vooral te maken met de uitvoeringskwaliteit van bepaalde aansluitingen. De geometrische specificaties van een woning zijn dus niet voldoende om een schatting te maken van de luchtdichtheid. Er moet een zekere aanduiding aan te pas komen om de specifieke uitvoeringskwaliteit van elke woning te duiden en zodoende een betere schatting te bekomen.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	AIVC midden	% AFW
HEMERYCK	3,1	3,39	9
JANSSENS	5,71	6,96	22
DE MUYNCK	8,13	7,97	-2
VAN HULLE	15,23	7,16	-53
DEPAUW	18,10	6,75	-63

Tabel 18. “schattingsmethodes AIVC midden”



Figuur 14. “schattingsmethodes AIVC midden – open bebouwing”

3.2.3.2 Houtskeletbouw

De gemiddelde afwijking bij houtskeletbouw is 34%, waardoor de schattingsmethode ook bij deze typologie vrij goede benaderingen maakt.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	AIVC midden	% AFW
DE SMET	0,97	1,33	37
MERTENS	2,7	1,89	-30

Tabel 19. “schattingsmethodes AIVC midden - houtskeletbouw”

3.2.3.3 Appartementen

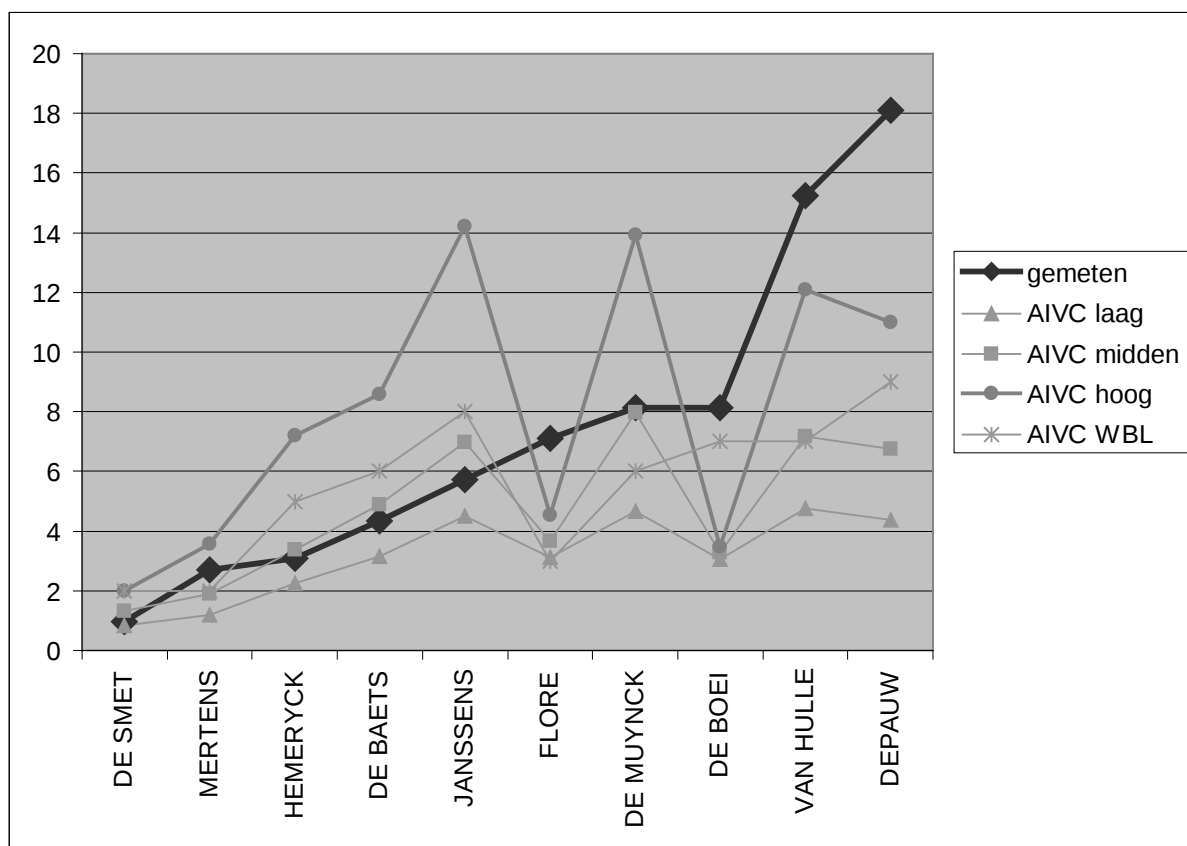
De luchtdichtheid bij de appartementen wordt duidelijk te laag ingeschat.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	AIVC midden	% AFW
FLORE	7,10	3,67	-48
DE BOEI	8,15	3,29	-60

Tabel 20. “schattingsmethodes AIVC midden - appartementen”

3.2.4) AIVC hoog

Deze schattingen vormen een bovengrens voor slechts een aantal metingen, vier van de tien metingen zijn groter dan de schatting. De gebruikte waarden om tot de schatting te komen zijn geen maximumwaarden zijn, maar 75%-fractielwaarden. Als we nu voor elk materiaal en elke aansluiting deze hoge waarden gebruiken zijn er blijkbaar veel woningen die in werkelijkheid minder luchtdicht zijn dan de schatting aangeeft. Een gemiddelde afwijking van 74% is te hoog om te kunnen dienen als algemeen bruikbare schattingsmethode.



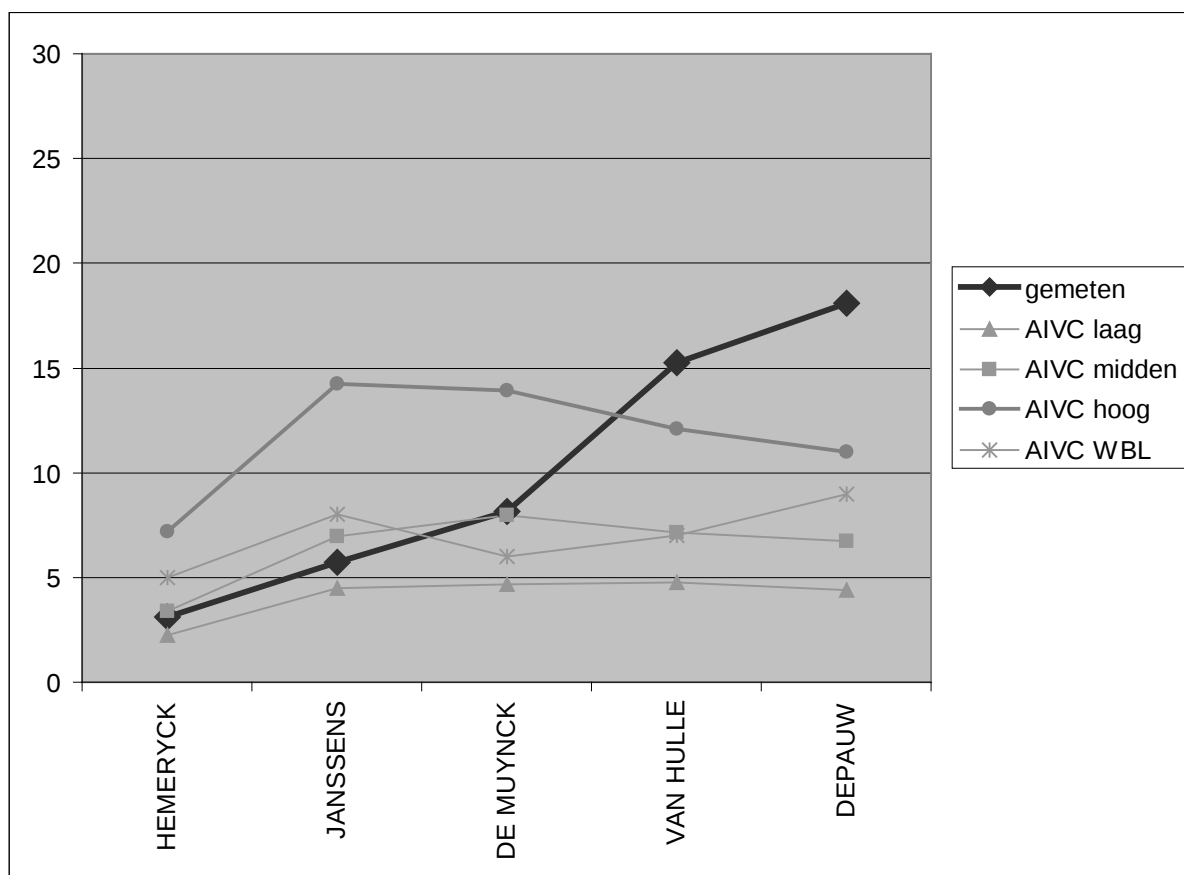
Figuur 15. “schattingsmethodes AIVC hoog”

3.2.4.1 Open bebouwing

De gemiddelde afwijking is 82% voor open bebouwing. Als we kijken naar de relatieve afwijkingen is het duidelijk dat de bepalende factoren voor luchtdichtheid door deze gegevens niet naar voor wordt gebracht. De waardeverdeling voor luchtlekkage die vooropgesteld wordt in de methode komt dus niet overeen met de werkelijkheid.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	AIVC hoog	% AFW
HEMERYCK	3,1	7,19	132
JANSSENS	5,71	14,23	149
DE MUYNCK	8,13	13,93	71
VAN HULLE	15,23	12,09	-21
DEPAUW	18,10	10,99	-39

Tabel 21. “schattingsmethodes AIVC hoog”



Figuur 16. “schattingsmethodes AIVC hoog – open bebouwing”

3.2.4.2 Houtskeletbouw

Ook voor houtskeletbouw is deze methode niet geschikt.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	AIVC hoog	% AFW
DE SMET	0,97	1,98	104
MERTENS	2,7	3,57	32

Tabel 22. “schattingsmethodes AIVC hoog - houtskeletbouw”

3.2.4.3 Appartementen

De appartementen worden veel luchtdichter ingeschat dan ze in werkelijkheid zijn.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	AIVC hoog	% AFW
FLORE	7,10	4,53	-36
DE BOEI	8,15	3,49	-57

Tabel 23. “schattingsmethodes AIVC hoog - appartementen”

3.2.5) Besluit

De “component air leakage”-methode van het AIVC laat toe om de kwaliteit van uitvoering in rekening te brengen bij de schatting. Die kwaliteit is in veel gevallen moeilijk in te schatten. Als de woning nog in planningsfase zit, heeft men nog geen zekerheden over de uitvoeringskwaliteit. Wil men de luchtdichtheid schatten van een bestaande woning, weet men vaak niet hoe goed bepaalde aansluitingen zijn uitgewerkt, en waar er eventuele tekortkomingen zitten. Zelfs indien men documentatie zou hebben van elk detail van de woning, moet men inschatten hoe luchtdicht het details is: laag, middel of hoog.

Als we enkel rekenen met alle lage waarden, alle middel waarden en alle hoge waarden kunnen we volgende conclusies trekken:

AIVC laag vormt een ondergrens voor alle metingen.

AIVC midden is gemiddeld de beste schattingsmethode over alle woningen bekeken , met een afwijking van 34%

AIVC midden is gemiddeld de beste schattingsmethode voor open bebouwing met een afwijking van 30%. Voor halfopen bebouwing is de afwijking slechts 13%, maar dit betreft slechts één woning.

AIVC hoog maakt onnauwkeurige schattingen, en ze vormt ook geen bovengrens voor de metingen. De relatieve lekkageverdeling komt blijkbaar niet overeen met de werkelijkheid.

3.3) Schattingsmethode AIVC – « Whole Building

Leakage »^[18]

3.3.1) Principe

In Groot-Brittannië heeft men een vrij grote ervaring met luchtdichtheidsmetingen op verschillende types gebouwen. Men kan dus van elke gebouwtypologie gemiddelde waarden en standaardafwijkingen berekenen. Om nu de luchtdichtheid van één enkel gebouw te schatten, gaat men uit van een bepaalde n_{50} -waarde per typologie, berekend op basis van de gemiddelde luchtdichtheid. Bij dit getal hoort een lijst waarop gebouweigenschappen voorkomen, en naargelang de specifieke uitvoeringskwaliteiten en –modaliteiten van de woning wordt de gegeven n_{50} -waarde verhoogd of verlaagd.

Er zijn dergelijke systemen ontwikkeld voor 5 types gebouwen

- | | |
|------------------------------------|------------------------------|
| 1. houtskeletbouw (laagbouw) | $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ |
| 2. baksteenconstructies (laagbouw) | $n_{50} = 8 \text{ h}^{-1}$ |
| 3. beton/gordijngevels (hoogbouw) | $n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$ |
| 4. betonconstructies (industrie) | $n_{50} = 10 \text{ h}^{-1}$ |
| 5. metalen platen (industrie) | $n_{50} = 12 \text{ h}^{-1}$ |

Aan de hand van lijsten wordt elke waarde nog gecompenseerd volgens uitvoering van het gebouw.

Parameters waarvoor de n_{50} -waarde verhoogd wordt: ontbreken luchtdichtheidsscherm, aanwezigheid kruipruimte, complex grondplan, ontbreken tochtstrippen deuren en ramen, lage kwaliteit voegafwerking, ouderdom van gebouw.

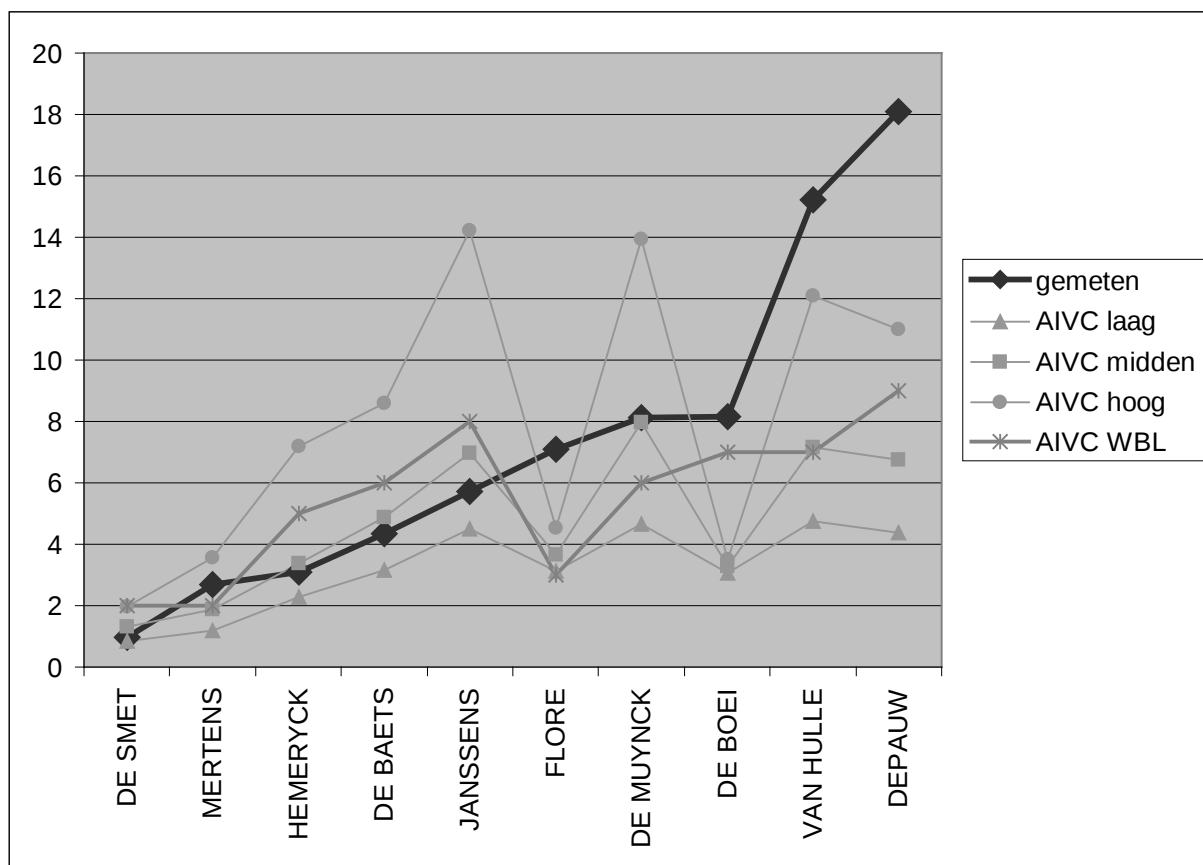
Eigenschappen waardoor de n_{50} -waarde naar beneden gaat: afgedichte deuren en ramen, gesloten of halfopen bebouwing, gepleisterde binnenmuren, afgewerkte voegen.

Deze methode is een bijzonder snelle maar ruwe schatting, men kan op amper 1 minuut tijd een schatting maken van de luchtdichtheid. Er wordt uitgegaan van gemiddelde waarden,

maar men kan zich afvragen hoe gemiddeld die waren. Wat was de gemiddelde ouderdom van gebouw, wat was de gemiddelde gebouwgrootte? Waren er veel ramen, weinig ramen...? En hoe is men gekomen tot de waardes die men kan bijtellen of aftrekken voor gebouweigenschappen? Zijn deze bekomen uit statistisch onderzoek, en wat is de betrouwbaarheid van de resultaten? Dit document is ook opgesteld voor gebouwen in Groot-Brittannië in 1994. Het verschil met de Belgische bouwwijze anno 2005 kan aanzienlijk zijn. We berekenen ook geen K-waardes van woningen op basis van het Vlaamse gemiddelde in 1994, plus een waarde per extra cm isolatie. Het is dan ook af te raden deze methode te gebruiken om tot betrouwbare informatie te komen.

3.3.2) Schattingen

De gemiddelde afwijking met de gemeten waardes is 48%, wat eigenlijk nog meevalt voor een methode die slechts rekening houdt met enkele bouwparameters. In 6 van de 10 gevallen schat ze de luchtdichtheid te laag in. De grootteorde van de schatting klopt ongeveer wel, maar het aantal parameters dat in rekening gebracht wordt is te laag om tot echt goede resultaten te komen. Bij deze methode wordt er wel gedeeltelijk rekening gehouden met de uitvoeringskwaliteit.



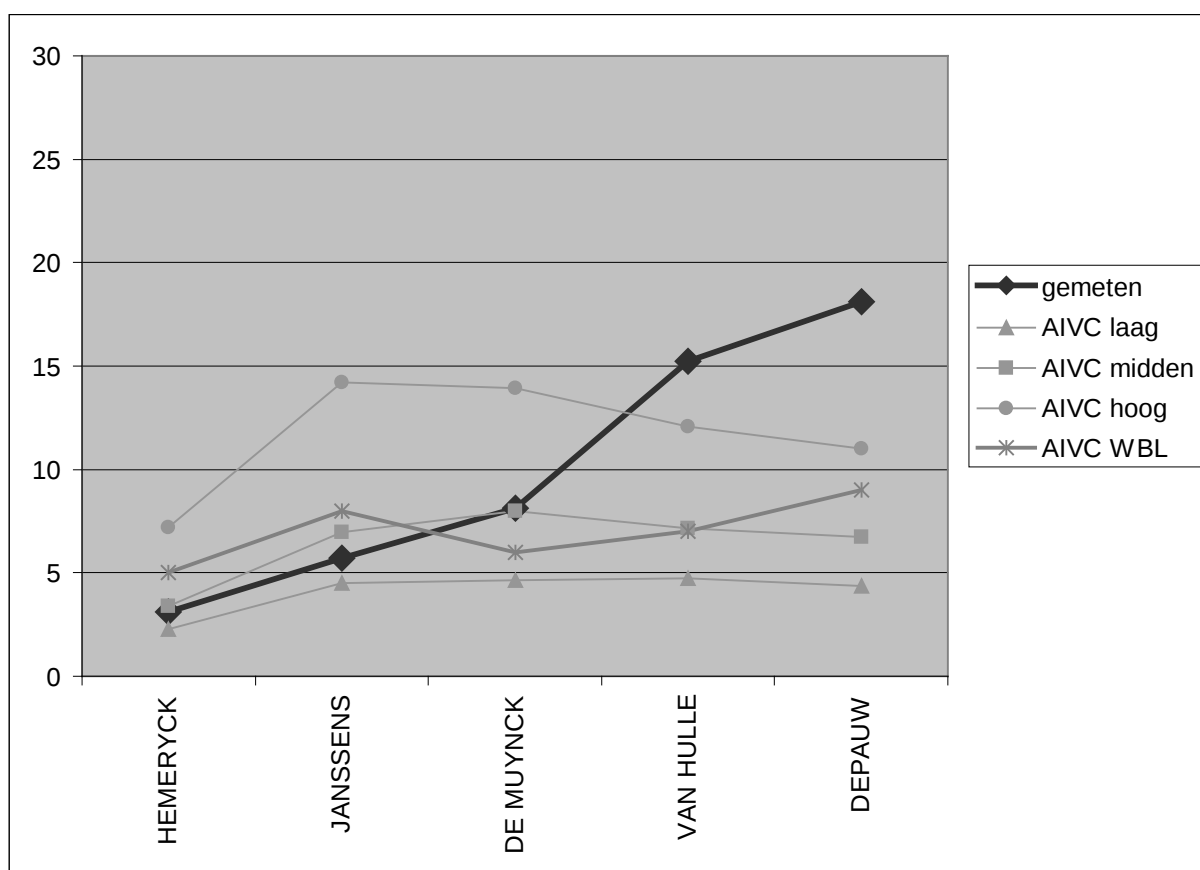
Figuur 17. "schattingsmethodes AIVC whole building leakage"

3.3.2.1 Open bebouwing

De gemiddelde afwijking bij open bebouwing is 46%. Toch is deze methode niet zo geschikt, omdat de geschatte waarde soms de helft, soms bijna het dubbele is van de gemeten waarde. De methode speelt duidelijk te weinig in op de geometrie van de woning.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	AIVC WBL	% AFW
HEMERYCK	3,1	5,00	61
JANSSENS	5,71	8,00	40
DE MUYNCK	8,13	6,00	-26
VAN HULLE	15,23	7,00	-54
DEPAUW	18,10	9,00	-50

Tabel 24. "schattingsmethodes AIVC whole building leakage"



Figuur 18. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage – open bebouwing”

3.3.2.2 Houtskeletbouw

Ook voor houtskeletbouw is deze methode niet geschikt. We zien wel dat de n_{50} -waarde laag wordt ingeschat, maar ook hier is het aantal relevante parameters die gebruikt worden te klein.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	AIVC WBL	% AFW
DE SMET	0,97	2,00	106
MERTENS	2,7	2,00	-36

Tabel 25. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage - houtskeletbouw”

3.3.2.3 Appartementen

De appartementen worden veel luchtdichter ingeschat dan ze in werkelijkheid zijn, en de afwijking is te groot om van een bruikbare methode te spreken.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	AIVC WBL	% AFW
FLORE	7,10	3,00	-58
DE BOEI	8,15	7,00	-14

Tabel 26. “schattingsmethodes AIVC whole building leakage - appartementen”

3.3.3) Besluit

Hoewel de gemiddelde afwijking relatief laag is, raden we toch aan deze methode niet te gebruiken: de gemeten waarde is soms de helft, soms bijna het dubbele van de schatting.

3.4) Schattingsmethode ASHRAE^[14]

3.4.1) Principe

In ASHRAE – Fundamentals 1993 [14] is een lijst opgenomen met gegevens over de luchtdoorlatendheid van gebouwcomponenten. De gegevens worden uitgedrukt in “Effective Leakage Area [m²]”, een grootheid die de effectieve lekoppervlakte geeft van een opening met C_d gelijk aan 1 bij een drukverschil van 4 Pa (zie 1.2.1.4).

We willen deze gegevens omrekenen naar $\dot{V}_{50}$ -waarden om ze te kunnen vergelijken met gegevens uit andere bronnen. We gebruiken daarvoor volgende formule:

$$c = C_d \cdot L \cdot \left(\frac{2}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (\Delta p)^{\frac{1}{2-n}} \left[\frac{m^3}{s \cdot Pa^n} \right]$$

Waarbij: c = stromingscoëfficiënt [m³ / s.Paⁿ]
 C_d = weerstandsgetal [-]
 L = effectieve lekoppervlakte [m²]
 ρ = massadichtheid lucht [kg / m³]
 Δp = referentiedruk [Pa] of [kg / m.s²]
 n = stromingsexponent [-]

We stellen : C_d = 1
 ρ = 1.226 kg / m³
 Δp = 4 Pa
 n = 0.66

Enkel bij de stromingsexponent moeten we een onzekere aanname maken die niet te verifiëren is. We weten vrij zeker dat deze tussen 0.6 en 0.7 zal liggen. De waarde 0.66 is de gemiddelde waarde voor gebouwen volgens ASHRAE.

Zodoende krijgen we : $c = 1,023 L$

In de tabel heeft men een onderscheid gemaakt tussen een gemiddelde, laagste en hoogste gevonden waarde. We wijzen er op dat deze niet overeenkomen met de 25% en 75%-fractielen die gebruikt worden in *Technical note AIVC 44*. Om de gegevens te vergelijken zouden we moeten uitgaan van een bepaalde statistische verdeling van de testresultaten en een verband opstellen tussen enerzijds de maximale waarde en de 75%-fractiel en anderzijds tussen de minimale waarde en de 25%-fractiel. We weten ook niet uit hoeveel metingen deze gegevens afkomstig zijn. Als men slechts over 3 testresultaten beschikt, heeft men onmiddellijk de minimale waarde, mediaan en maximale waarde. Uitgaande van de specifieke methode gebruikt in het AIVC komen deze dan wel overeen met het 25% en het 75%-fractiel. Als men over 100 testresultaten beschikt is het al een stuk moeilijker om te zeggen wat de verhouding is tussen de minimale waarde en de 25%-fractiel. Strikt genomen zijn ook de mediaan en het gemiddelde niet gelijk aan elkaar. De fout die daarmee gepaard gaat kan groter worden naarmate het aantal testobjecten kleiner wordt. Helaas beschikken we niet over voldoende gegevens om hier een concrete uitspraak over te doen.

Verder dienen we nog op te merken dat de gegevens dateren van 1993 en we weten niet voor welk type woningen de gegevens representatief zijn. De Amerikaanse standaard voor luchtdichtheid van vb ramen kan anders zijn dan in België, ook de traditionele uitvoering van een aantal details zorgen ervoor dat de tabel misschien niet representatief is voor ons woningenbestand.

De gegevens van de tabel gaan we converteren naar meer bruibare eenheden, en de verdeling met minima, gemiddelde en maxima aanhouden. Omdat het niet mogelijk is de gegevens te vergelijken met die van het AIVC zullen we deze verwerken als een aparte schattingsmethode.

3.4.1.1 Gebouwcomponenten

COMPONENT	EENHEID	MIN.	GEM.	MAX.	MIN.			GEM.			MAX.		
	L	L	L	L	C	n	V	C	n	V	C	n	V
					m ³ /s.Pa ⁿ	-	m ³ /h/m ²	m ³ /s.Pa ⁿ	-	m ³ /h/m ²	m ³ /s.Pa ⁿ	-	m ³ /h/m ²
plafond													
normaal	cm ² /m ²	0,79	1,8	2,8	8,082E-05	0,66	3,847	0,00018	0,66	8,7654	0,000286	0,66	13,635
opgehangen	cm ² /m ²	0,046	0,19	0,19	4,706E-06	0,66	0,224	1,9E-05	0,66	0,9252	1,94E-05	0,66	0,9252
schoorsteen	cm ² /stuk	21	29	36	0,0021483	0,66	102,26	0,00297	0,66	141,22	0,003683	0,66	175,31
plafonddeurboring													
ventilator	cm ² /stuk	1,6	20	21	0,0001637	0,66	7,7914	0,00205	0,66	97,393	0,002148	0,66	102,26
ingebouwde spot	cm ² /stuk	1,5	10	21	0,0001535	0,66	7,3045	0,00102	0,66	48,697	0,002148	0,66	102,26
opgebouwd licht	cm ² /stuk		0,82					8,4E-05	0,66	3,9931			
kruipruimte	cm ² /m ²	8	10	17	0,0008184	0,66	38,957	0,00102	0,66	48,697	0,001739	0,66	82,784
deurkader													
algemeen	cm ² /stuk	2,4	12	25	0,0002455	0,66	11,687	0,00123	0,66	58,436	0,002558	0,66	121,74
baksteen-niet gepleisterd	cm ² /m ²	1,7	5	5	0,0001739	0,66	8,2784	0,00051	0,66	24,348	0,000512	0,66	24,348
baksteen-gepleisterd	cm ² /m ²	0,3	1	1	3,069E-05	0,66	1,4609	0,0001	0,66	4,8697	0,000102	0,66	4,8697
hout-niet gepleisterd	cm ² /m ²	0,6	1,7	1,7	6,138E-05	0,66	2,9218	0,00017	0,66	8,2784	0,000174	0,66	8,2784
hout-gepleisterd	cm ² /m ²	0,1	0,3	0,3	1,023E-05	0,66	0,487	3,1E-05	0,66	1,4609	3,07E-05	0,66	1,4609
deuren													
dubbel, zonder tochtlat	cm ² /m ²	7	11	22	0,0007161	0,66	34,088	0,00113	0,66	53,566	0,002251	0,66	107,13
dubbel, met tochtlat	cm ² /m ²	3	8	23	0,0003069	0,66	14,609	0,00082	0,66	38,957	0,002353	0,66	112
passagierlift	cm ² /stuk	0,14	0,26	0,35	1,432E-05	0,66	0,6818	2,7E-05	0,66	1,2661	3,58E-05	0,66	1,7044
algemeen, gemiddeld	cm ² /lm	0,23	0,31	0,45	2,353E-05	0,66	1,12	3,2E-05	0,66	1,5096	4,6E-05	0,66	2,1913
brievenbus	cm ² /lm		4					0,00041	0,66	19,479			
schuifdeur glas patio	cm ² /stuk	3	22	60	0,0003069	0,66	14,609	0,00225	0,66	107,13	0,006138	0,66	292,18
schuifdeur glas patio	cm ² /m ²	0,6	5,5	15	6,138E-05	0,66	2,9218	0,00056	0,66	26,783	0,001535	0,66	73,045
met/zonder storm	cm ² /stuk	3	6	6,2	0,0003069	0,66	14,609	0,00061	0,66	29,218	0,000634	0,66	30,192
enkel, zonder tochtlat	cm ² /stuk	12	21	53	0,0012276	0,66	58,436	0,00215	0,66	102,26	0,005422	0,66	258,09
enkel, met tochtlat	cm ² /stuk	4	12	27	0,0004092	0,66	19,479	0,00123	0,66	58,436	0,002762	0,66	131,48
electrisch punt													
zonder sluiting	cm ² /stuk	0,5	2,5	6,2	5,115E-05	0,66	2,4348	0,00026	0,66	12,174	0,000634	0,66	30,192
met sluiting	cm ² /stuk	0,08	0,15	3,5	8,184E-06	0,66	0,3896	1,5E-05	0,66	0,7304	0,000358	0,66	17,044

Tabel 27. “lekkage componenten ASHRAE deel 1”

COMPONENT	EENHEID	MIN.	GEM.	MAX.	MIN.			GEM.			MAX.		
	L	L	L	L	C	n	V	C	n	V	C	n	V
					m³/s.Pa ⁿ	-	m³/h/m²	m³/s.Pa ⁿ	-	m³/h/m²	m³/s.Pa ⁿ	-	m³/h/m²
vloer boven kruipruimte algemeen	cm²/m²	0,4	2,2	4,9	4,1E-05	0,66	1,9479	0,00023	0,66	10,713	0,0005	0,66	23,861
met leidingen in ruimte	cm²/m²		2,25					0,00023	0,66	10,957			
zonder leidingen in ruimte	cm²/m²		1,98					0,0002	0,66	9,6419			
open haard													
met klep gesloten	cm²/m²	10	43	92	0,00102	0,66	48,697	0,0044	0,66	209,4	0,00941	0,66	448,01
met klep open	cm²/m²	145	350	380	0,01483	0,66	706,1	0,03581	0,66	1704,4	0,03887	0,66	1850,5
met glazen deuren	cm²/m²	4	40	40	0,00041	0,66	19,479	0,00409	0,66	194,79	0,00409	0,66	194,79
gasboiler	cm²/stuk	25	20	25	0,00256	0,66	121,74	0,00205	0,66	97,393	0,00256	0,66	121,74
voegen													
muur-plafond	cm²/lm	0,16	1,5	2,5	1,6E-05	0,66	0,7791	0,00015	0,66	7,3045	0,00026	0,66	12,174
vloer-muur/ ongeplamuurd	cm²/lm	0,38	4	5,6	3,9E-05	0,66	1,8505	0,00041	0,66	19,479	0,00057	0,66	27,27
vloer-muur/ geplamuurd	cm²/lm	0,075	0,8	1,2	7,7E-06	0,66	0,3652	8,2E-05	0,66	3,8957	0,00012	0,66	5,8436
perforaties door leidingen													
niet geplamuurd	cm²/stuk	2	6	24	0,0002	0,66	9,7393	0,00061	0,66	29,218	0,00246	0,66	116,87
geplamuurd	cm²/stuk	1	2	2	0,0001	0,66	4,8697	0,0002	0,66	9,7393	0,0002	0,66	9,7393
Roosters													
badkamer - rooster toe	cm²/stuk	2,5	10	20	0,00026	0,66	12,174	0,00102	0,66	48,697	0,00205	0,66	97,393
badkamer - rooster open	cm²/stuk	6,1	20	22	0,00062	0,66	29,705	0,00205	0,66	97,393	0,00225	0,66	107,13
droogkast met rooster	cm²/stuk	2,9	3	7	0,0003	0,66	14,122	0,00031	0,66	14,609	0,00072	0,66	34,088
droogkast zonder rooster	cm²/stuk	12	15	34	0,00123	0,66	58,436	0,00153	0,66	73,045	0,00348	0,66	165,57
keuken - rooster open	cm²/stuk	14	40	72	0,00143	0,66	68,175	0,00409	0,66	194,79	0,00737	0,66	350,62
keuken - rooster toe	cm²/stuk	1	5	7	0,0001	0,66	4,8697	0,00051	0,66	24,348	0,00072	0,66	34,088
buitenmuren													
gegoten beton	cm²/m²	0,049	0,5	1,8	5E-06	0,66	0,2386	5,1E-05	0,66	2,4348	0,00018	0,66	8,7654
bakstenen spouwmuur	cm²/m²	0,05	0,68	2,3	5,1E-06	0,66	0,2435	7E-05	0,66	3,3114	0,00024	0,66	11,2
prefab beton	cm²/m²	0,28	1,2	1,65	2,9E-05	0,66	1,3635	0,00012	0,66	5,8436	0,00017	0,66	8,0349
licht beton bloot	cm²/m²	1,3	3,5	4	0,00013	0,66	6,3306	0,00036	0,66	17,044	0,00041	0,66	19,479
licht beton met verf/stuc	cm²/m²	0,52	1,1	1,1	5,3E-05	0,66	2,5322	0,00011	0,66	5,3566	0,00011	0,66	5,3566
zwaar beton bloot	cm²/m²		0,25					2,6E-05	0,66	1,2174			
continu luchtscherm	cm²/m²	0,055	0,15	0,21	5,6E-06	0,66	0,2678	1,5E-05	0,66	0,7304	2,1E-05	0,66	1,0226

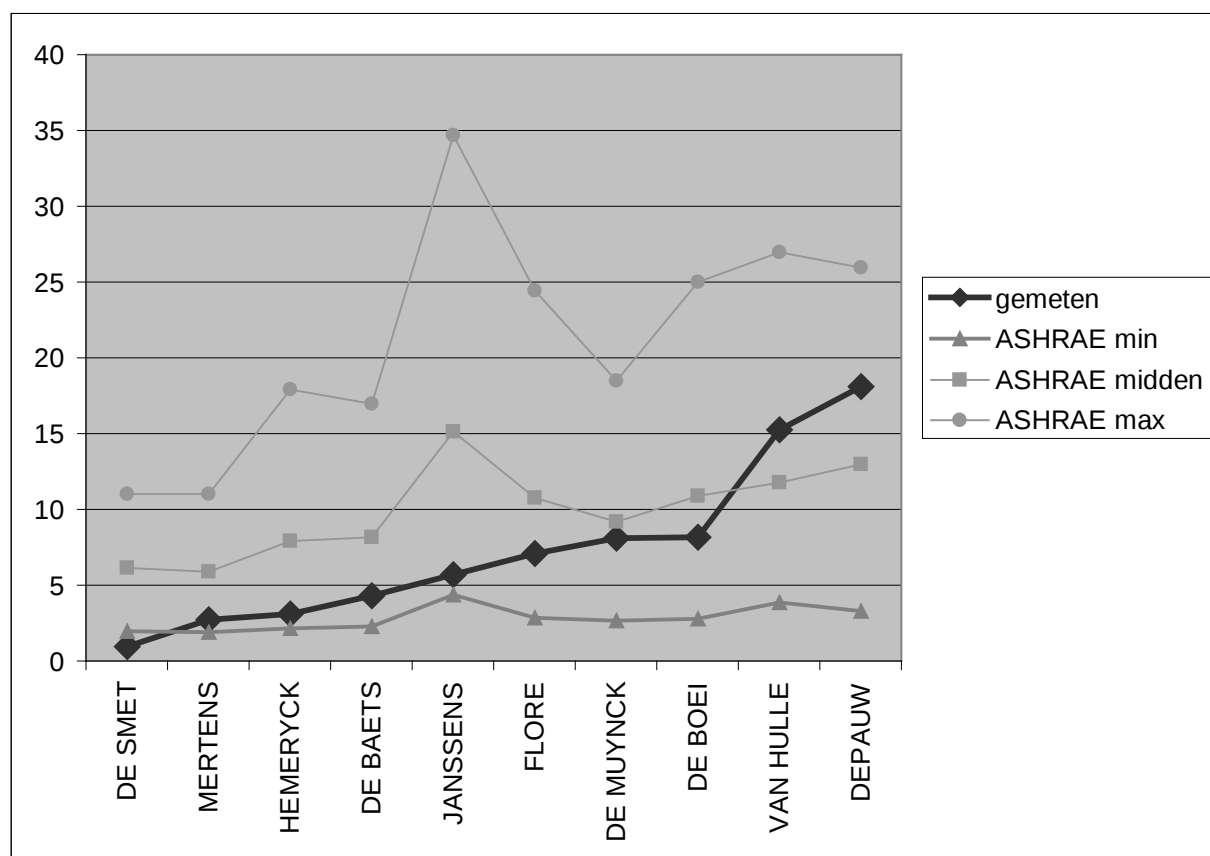
Tabel 28. "lekkage componenten ASHRAE deel 2"

COMPONENT	EENHEID	MIN.	GEM.	MAX.	MIN.			GEM.			MAX.		
	L	L	L	L	C	n	V	C	n	V	C	n	V
					m³/s.Pa ⁿ	-	m³/h/m²	m³/s.Pa ⁿ	-	m³/h/m²	m³/s.Pa ⁿ	-	m³/h/m²
aansluiting raam/muur													
baksteen, nt geplamuurd	cm²/m²	5,7	6,5	10,3	0,00058	0,66	27,757	0,00066	0,66	31,653	0,00105	0,66	50,157
baksteen, geplamuurd	cm²/m²	1,1	1,3	2,1	0,00011	0,66	5,3566	0,00013	0,66	6,3306	0,00021	0,66	10,226
hout, nt geplamuurd	cm²/m²	1,5	1,7	2,7	0,00015	0,66	7,3045	0,00017	0,66	8,2784	0,00028	0,66	13,148
hout, geplamuurd	cm²/m²	0,3	0,3	0,5	3,1E-05	0,66	1,4609	3,1E-05	0,66	1,4609	5,1E-05	0,66	2,4348
ramen													
dubbel schuifraam zonder tochtlat	cm²/lm	0,019	1,1	3,4	1,9E-06	0,66	0,0925	0,00011	0,66	5,3566	0,00035	0,66	16,557
" in hout, met tochtlat	cm²/lm	0,15	0,55	1,72	1,5E-05	0,66	0,7304	5,6E-05	0,66	2,6783	0,00018	0,66	8,3758
" in aluminium, met tochtlat	cm²/lm	0,58	0,72	0,8	5,9E-05	0,66	2,8244	7,4E-05	0,66	3,5062	8,2E-05	0,66	3,8957
enkel schuifraam met tochtlat	cm²/lm	0,2	0,67	2,06	2E-05	0,66	0,9739	6,9E-05	0,66	3,2627	0,00021	0,66	10,031
" in hout, met tochtlat	cm²/lm	0,27	0,8	2,06	2,8E-05	0,66	1,3148	8,2E-05	0,66	3,8957	0,00021	0,66	10,031
" in aluminium, met tochtlat	cm²/lm	0,27	0,44	0,99	2,8E-05	0,66	1,3148	4,5E-05	0,66	2,1426	0,0001	0,66	4,821
dubbel raam, zonder tochtlat	cm²/lm	0,86	2,5	6,1	8,8E-05	0,66	4,1879	0,00026	0,66	12,174	0,00062	0,66	29,705
bij storm	cm²/lm	0,48	0,97	1,7	4,9E-05	0,66	2,3374	9,9E-05	0,66	4,7236	0,00017	0,66	8,2784
dubbel raam, met tochtlat	cm²/lm	0,2	0,65	1,9	2E-05	0,66	0,9739	6,6E-05	0,66	3,1653	0,00019	0,66	9,2523
bij storm	cm²/lm	0,44	0,79	1	4,5E-05	0,66	2,1426	8,1E-05	0,66	3,847	0,0001	0,66	4,8697
enkel raam, met tochtlat	cm²/lm	0,62	0,87	1,24	6,3E-05	0,66	3,0192	8,9E-05	0,66	4,2366	0,00013	0,66	6,0384

Tabel 29. "lekkage componenten ASHRAE deel 3"

3.4.2) ASHRAE minimum

Met uitzondering van één woning vormt deze methode een ondergrens voor de metingen. De gemiddelde afwijking is 58%, en de maximale afwijking is 100%. De schattingen zijn gebaseerd op metingen, maar hier heeft men telkens gebruik gemaakt van de laagste waarde die men gevonden heeft. We verwachten dus dat ASHRAE minimum een ondergrens is voor alle metingen.



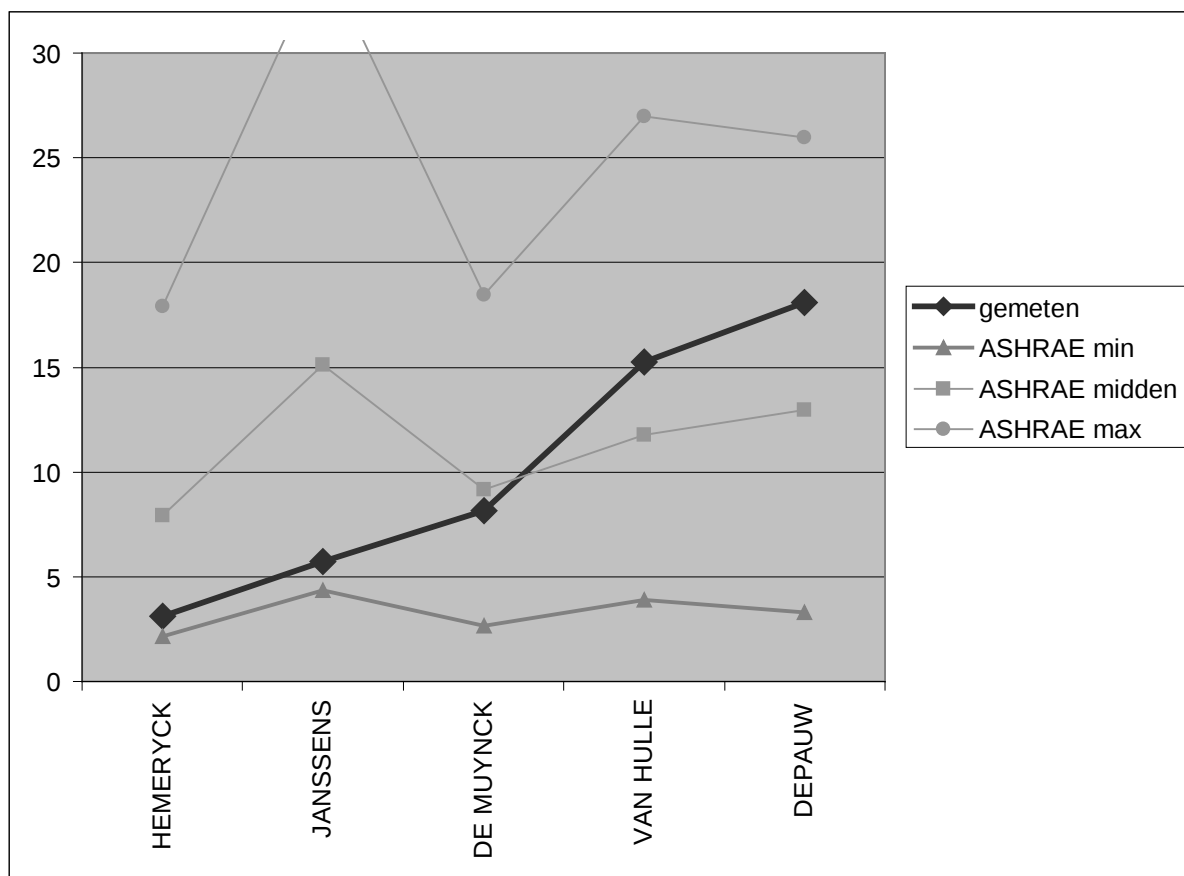
Figuur 19. “schattingsmethodes ASHRAE minimum”

3.4.2.1 Open bebouwing

De gemiddelde afwijking bij open bebouwing is 56%.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	ASHRAE MIN	% AFW
HEMERYCK	3,1	2,16	-30
JANSSENS	5,71	4,35	-24
DE MUYNCK	8,13	2,68	-67
VAN HULLE	15,23	3,88	-75
DEPAUW	18,10	3,29	-82

Tabel 30. “schattingsmethodes ASHRAE minimum – open bebouwing”



Figuur 20. “schattingsmethodes ASHRAE minimum – open bebouwing”

3.4.2.2 Houtskeletbouw

Deze methode is niet geschikt voor houtskeletbouw

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	ASHRAE MIN	% AFW
DE SMET	0,97	1,94	100
MERTENS	2,7	1,92	-29

Tabel 31. “schattingsmethodes ASHRAE minimum - houtskeletbouw”

3.4.2.3 Appartementen

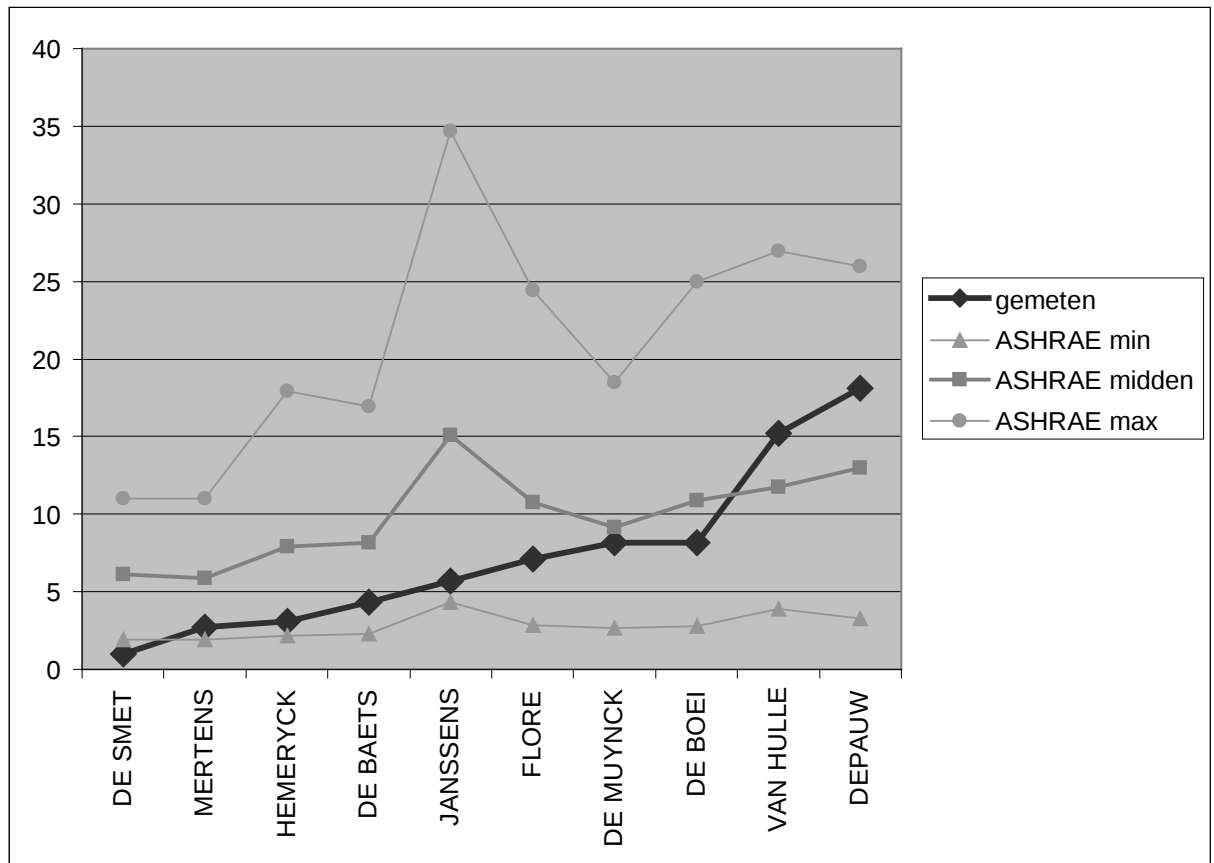
De luchtdichtheid van appartementen wordt door deze methode te laag ingeschat.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	ASHRAE MIN	% AFW
FLORE	7,10	2,84	-60
DE BOEI	8,15	2,77	-66

Tabel 32. “schattingsmethodes ASHRAE minimum - appartementen”

3.4.3) ASHRAE middel

Deze methode is voor 8 van de 10 woningen een bovengrens. De stijgende trend is duidelijk te herkennen. De gemiddelde afwijking is 121%, dit is vooral te wijten aan de te hoge schattingen bij woningen met een goede luchtdichtheid. Bij verschillende woningen is de afwijking echter meer dan 100% zodat deze schattingsmethode niet geschikt is.



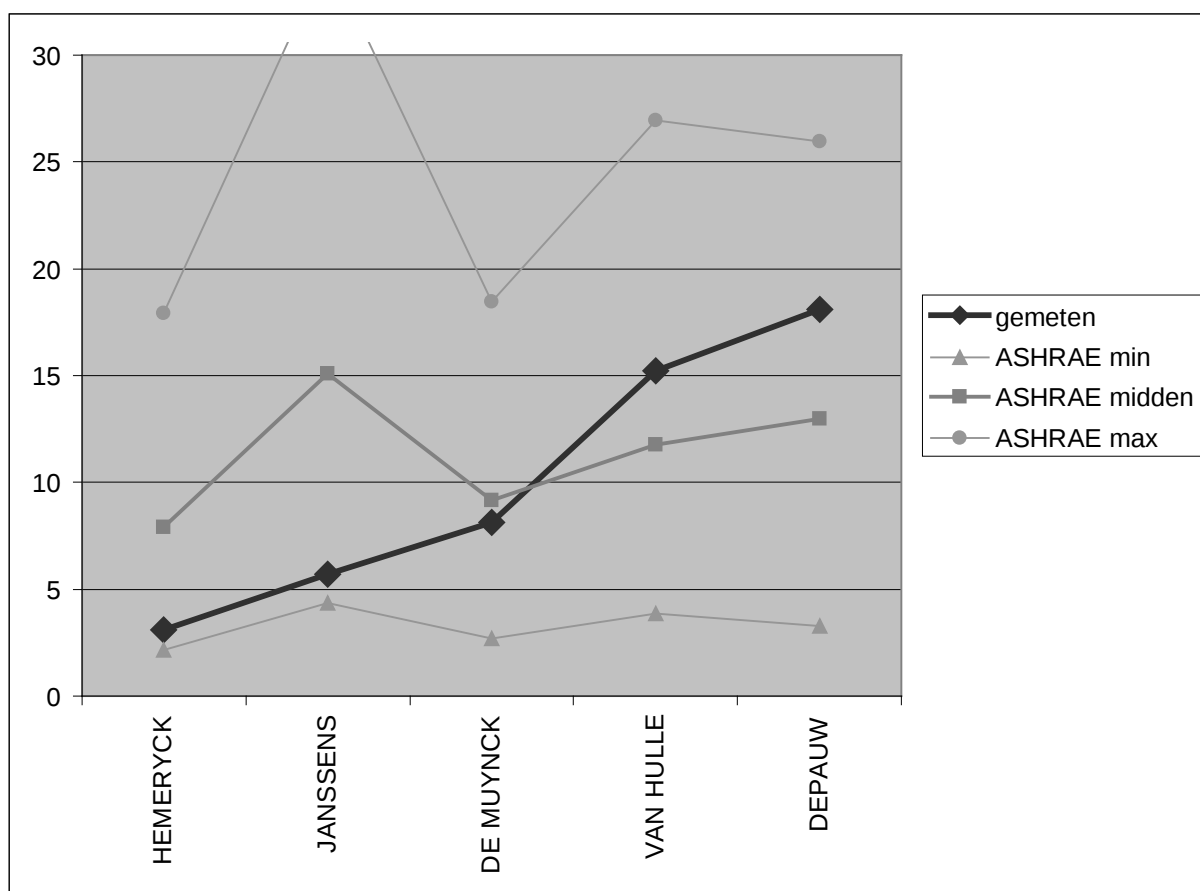
Figuur 21. “schattingsmethodes ASHRAE middel”

3.4.3.1 Open bebouwing

De schattingen zijn vooral onjuist bij de meer luchtdichte woningen. Voor de andere zijn de schattingen nog acceptabel.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	ASHRAE MIDDEN	% AFW
HEMERYCK	3,1	7,90	155
JANSSENS	5,71	15,10	164
DE MUYNCK	8,13	9,17	13
VAN HULLE	15,23	11,77	-23
DEPAUW	18,10	12,97	-28

Tabel 33. “schattingsmethodes ASHRAE middel – open bebouwing”



Figuur 22. “schattingmethoden ASHRAE middel – open bebouwing”

3.4.3.2 Houtskeletbouw

De bekomen waarden zijn duidelijk niet in verhouding met de werkelijke lekkagedebieten.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	ASHRAE MIDDEN	% AFW
DE SMET	0,97	6,12	531
MERTENS	2,7	5,87	118

Tabel 34. “schattingmethoden ASHRAE middel - houtskeletbouw”

3.4.3.3 Appartementen

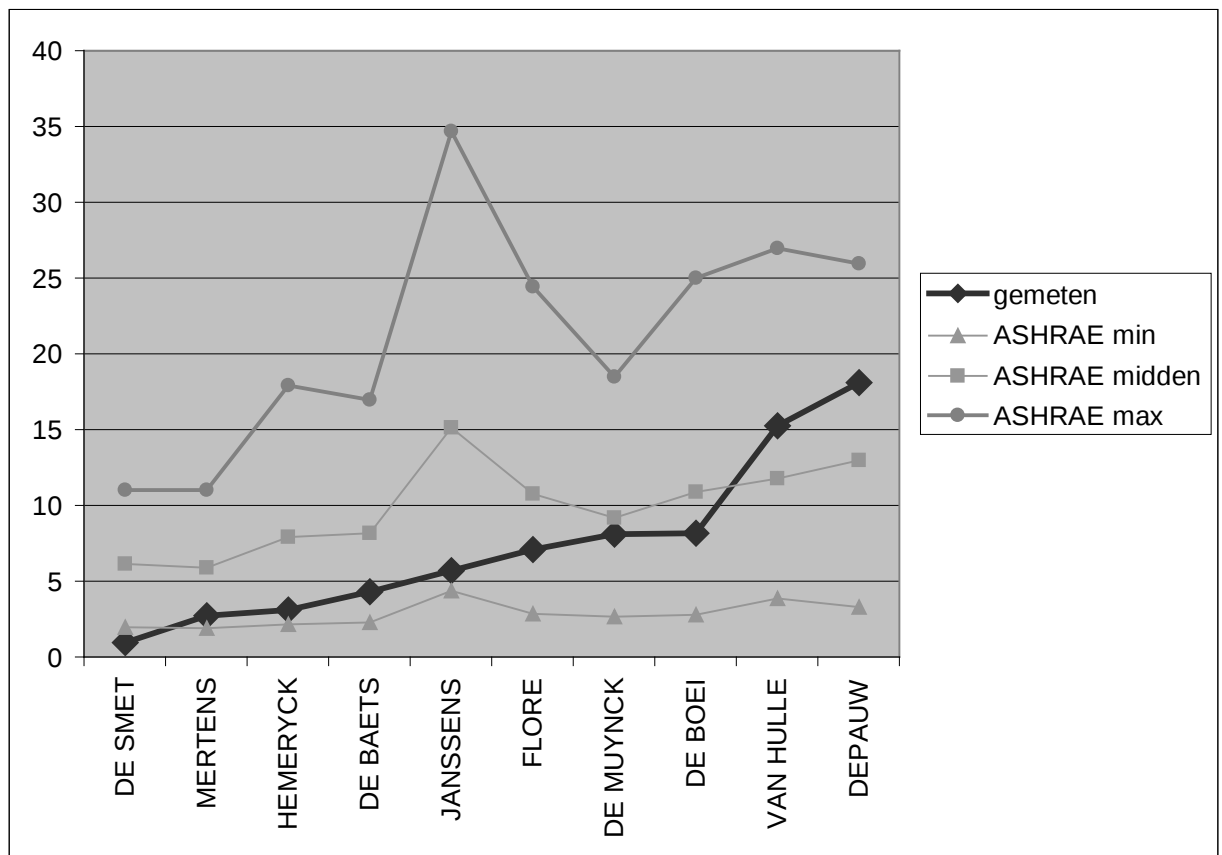
De gemiddelde afwijking is 42%: van alle schattingen op basis van lekkage van gebouwonderdelen is dit de meest correcte. Vreemd genoeg liggen de schattingen van de twee ruwe bepalingsmethodes dichter bij de werkelijkheid.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	ASHRAE MIDDEN	% AFW
FLORE	7,10	10,74	51
DE BOEI	8,15	10,88	33

Tabel 35. “schattingmethoden ASHRAE middel – appartementen”

3.4.4) ASHRAE maximum

Deze schattingsmethode is de enige die voor alle metingen een bovengrens is. Een gemiddelde afwijking van 332% zorgt er evenwel voor dat deze bovengrens praktisch van weinig betekenis is. Als je maar een schatting kunt maken bvb $1 < n_{50} < 30$, dan kun je evengoed geen schatting maken natuurlijk.



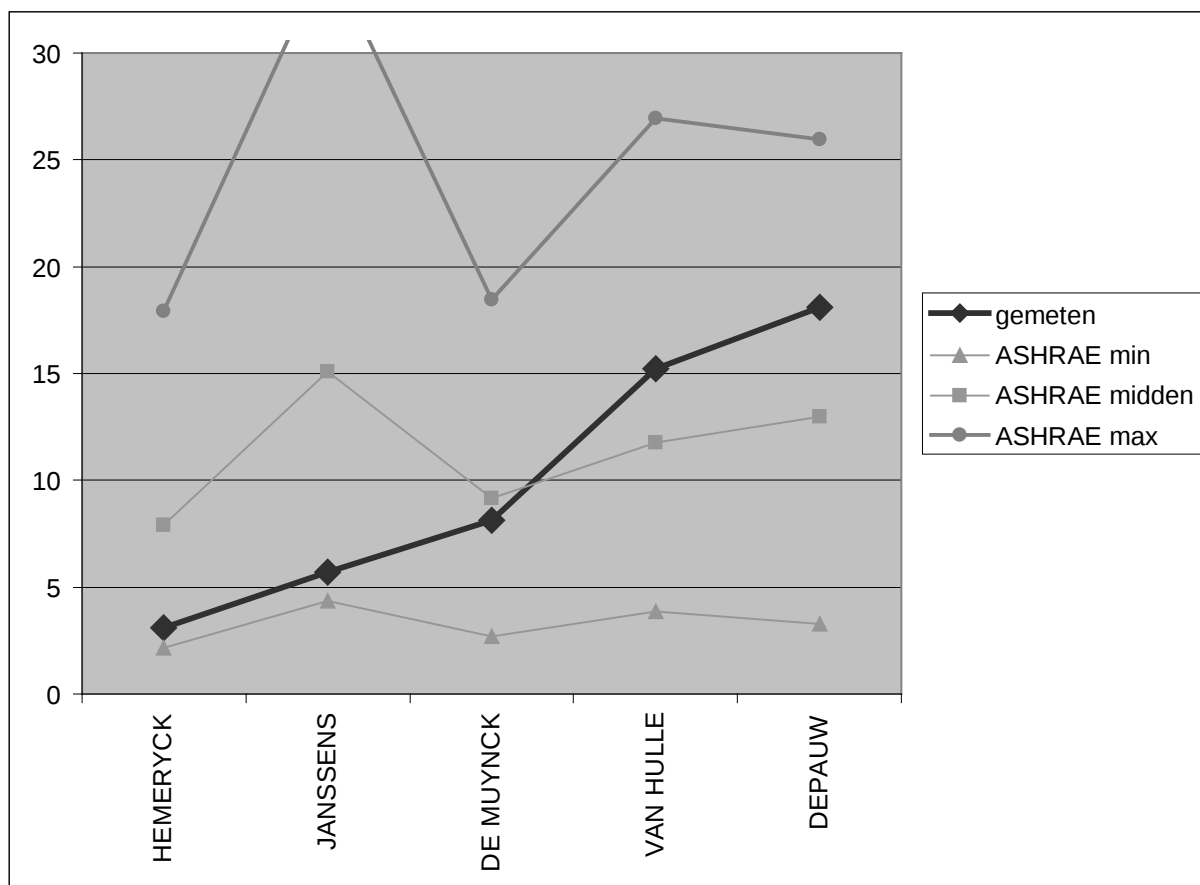
Figuur 23. “schattingsmethodes ASHRAE maximum”

3.4.4.1 Open bebouwing

Zoals te verwachten kunnen we hier dezelfde conclusies trekken: de schatting is een bovengrens die we praktisch niet kunnen gebruiken.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	ASHRAE MAX	% AFW
HEMERYCK	3,1	17,90	477
JANSSENS	5,71	34,67	507
DE MUYNCK	8,13	18,46	127
VAN HULLE	15,23	26,97	77
DEPAUW	18,10	25,97	43

Tabel 36. “schattingsmethodes ASHRAE maximum – open bebouwing”



Figuur 24. “schattingsmethodes ASHRAE maximum – open bebouwing”

3.4.4.2 Houtskeletbouw

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	ASHRAE MAX	% AFW
DE SMET	0,97	10,99	1033
MERTENS	2,7	11,02	308

Tabel 37. “schattingsmethodes ASHRAE maximum - houtskeletbouw”

3.4.4.3 Appartementen

<i>appartementen</i>	GEMETEN	ASHRAE MAX	% AFW
FLORE	7,10	24,43	244
DE BOEI	8,15	24,98	207

Tabel 38. “schattingsmethodes ASHRAE maximum - appartementen”

3.4.5) Besluit

De schattingsmethode van ASHRAE laat net zoals bij die van het AIVC toe om de kwaliteit van uitvoering in rekening te brengen bij de schatting. Die kwaliteit is in veel gevallen moeilijk in te schatten. Zowel in planningsfase, afgewerkte toestand of latere bepaling is het moeilijk de verschillende onderdelen en aansluitingen te categoriseren. Bovendien zijn er enkel een minimale, gemiddelde en maximale waarde gegeven. De methode van het AIVC waarbij men met fractielen werkt lijkt ons inziens een betere methode, hetgeen ook gestaafd wordt door de schattingen.

Als we enkel rekenen met alle lage waarden, alle middel waarden en alle hoge waarden kunnen we volgende conclusies trekken met betrekking tot de methode van ASHRAE:

ASHRAE minimum is voor 9 van de 10 woningen een ondergrens, met een gemiddelde afwijking van 58%, wat nog praktisch hanteerbaar is.

ASHRAE middel is voor 8 van de 10 woningen een bovengrens, en de gemiddelde afwijking is veel te groot. Enkel voor zeer luchtopen woningen komt de schatting in de buurt van de werkelijkheid.

ASHRAE middel is van alle schattingen op basis van gebouwcomponenten de beste voor appartementen, met een afwijking van 42%.

ASHRAE maximum is voor alle woningen een bovengrens, maar de gemiddelde afwijking is 332%, zodat deze geen praktische betekenis heeft.

3.5) Schattingsmethode SENVIVV^{[20] [21]}

3.5.1) Principe

Tijdens een inspectieronde worden de verschillende lekken geregistreerd en opgemeten. Aan ieder lek wordt een lekdebiet bij 50 Pa (q_{50} -waarde) toegekend. Daarbij wordt gebruik gemaakt van een lijst die voor de meest voorkomende lekken een Q_{50} -waarde opgeeft. De volgende typelekken worden onderscheiden:

1. wanden, vloeren en plafonds
2. verbindingen tussen wand en vloer/plafond
3. voegen in schrijnwerk
4. verbindingen tussen schrijnwerk en wanden
5. openingen en andere lekken

Aan de hand van een lijst die lekdebieten geeft voor oppervlaktes, lineaire voegen en puntopeningen wordt het gezamenlijke lekdebiet bepaald. De Q_{50} -waarden in de lijst zijn gemiddelden voor gemeten waarden waarop een grote spreiding geldt. De visuele schatting zou dus zowel kunnen leiden tot een overschatting als tot een onderschatting van het reële lekdebiet. Aangezien echter bij de meeste visuele schattingen een deel van de lekken niet omvat wordt, kan men verwachten dat de schatting meestal een ondergrens zal zijn voor de reële Q_{50} -waarde.

3.5.1.1 Wanden, vloeren en plafonds

Waardes per vierkante meter

Beschrijving	Q_{50} (m³/h)
Bepoisterd metselwerk	1
Onbepoisterd metselwerk uit baksteen	3
Onbepoisterd metselwerk uit betonblokken	10
Gipskartonplaat (verbinding bepoeisterd)	1
Gipskartonplaat (verbinding niet bepoeisterd)	10
Bepoisterd plafond	1
Plafond uit planchetten (aaneengesloten) met damp scherm	1
Plafond uit planchetten (aaneengesloten) zonder damp scherm	5
Plafond uit planchetten (niet aaneengesloten) met damp scherm gekleefd	1
Plafond uit planchetten (niet aaneengesloten) met damp scherm geniet	10
Betonnen vloer/plafond	0
Zwevende houten vloer	10

Tabel 39. “lekkage componenten SENVIVV - wanden”

3.5.1.2 Verbinding tussen muur/wand en vloer/plafond

Ongeacht het soort vloer (of plafond) en het soort wand wordt steeds gerekend met 1m³/h per lopende meter voeg.

3.5.1.3 Vensters en deuren

Waardes per lopende meter omtrek der bewegende delen

Beschrijving	Q₅₀ (m³/h)
Vensters voorzien van een tochtstrip, draaiend en schuivend	5
Vensters zonder tochtstrip, draaiend	20
Vensters zonder tochtstrip, schuivend	10
Deuren voorzien van een tochtstrip	10
Deuren zonder tochtstrip	40
Binnendeuren zonder tochtstrip (vb naar garage, kelder, zolder)	40

Tabel 40. “lekkage componenten SENVIVV - schrijnwerk”

3.5.1.4 Verbinding tussen vensters/deuren en wand

Zonder onderscheid wordt steeds 1m³/h per lopende meter verbinding genomen.

3.5.1.5 Doorboringen “luchtdicht” scherm (bepleistering, dampscherm)

Waarde per doorboring

Beschrijving	Q₅₀ (m³/h)
Inbouwspots in plafond	25
Stopcontacten	1
Doorboring schouw of ventilatiekanaal (doorheen dampscherm dak)	20

Tabel 41. “lekkage componenten SENVIVV - doorboringen”

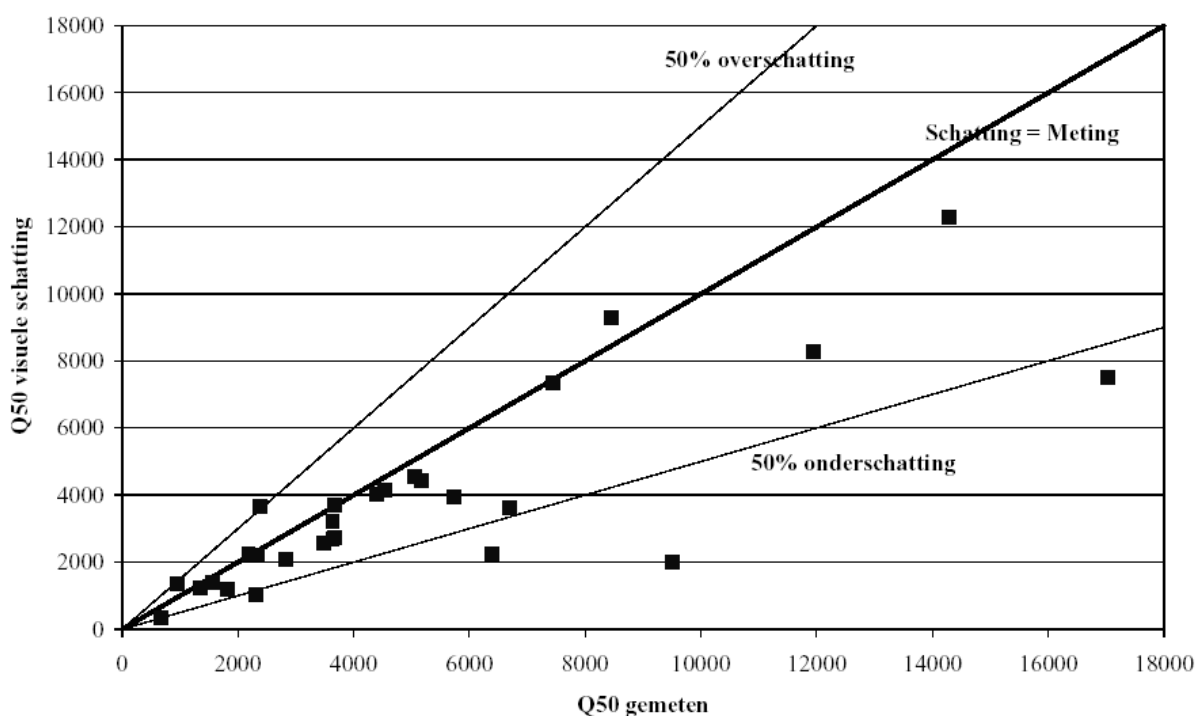
3.5.1.6 Andere

Waarde per object

Beschrijving	Q ₅₀ (m ³ /h)
Open haard met afsluitklep	20
Open haard zonder afsluitklep	500-1000
Dampkap voorzien van afsluitklep	10
Dampkap voorzien van overdrukrooster	20
Dampkap zonder afsluiting	300-600
Rooster afsluitbaar of ventilatiekanaal voorzien van afsluitklep	10
Brievenbus met afsluitklep	20
Brievenbus zonder afsluitklep, in kastje	50
Brievenbus zonder afsluitklep	200
Rolluikkast op muur (niet geïsoleerd)	1

Tabel 42. “lekkage componenten SENVIVV - andere”

3.5.2) Resultaten SENVIVV-studie



Figuur 25. “relatie tussen de visuele schatting van de luchtdichtheid en de gemeten waarde zoals vermeld in de SENVIVV-studie” [20]

Na toetsing van het model in de SENVIVV-studie blijkt:

“De visueel bepaalde Q_{50} -waarde is inderdaad zelden een overschatting van de “reële” waarde (slechts 3x op 50 tests), meestal is er sprake van een onderschatting. De visuele schatting is dus bruikbaar als een ondergrens voor het lekdebiet.”

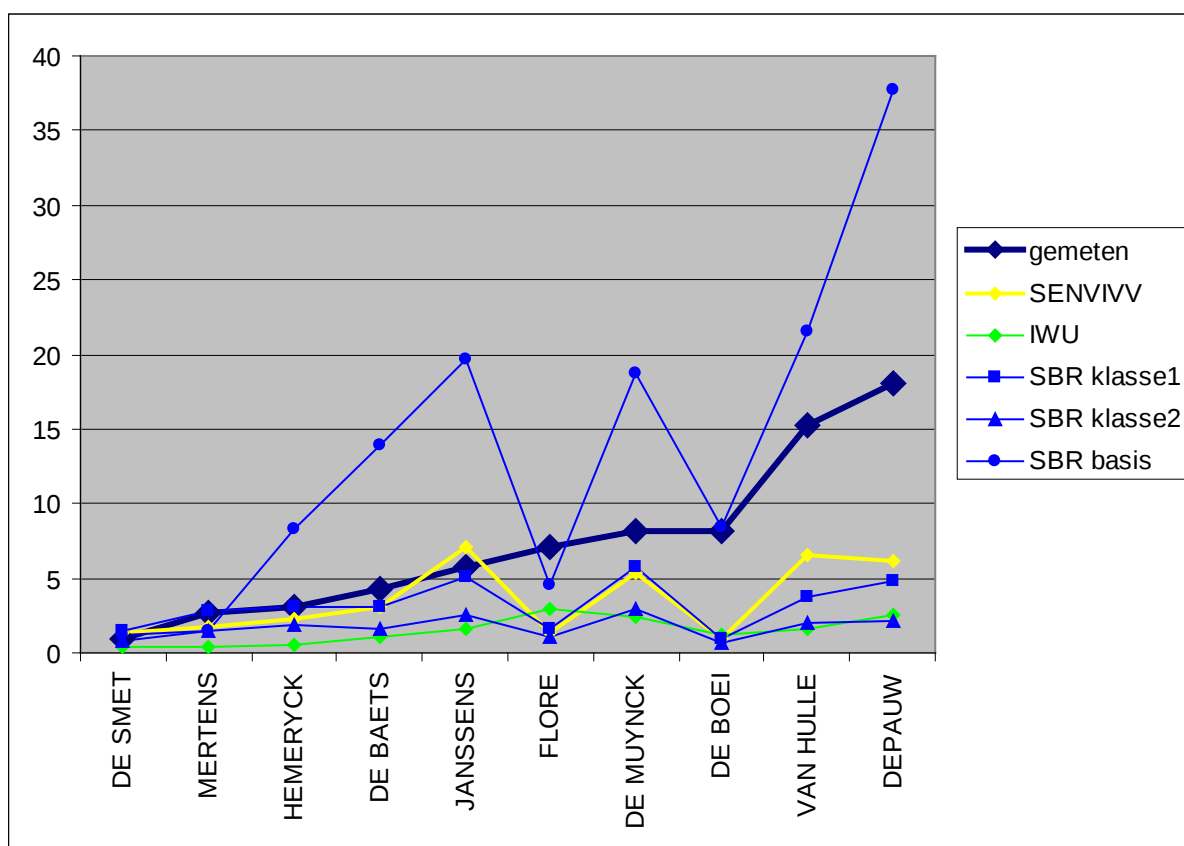
“Men kan zien dat in slechts 1 geval de overschatting meer bedraagt dan 50%.”

“In 3 gevallen bedraagt het visueel bepaalde lekdebiet minder dan de helft van de ‘reële’ waarde.”

Omdat deze methode opgesteld is op basis van metingen in Vlaanderen verwachten we dat de resultaten het dichtst zullen aanleunen bij de werkelijkheid. Een schattingsmethode moet vooral weten wat de specifieke parameters zijn die bepalend blijken voor de luchtdichtheid, en aangezien de methode is gemodelleerd op Vlaamse woningen, is de kans groot dat de juiste parameters het juiste gewicht krijgen. We gaan hier verder op in bij de lekverdeling.

3.5.3) Schattingen

De schattingen op basis van de SENVIVV-gegevens zijn voor 8 van de 10 woningen een ondergrens. De gemiddelde afwijking is 48%, wat op zich niet slecht is, maar een aantal andere methodes doen beter. Bovendien vallen 4 van de 10 woningen buiten de gestelde grens van 50% uit de SENVIVV-studie. Ook de maximale afwijking is groter dan bij de andere methodes die gemiddeld beter doen. Bij deze methode is er geen mogelijkheid een onderscheid te maken naar kwaliteit van aansluitingen. Een goede afwerking zal in deze methode dus niet tot uiting komen.



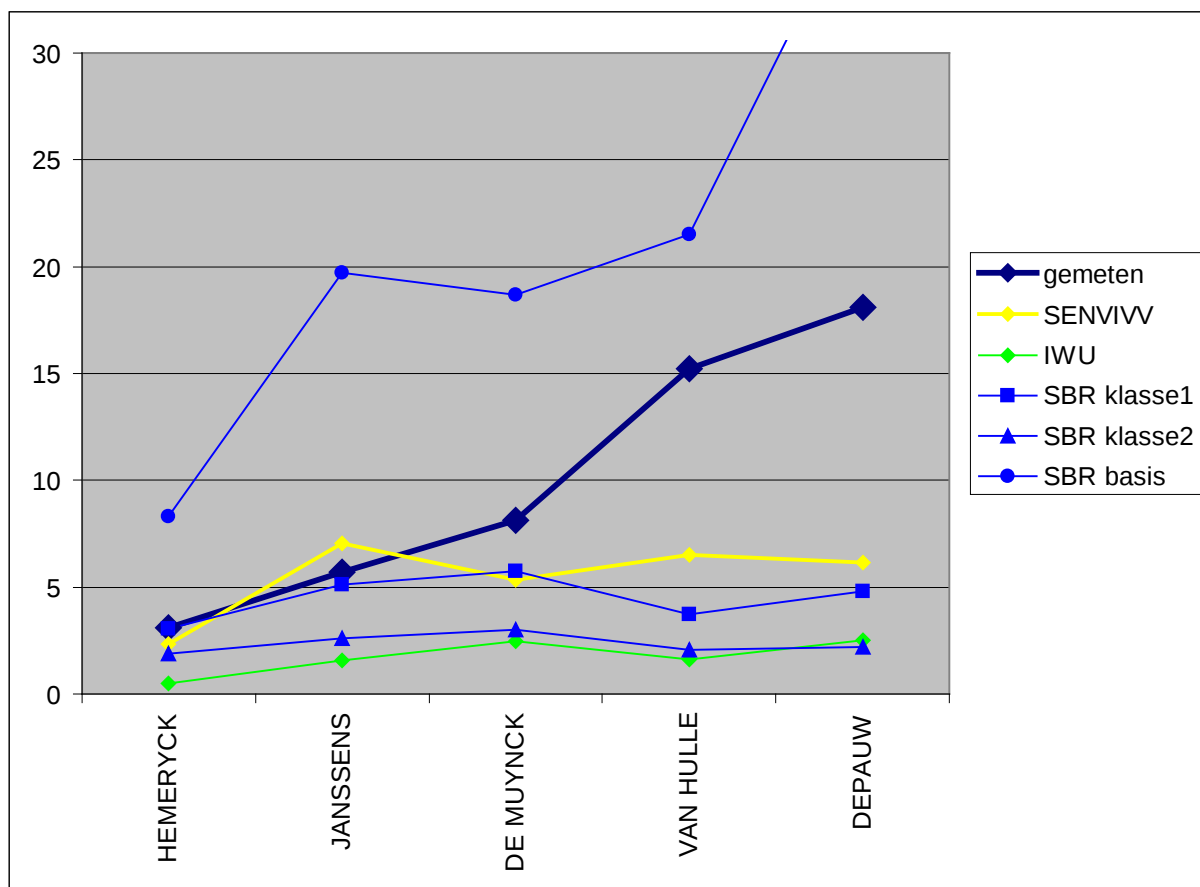
Figuur 26. “schattingsmethodes SENVIVV”

3.5.3.1 Open bebouwing

De gemiddelde afwijking bij open bebouwing is 42%. Deze methode is dus vrij goed voor woningen met een luchtdichtheid kleiner dan 10, maar voor andere wordt de afwijking al snel te groot.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	SENVIVV	% AFW
HEMERYCK	3,1	2,34	-25
JANSSENS	5,71	7,07	24
DE MUYNCK	8,13	5,33	-34
VAN HULLE	15,23	6,53	-57
DEPAUW	18,10	6,15	-66

Tabel 43. “schattingsmethodes SENVIVV – open bebouwing”



Figuur 27. “schattingsmethodes SENVIVV – open bebouwing”

3.5.3.1 Houtskeletbouw

De schatting van de luchtdichtheid bij houtskeletbouw is vrij goed, met een afwijking van 37%, dit is ongeveer gelijk aan die van AIVC midden.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	SENVIVV	% AFW
DE SMET	0,97	1,33	37
MERTENS	2,7	1,69	-37

Tabel 44. “schattingsmethodes SENVIVV – houtskeletbouw”

3.5.3.1 Appartementen

De gemiddelde afwijking is te groot om deze methode te gebruiken voor schattingen van appartementen.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	SENVIVV	% AFW
FLORE	7,10	1,38	-81
DE BOEI	8,15	0,96	-88

Tabel 45. “schattingsmethodes SENVIVV – appartementen”

3.5.4) Besluit

De methode van de SENVIVV-studie is niet specifiek meer aangepast aan de Vlaamse constructiemethodes. De schattingen zijn minder nauwkeurig dan die van het AIVC.

3.6) Schattingsmethode Institut Wohnen und Umwelt^[9]

3.6.1) Principe

In “luftdichtigkeit von Gebäuden“ van Institut Wohnen und Umwelt spreekt men niet specifiek van een schattingsmethode om de luchtdichtheid van een woning te bepalen, maar is er wel een lijst opgenomen met materialen en hun luchtdoorlatendheid. Deze lijst is opgesteld op basis van zowel in situ-metingen als labometingen aan de hand van volgende bronnen:

- 1.) Raisch, 1928
- 2.) Raisch en Steger, 1934
- 3.) Kronvall, 1980
- 4.) Knublauch en anderen, 1987
- 5.) Knublauch, 1987 a
- 6.) Knublauch, 1987 b
- 7.) Knublauch, 1988
- 8.) NBI, 1990
- 9.) Hens, 1992
- 10.) Geißler en Hauser, 1994
- 11.) Limb, 1994
- 12.) metingen ingenieursbureau ebök
- 13.) metingen ingenieursbureau IGB+E+U

We zullen deze gegevens niet zozeer gebruiken als een schattingsmethode op zich, maar kijken in hoeverre dit kan dienen als theoretische ondergrens. Bovendien zijn de gegevens nuttig om te vergelijken met de relatieve lekdebieten van wanden bij de lekverdeling. Men houdt dus geen rekening met lekken bij aansluitingen en verbindingen, als ware het een perfecte uitvoering.

3.6.1.1 Regenscherm

Materiaal	Luchtdoorlatendheid [m³/m².h bij 50 Pa]	Opmerkingen	Bron nr.
Cement pleisterwerk	0.001 – 0.002	Enkel materiaal	1
Kalk-cement pleisterwerk	0.002 – 0.05	Enkel materiaal	1, 2
Metalen profielplaat	315	labometingen	9
Natuur- of kunstleien	140 – 800	labometingen	9
Dakpannen	1200 - 1800	labometingen	9

Tabel 46. “lekkage componenten IWU - regenscherm”

3.6.1.2 Afscherming isolatie

Materiaal	Luchtdoorlatendheid [m³/m².h bij 50 Pa]	Opmerkingen	Bron nr.
Bitumineuze dakdekking	0.008 – 0.02	Enkel materiaal	3
Bit. Dakdekking genageld	7.5 - 10	labometingen	6
Onderdakfolie	1	Enkel materiaal	9
Onderdakfolie	75	Labo, overlappend	9
Bit. houtwolcementplaat	1.1 – 2.3	Enkel materiaal	3, 8
Houtwolcementplaat tand&groef	8.3	Labo, met voegen	7
Asbestcementplaat	0.002	Enkel materiaal	3
Onderdak vezelcementplaat	63 - 1500	Correcte plaatsing	9

Tabel 47. “lekkage componenten IWU – afscherming isolatie”

3.6.1.3 Structurele elementen

Materiaal	Luchtdoorlatendheid [m³/m².h bij 50 Pa]	Opmerkingen	Bron nr.
Baksteen	0.001 – 0.05	Enkel materiaal	1, 3
Cellenbeton	0.06 – 0.35	Enkel materiaal	2, 3, 8
Prefabbeton	1.1 - 11	Labo, met voegen	11

Zichtmetselwerk	2.1 - 15	Labo en praktijk	9, 11
Onbepleisterd metselwerk	Zeer ondicht		1
Stijve isolatieplaat	0.0003 – 1.1	Enkel materiaal	3
EPS-plaat	43	Labo, met voegen	4
2 lagen EPS tussen kepers	12	Idem, randen verkleefd	4
Geëxpandeerde kurk	0.7 – 2.5		2
Minerale wol	15 - 120	Met $\rho = 20\text{-}100\text{kg/m}^3$	3
Ingeblazen cellulosevlokken tussen papierschermen	4 – 7.5	Labometingen, geniet en overlappend	5, 7
Kokos- en wolisolatie	950 - 6600	Enkel materiaal	2

Tabel 48. “lekkage componenten IWU – structurele elementen”

3.6.1.4 Afwerking binnenruimte

Materiaal	Luchtdoorlatendheid [m³/m².h bij 50 Pa]	Opmerkingen	Bron nr.
Kalkpleister	0.02 – 0.6	Enkel materiaal	1
Pleister met lijmverf	Ondoorlatend	Enkel materiaal	2
Bepleisterd metselwerk	0.1 – 2.0	Labo en praktijk	11, 12
Gipskartonplaat	0.002 – 0.03	Enkel materiaal	3
Idem, met open voegen	50	labometingen	9
Naaldhout (spar)	0.0001 – 0.04	Enkel materiaal	3
Planchetten met tand en groef	63 - 115	Labo en praktijk	9,10,12
MDF-panelen	8 - 17	labometingen	10
Akoestisch plafond	90 - 190	Labo en praktijk	10, 12

Tabel 49. “lekkage componenten IWU – afwerking binnenruimte”

3.6.1.5 Dampscherm

Materiaal	Luchtdoorlatendheid [m³/m².h bij 50 Pa]	Opmerkingen	Bron nr.
PE-folie 0.1 mm	0.0015	Enkel materiaal	2
PE-folie, aan rand geniet	4	Labo, 5cm tss nietjes	2
Bouwpapier	0.15 – 2.8	Enkel materiaal	2
Bouwpapier, geniet	15 - 25	Labo, met dwarslassen	5, 7
Multiplex	0.004 – 0.02	Enkel materiaal	3
Spaanplaten, MDF	0.05 – 0.22	Enkel materiaal	3, 8
Vezelplaten met voegen	5 - 50	Labo en praktijk	9, 13
Vezelplaten, voegen afgekleefd	Minder dan 1.0	Praktijkmetingen	13

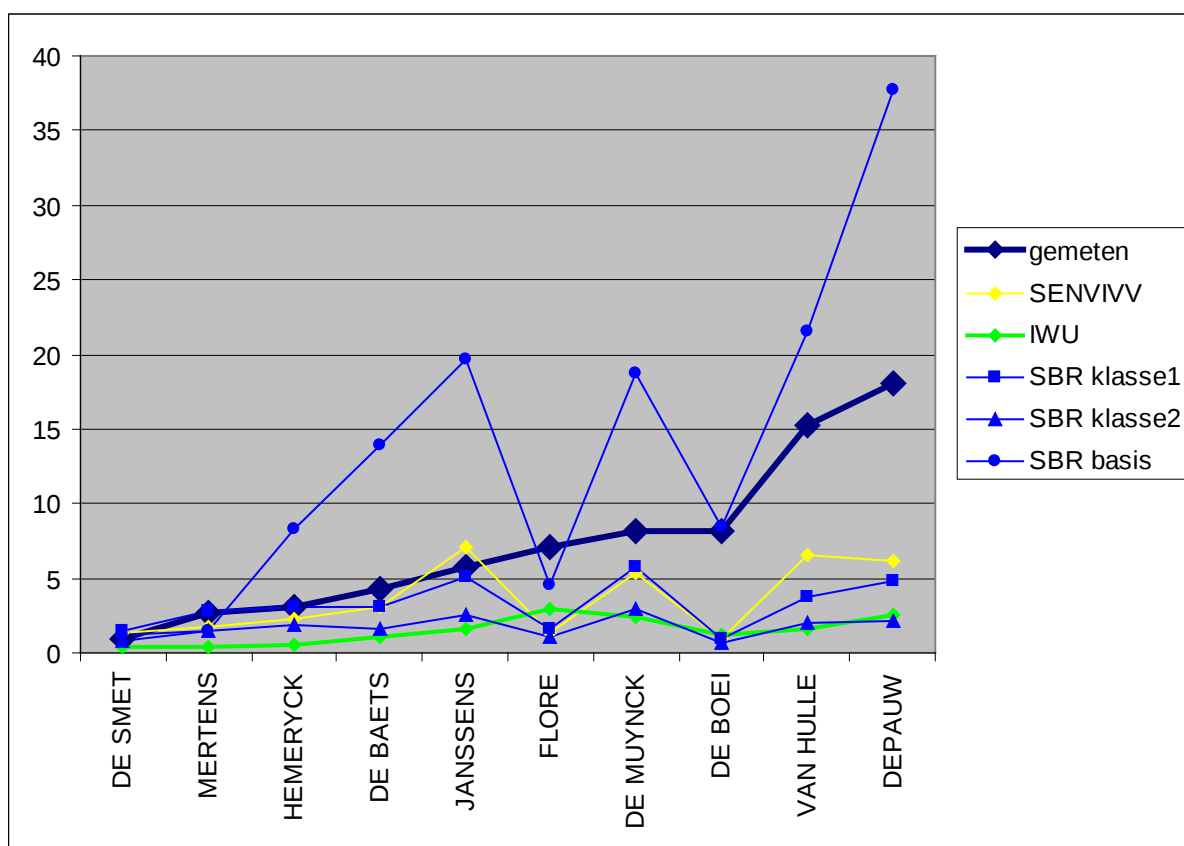
Tabel 50. “lekkage componenten IWU - dampscherm”

3.6.2) Schattingen

De gemiddelde afwijking is 76%, wat eigenlijk nog meevalt voor een methode die geen rekening houdt met aansluitingen van materialen. Ook sluitingen aan deuren en ramen worden niet in rekening gebracht.

	GEMETEN	IWU	% AFW
DE SMET	0,97	0,39	-59
MERTENS	2,7	0,41	-85
HEMERYCK	3,1	0,50	-84
DE BAETS	4,33	1,12	-74
JANSSENS	5,71	1,56	-73
FLORE	7,10	2,90	-59
DE MUYNCK	8,13	2,47	-70
DE BOEI	8,15	1,22	-85
VAN HULLE	15,23	1,63	-89
DEPAUW	18,10	2,50	-86

Tabel 51. “schattingsmethodes IWU”



Figuur 28. “schattingsmethodes IWU”

3.7) SBR schattingsmethode 1^[17]

3.7.1) Principe

In de Nederlandse norm NEN 5128 staan er twee methodes beschreven om de luchtdichtheid van een gebouw te bepalen. Enerzijds een ruwe methode op basis van gebouwtype en bouwkwiteit, anderzijds een uitgewerkte methode op basis van het aantal voegen en kieren. De Nederlandse norm gebruikt de q_{v10} -waarde als algemene grootheid: dit is het volume dat per seconde door de gebouwschil gedrukt wordt bij een drukverschil van 10 Pa (zie 1.2.1.3). Het is voor ons eenvoudiger om deze om te rekenen naar een n_{50} -waarde, omdat we de resultaten dan kunnen vergelijken met die van andere schattingsmethodes. Helaas is de stromingsgrafiek niet lineair maar een machtsfunctie, daarom hebben we bij de omzetting eigenlijk twee onbekende: de stromingscoëfficiënt en de stromingsexponent. Als we de stromingsexponent gelijk stellen aan 0.625 [17] maken we de kleinste fout. Nu kunnen we de n_{50} -waarde als volgt afleiden:

	$n_{50} = q_{v10} / V_{\text{net,geb}} \text{ [1/h]}$
	$V_{50} = C \cdot 50^n \text{ [m}^3\text{/h]}$
Uit NEN 5128:	$C = q_{v10} / 10^n \text{ [dm}^3\text{/s]}$
Dus:	$V_{50} = q_{v10} \cdot (50^n / 10^n) \cdot 3600 / 1000 \text{ [m}^3\text{/h]}$
	$V_{50} = q_{v10} \cdot 3,6 \cdot 5^n \text{ [m}^3\text{/h]}$
Met	$n = 0.625 \text{ [-]}$
	$V_{50} = 9,84 q_{v10} \text{ [m}^3\text{/h]}$
En	$n_{50} = 9,84 q_{v10} / V_{\text{net,geb}} \text{ [1/h]}$
Waarbij	$V_{\text{net,geb}} = \text{netto binnenvolume van het gebouw [m}^3 \text{]}$

De q_{v10} wordt bij deze schattingsmethode dus bepaald aan de hand van het gebouwtype, de woningkwaliteit en de verliesoppervlakte. In formulevorm wordt dit:

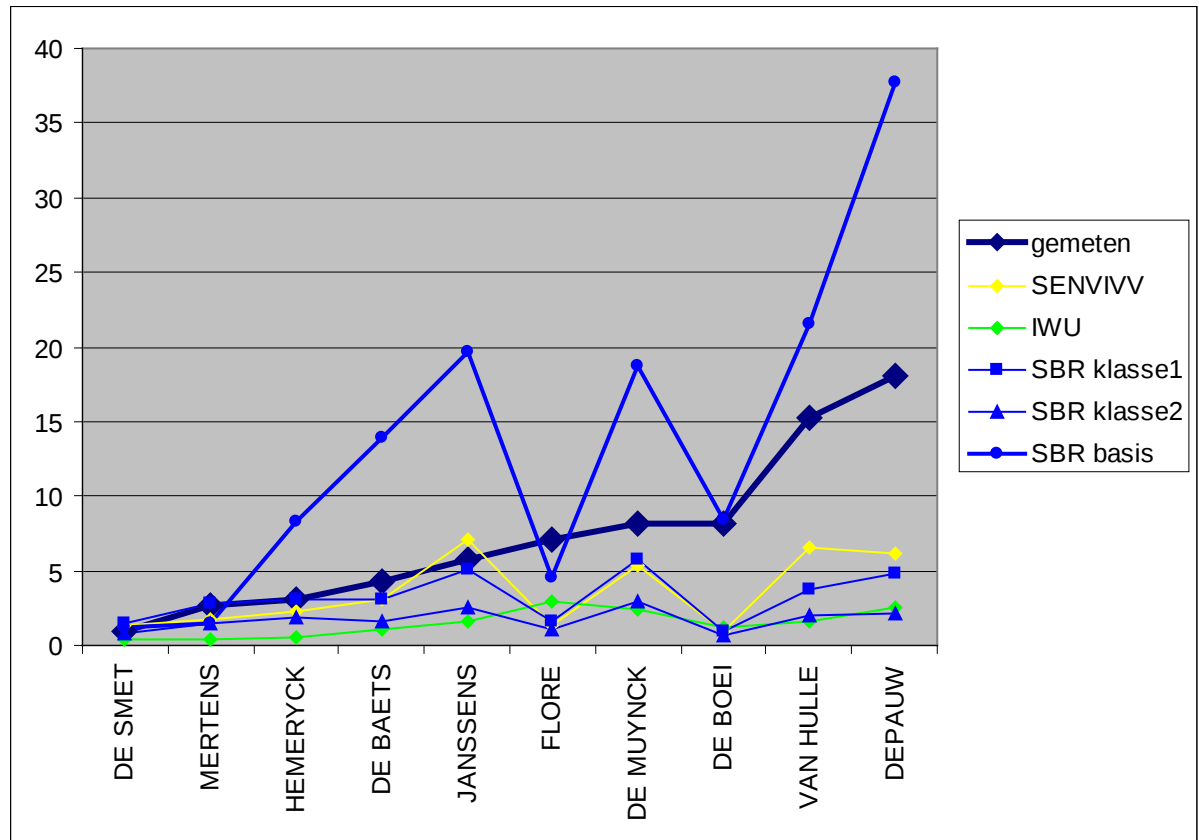
$$q_{v10} = 0.5 \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times A_{\text{verlies}} \text{ [dm}^3\text{/s]}$$

Waarbij	$C_1 = 2.0$ voor een gebouw in metselwerk
	$C_1 = 1.0$ voor een gebouw in prefabbeton
	$C_1 = 0.5$ voor houtskeletbouw
	$C_2 = 1.7$ voor een gebouw met een kapconstructie (zadeldak, tentdak...)
	$C_2 = 1.0$ voor een gebouw zonder kapconstructie
	$C_3 = 2.0$ voor een gebouw met zwakke bouwkwaliteit (geen details getekend)
	$C_3 = 1.0$ voor een gebouw met normale bouwkwaliteit (alle details getekend)
	$C_3 = 0.5$ voor een gebouw met goede bouwkwaliteit (details volgens SBR)
	$A_{\text{verlies}} = \text{verliesoppervlakte: vloer, gevels en dak}$

Verder zullen we deze methode “SBR basis” noemen.

3.7.2) Schattingen

De gemiddelde afwijking is 103%, en de methode is in 8 van de 10 gevallen een bovengrens. Het is niet verwonderlijk dat een schattingsmethode op basis van 3 parameters en de gebouwschiloppervlakte niet zo'n goede resultaten oplevert.



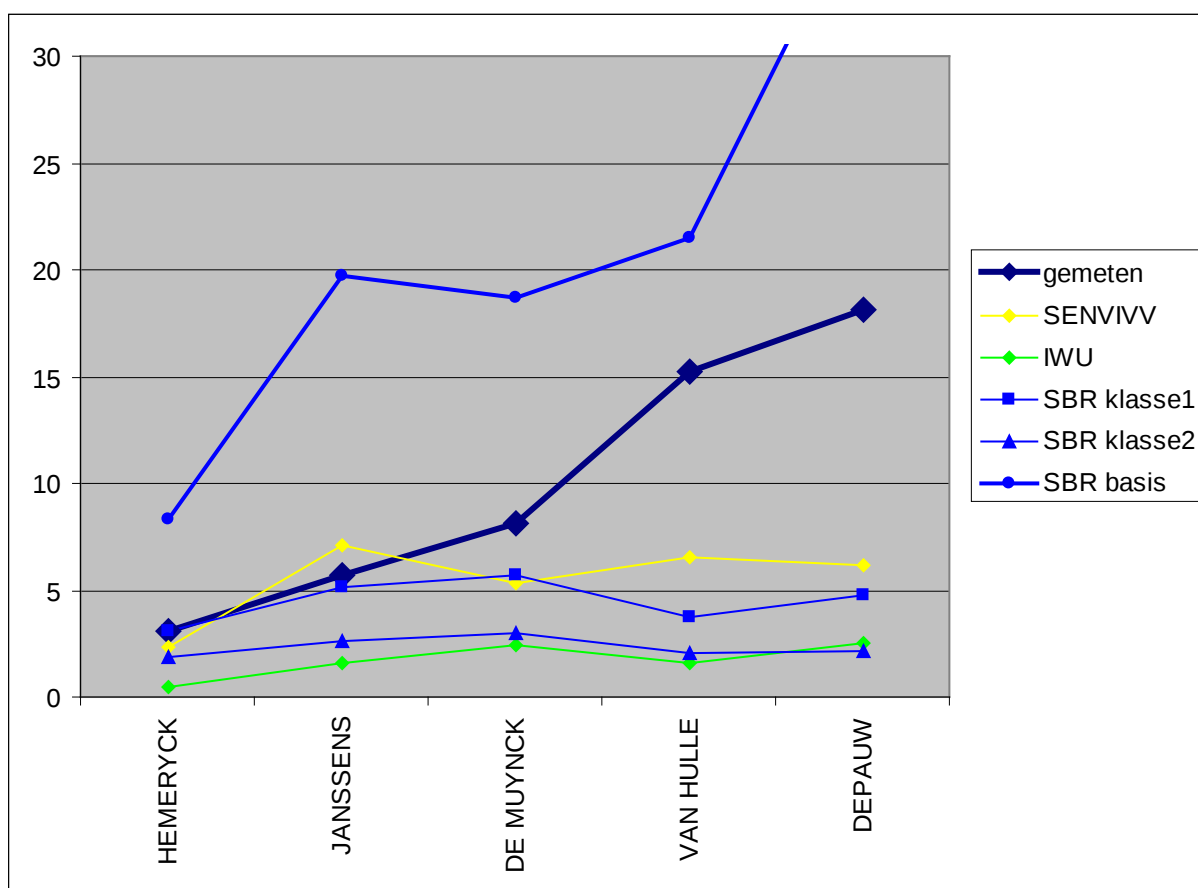
Figuur 29. “schattingsmethodes SBR ”

3.7.2.1 Open bebouwing

De schattingen zijn ook bij open bebouwing veel te onnauwkeurig. Er zit ook wel een bepaalde stijgende trend in, maar dat is niet voldoende om deze methode te kunnen gebruiken.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	SBR basis	% AFW
HEMERYCK	3,1	8,31	168
JANSSENS	5,71	19,72	245
DE MUYNCK	8,13	18,67	130
VAN HULLE	15,23	21,51	41
DEPAUW	18,10	37,79	109

Tabel 52. “schattingsmethodes SBR – open bebouwing”



Figuur 30. “schattingsmethodes SBR – open bebouwing”

3.7.2.2 Houtskeletbouw

Bij houtskeletbouw is er een gemiddelde afwijking van 36%, vergelijkbaar met de schattingen van SENVIVV en AIVC, maar de berekening gaat veel sneller.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	SBR basis	% AFW
DE SMET	0,97	1,21	25
MERTENS	2,7	1,42	-47

Tabel 53. “schattingsmethodes SBR – houtskeletbouw”

3.7.2.3 Appartementen

Van alle methodes liggen de resultaten van deze het dichtst bij de werkelijkheid, met een afwijking van 21%. Als we kijken naar de andere resultaten van deze methode, dienen we toch op te merken dat dit veeleer aan statistisch toeval te wijten is. Alleen een grotere steekproef kan hier uitsluitsel bieden.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	SBR basis	% AFW
FLORE	7,10	4,50	-37
DE BOEI	8,15	8,47	4

Tabel 54. “schattingsmethodes SBR – appartementen”

3.7.3) Schattingen SENVIVV-studie^[21]

In de SENVIVV-studie zelf heeft men geen onderzoek gedaan naar de schattingsmethode van SBR, maar er zijn wel genoeg gegevens voorhanden om enkele dingen te berekenen. We kennen de gebouwtypologie, het type dak, en de gebouwschiloppervlakte (we kijken enkel naar open bebouwing, omdat we van de andere het gebouwschiloppervlak niet weten) .

Stel dat er van elke woning alle details zijn uitgetekend (dus $C3 = 1$), dan is de gemiddelde n_{50} -waarde gelijk aan 32 en is de gemiddelde afwijking bijna 270%. Van de 27 gemeten woningen in open bebouwing zijn er slechts 2 met een n_{50} -waarde kleiner dan 5, dus waarschijnlijk zijn er zo goed als geen woningen uitgetekend met SBR-details.

Dit wil zeggen dat het gemiddelde van de SBR-waardes 32 is, terwijl het gemiddelde van de gemeten waardes 12 is. Voor de traditionele woningen is de SBR duidelijk een bovengrens, voor houtskeletbouw ligt de SBR-waarde zeer dicht bij de gemeten waarde.

Voor appartementen kunnen we de methode niet controleren door een gebrek aan gegevens.

3.8) SBR schattingsmethode 2^[17]

3.8.1) Principe

Bij de tweede bepalingmethode wordt de werkelijke q_{v10} waarde zo goed mogelijk benaderd: hier gaat men uit van de geschatte verliezen door specifieke aansluitingen, zoals bij de AIVC-, ASHRAE- en SENVIVV-methode, maar men houdt echter geen rekening met de verliezen door wanden.

Verder wordt er nog een onderscheid gemaakt naar luchtdichtheidsklasse 1 en 2. Volgens NEN 2687 geldt klasse 1 voor woningen met ventilatiesysteem A (natuurlijke toe- en afvoer) en systeem C (natuurlijke toevoer, mechanische afvoer) Luchtdichtheidsklasse 2 geldt dan voor systeem B (mechanische toevoer en natuurlijke afvoer) en systeem D (mechanische toe- en afvoer). Klasse 2 is duidelijk strenger dan klasse 1, omdat er lokalen in overdruk geplaatst

worden, en omdat warmterecuperatie belangrijk kan zijn bij systeem D. De waarden voor klasse 1 stemmen dus overeen met een normale uitvoering, die van klasse 2 met een goede uitvoering. In de onderstaande tabel worden c-waarden gegeven: als we deze vermenigvuldigen met de lengtes van de overeenkomstige aansluitingen en doorvoeren waarna we alles optellen bekomen we de stromingscoëfficiënt C, uitgedrukt in dm³/s

$$V_{50} = C \cdot 50^n \cdot 3600 / 1000 \text{ [m}^3/\text{h]}$$

Met

$$n = 0.625 \text{ [-]}$$

$$V_{50} = C \cdot 3,6 \cdot 50^{0.625} \text{ [m}^3/\text{h]}$$

$$V_{50} = 41,51 \cdot C \text{ [m}^3/\text{h]}$$

	Klasse 1		Klasse 2	
Doorvoer	Lek opp [cm ²]	V50-waarde [m ³ /h]	Lek opp [cm ²]	V50-waarde [m ³ /h]
Ø 15	1.4	7.9	0.5	2.9
Ø 25	2.2	12.8	0.8	4.6
Ø 50	4.1	23.7	1.6	9.2
Ø 80	13.4	78.0	2.5	14.5
Ø 100	16.4	95.9	3.17	18.3
Ø 125	20.4	118.7	4.0	23.2
Ø 150	24.4	142.0	4.7	27.4
Ø 200	32.2	187.2	6.3	36.5

Tabel 55. “lekkage doorvoeren in vloeren en daken SBR”

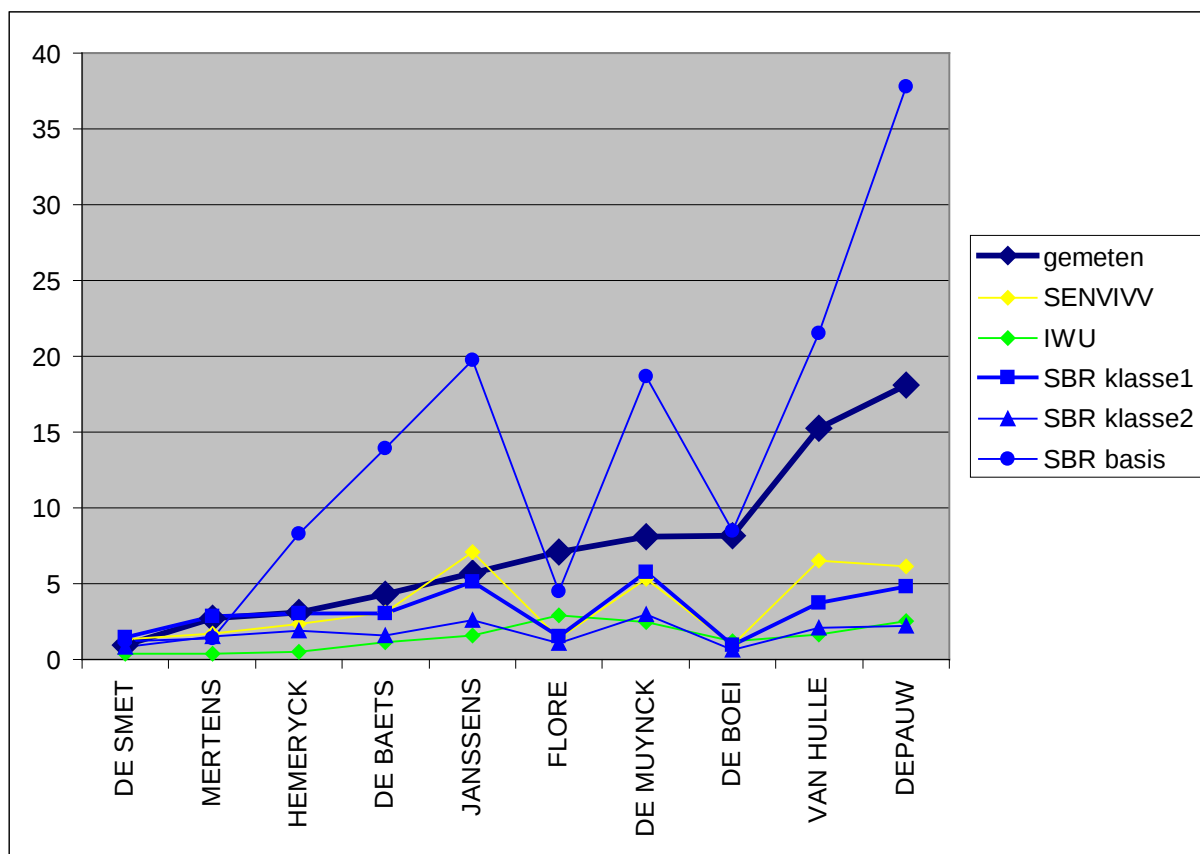
		Klasse 1	Klasse 2	
1	Dakvoet	4.15	2.08	m ³ /(h.m)
2	Nok	8.30	4.15	m ³ /(h.m)
3	Naden tussen kozijn en gevel	2.08	1.04	m ³ /(h.m)
4	Naden tussen dakraam en dak	4.15	2.08	m ³ /(h.m)
5	Naden tussen dak en muur	4.15	2.08	m ³ /(h.m)
6	Naden tussen daken onderling	0.42	0.21	m ³ /(h.m)

7	Naden tussen gevelconstructie en muur	0.42	0.42	m ³ /(h.m)
8	Naden tussen gevel en vloer	0.83	0.42	m ³ /(h.m)
9a	Draaiende delen in kozijnen (doorgaande kaderdichting)	6.2	5.0	m ³ /(h.m)
9b	Draaiende delen in kozijnen (geen kaderdichting, wel tochtprofielen)	8.30	6.2	m ³ /(h.m)
10	Doorvoeren in vloer	0.83	0.62	m ³ /(h.m ²)
11	Doorvoeren door dak	308	58.1	m ³ /h
12	Aansluiting kozijnen onderling	2.08	1.05	m ³ /(h.m)
13a	Natte beglazing	-	-	m ³ /(h.m)
13b	Droge beglazing (koud geplaatst)	0.83	-	m ³ /(h.m)
14	Ventilatioeroosters	9.84.q _{vnorm}	9.84.q _{vnorm}	m ³ /(h.m)
15	Zijwang dakopbouw tegen langsgevel	4.15	2.08	m ³ /(h.m)
16	Dakramen	2.08	1.04	m ³ /(h.m)
17	Dakkapellen	4.15	2.08	m ³ /(h.m)
18	kilgoot	8.30	4.15	m ³ /(h.m)

Tabel 56. “lekkage componenten SBR”

3.8.2) SBR klasse 1

De gemiddelde afwijking is 44%, en de maximale afwijking is 88%. Zoals verschillende andere schattingsmethodes komen de waarden vrij goed overeen behalve voor de 2 appartementen en de 2 meest luchtopen woningen.



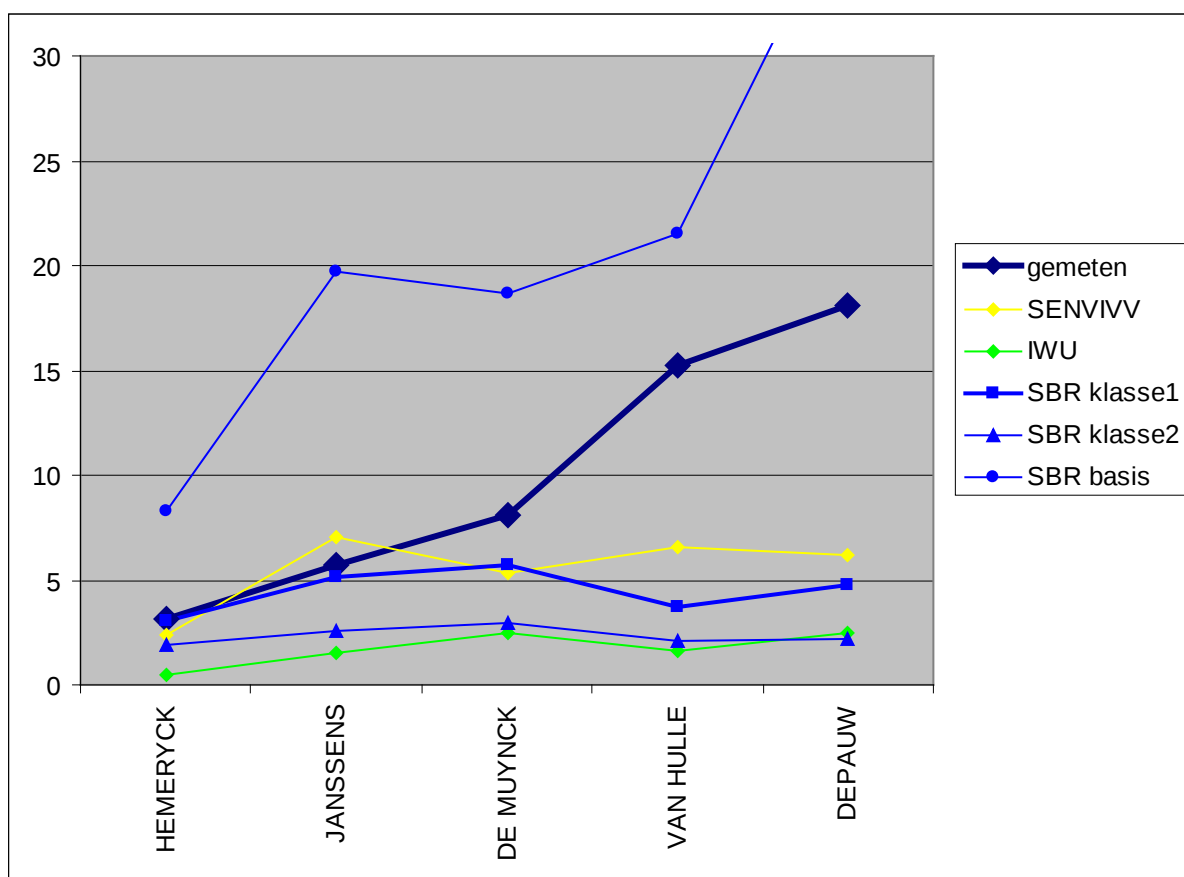
Figuur 31. “schattingsmethodes SBR klasse 1”

3.8.2.1 Open bebouwing

De luchtdichtheid wordt voor alle woningen in open bebouwing te laag ingeschat, en hoewel een gemiddelde afwijking van 36% zeer goed is, is de afwijking bij minder luchtdichte te groot.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	SBR klasse1	% AFW
HEMERYCK	3,1	3,06	-1
JANSSENS	5,71	5,14	-10
DE MUYNCK	8,13	5,73	-30
VAN HULLE	15,23	3,71	-76
DEPAUW	18,10	4,78	-74

Tabel 57. “schattingsmethodes SBR klasse 1 – open bebouwing”



Figuur 32. “schattingsmethodes SBR klasse 1 – open bebouwing”

3.8.2.2 Houtskeletbouw

Voor houtskeletbouw blijkt deze schattingsmethode de werkelijkheid het dichtst te benaderen, met een gemiddelde afwijking van 28%.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	SBR klasse1	% AFW
DE SMET	0,97	1,45	50
MERTENS	2,7	2,84	5

Tabel 58. “schattingsmethodes SBR klasse 1 - houtskeletbouw”

3.8.2.3 Appartementen

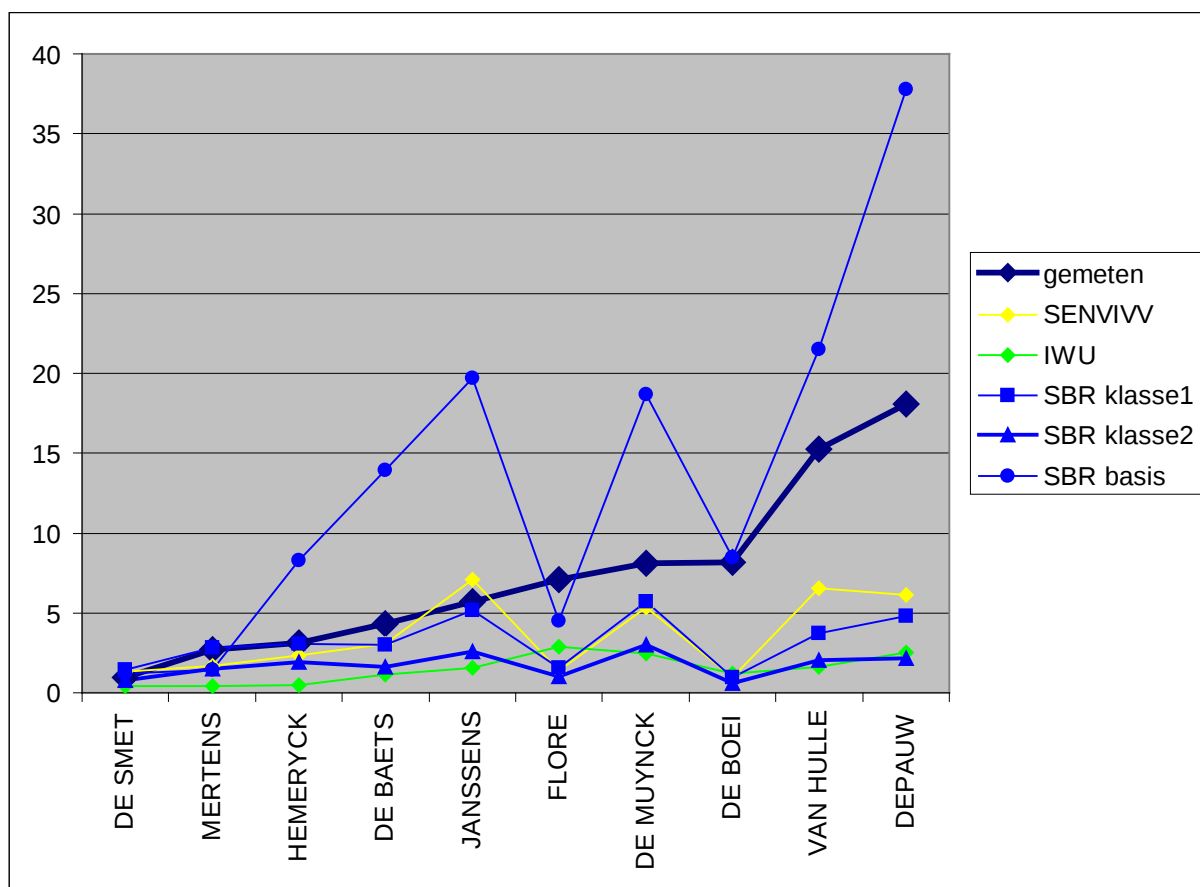
Appartementen worden duidelijk veel te luchtdicht ingeschat.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	SBR klasse1	% AFW
FLORE	7,10	1,54	-78
DE BOEI	8,15	0,95	-88

Tabel 59. “schattingsmethodes SBR klasse 1 - appartementen”

3.8.3) SBR klasse 2

De waarden van SBR klasse 2 liggen lager dan die van SBR klasse 1, het is dan ook een ondergrens van alle metingen met een afwijking van 63%



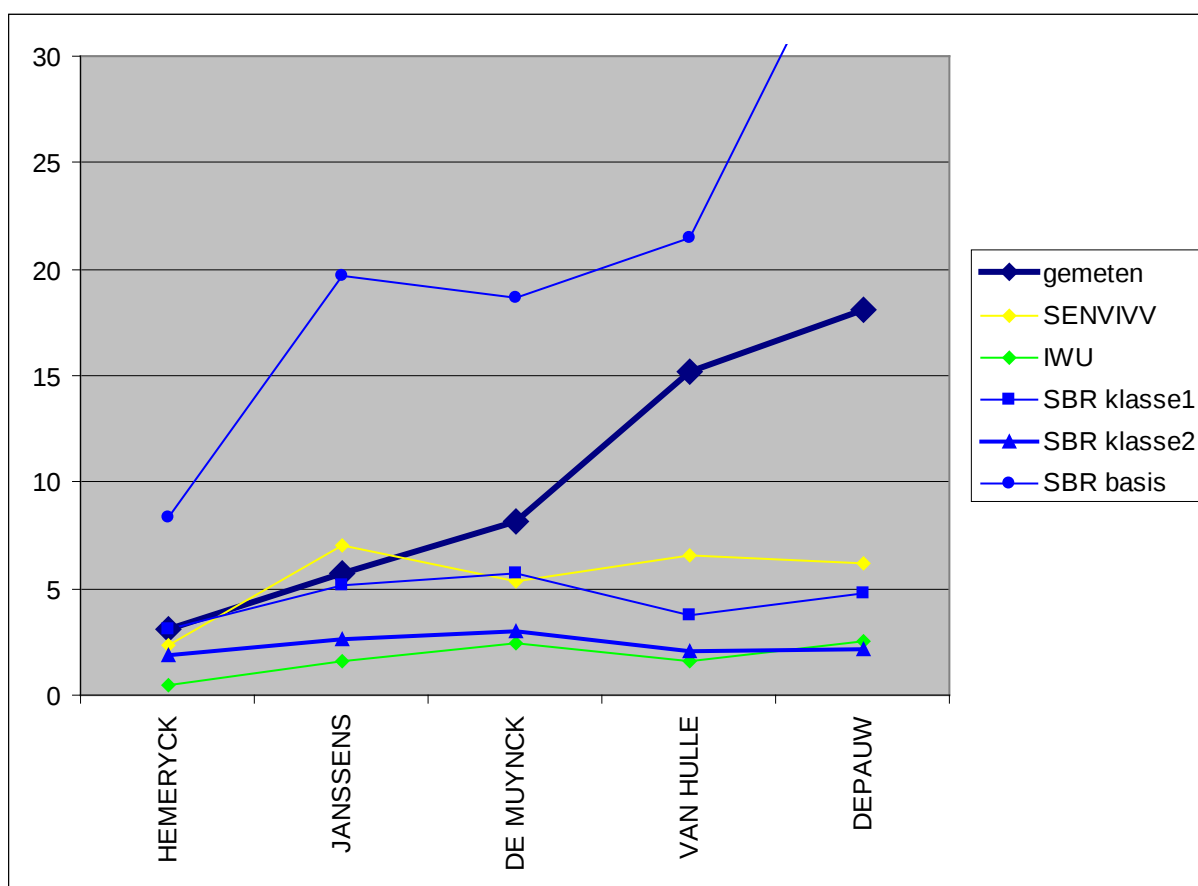
Figuur 33. “schattingmethodes SBR klasse 2”

3.8.3.1 Open bebouwing

De gemiddelde afwijking bij open bebouwing is 66%.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	SBR klasse2	% AFW
HEMERYCK	3,1	1,91	-39
JANSSENS	5,71	2,59	-55
DE MUYNCK	8,13	2,99	-63
VAN HULLE	15,23	2,07	-86
DEPAUW	18,10	2,19	-88

Tabel 60. “schattingmethodes SBR klasse 2 – open bebouwing”



Figuur 34. “schattingsmethodes SBR klasse 2 – open bebouwing”

3.8.3.2 Houtskeletbouw

Een gemiddelde afwijking van 32% is niet slecht, maar de berekening aan de hand van klasse1 kwam nog beter overeen met de werkelijkheid.

<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	SBR klasse2	% AFW
DE SMET	0,97	0,80	-18
MERTENS	2,7	1,49	-45

Tabel 61. “schattingsmethodes SBR klasse 2 - houtskeletbouw”

3.8.3.2 Appartementen

Deze methode is niet geschikt om de luchtdichtheid van appartementen te schatten.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	SBR klasse2	% AFW
FLORE	7,10	1,05	-85
DE BOEI	8,15	0,61	-92

Tabel 62. “schattingsmethodes SBR klasse 2 - appartementen”

3.8.4) Besluit

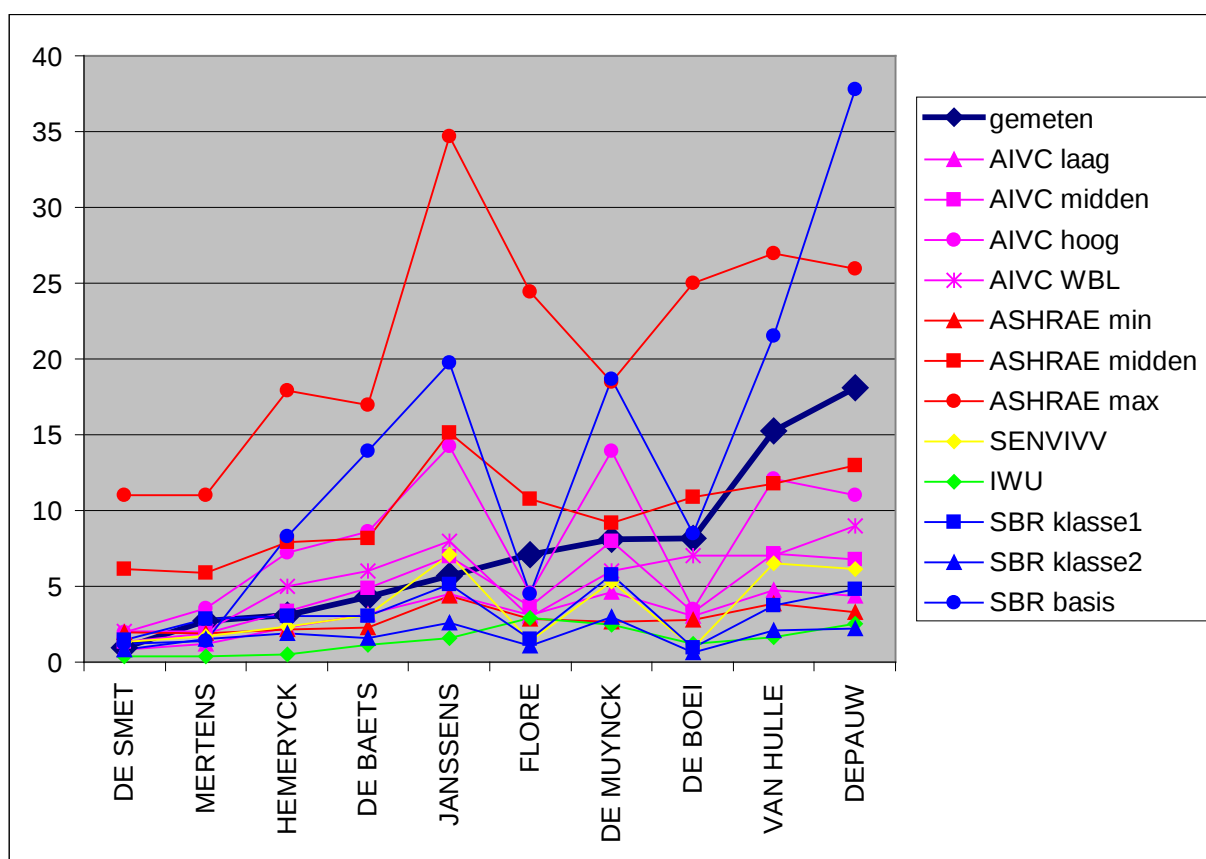
De SBR schattingsmethode klasse 1 is bijzonder geschikt om de luchtdichtheid van houtskeletbouwwoningen te schatten. Ook voor redelijk luchtdicht uitgevoerd woningen in open bebouwing komt de schatting betrekkelijk goed overeen met de werkelijkheid. Voor appartementen en redelijk luchtopen woningen is deze methode niet geschikt. SBR klasse 2 is enkel bruikbaar als ondergrens voor de metingen.

3.9) Onderling verband tussen de schattingsmethodes

Uiteindelijk zijn er vijf verschillende organisaties die één of meerdere schattingsmethodes ontwikkeld hebben: ‘Air Infiltration and Ventilation Centre’, ‘American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers’, de SENVIVV-studie, ‘Institut Wohnen und Umwelt’ en de ‘Stichting BouwResearch’. De verschillende schattingen zijn weergegeven in figuur 35.

Als we kijken naar de resultaten van de analyse zien we een aantal parallellen tussen de verschillende methodes. Enerzijds is dit natuurlijk te verwachten, want hoe dichter alle methodes bij elkaar liggen, hoe beter men de werkelijkheid waarschijnlijk benadert, anderzijds kan dit ook het gevolg zijn van het overnemen van basisgegevens door één instantie van een andere.

Bovendien wordt er relatief weinig onderzoek gedaan binnen dit domein van de bouwfysica, dus het aantal onderzoeken dat basisgegevens levert is beperkt.



Figuur 35. “onderlinge afhankelijkheid schattingsmethodes”

We zien in figuur 35 duidelijk dat ASHRAE [14] zich baseert op totaal andere gegevens (“waarden gevonden in de literatuur”) dan de overige instanties, de schattingen volgens de ASHRAE-methodes sluiten ook niet aan bij de gemeten waardes. Waarschijnlijk zijn de verschillen in gebouwtypologie en constructiemethodes tussen Amerikaanse en Europese woningen te groot om algemeen geldende schattingsmethodes voorop te kunnen stellen.

Het Institut Wohnen und Umwelt baseert zich bijna uitsluitend op Duitse onderzoeken (zie 3.6.1) [9]. Helaas zijn er nog te grote hiaten in de gegevenstabellen om de werkelijke uitvoering van een woning voldoende adequaat weer te geven, waardoor de schatting van lekkage door wanden ook minder betrouwbaar wordt.

Het Air Infiltration and Ventilation Centre heeft veel ervaring op het gebied van onderzoek naar luchtdichtheid: de basisgegevens voor de berekeningen zijn gebaseerd op meer dan 1700 proeven op bouwcomponenten [18]. De SENVIVV-studie baseert zich op deze gegevens, alsook op ‘ervaring en logisch denken’[20]. De Stichting BouwResearch baseert zich ook op deze gegevens en ‘meetresultaten’[17].

3.10) Algemeen besluit

Over alle woningen bekeken is de schattingsmethode ‘AIVC midden’ duidelijk het best. Alleen voor appartementen is deze niet zo geschikt. Het is de meest aangewezen methode bij open bebouwing en houtskeletbouw. Bovendien kan er een kwalitatief onderscheid gemaakt worden door de verschillende fractielwaarden.

Een aantal schattingsmethodes blijkt voor geen enkele typologie betrouwbaar te zijn: ASHRAE minimum, midden en maximum, IWU, AIVC laag, AIVC hoog, SBR klasse 2.

De schattingsmethodes die zich niet baseren op afzonderlijke verliezen door gebouwcomponenten zijn soms beter dan uitgewerkte schattingen. De “whole building leakage”-methode van het AIVC heeft een gemiddelde afwijking van 48%, alleen AIVC midden doet duidelijk beter. De snelle schattingsmethode van de Stichting BouwResearch is enkel betrouwbaar voor houtskeletbouw.

De SENVIVV-methode heeft een gemiddelde afwijking van 48%, wat ook niet slecht is. We moeten wel vaststellen dat ze niet zo betrouwbaar is als in het eindrapport van de SENVIVV-studie beweerd wordt: 4 van de 10 woningen vallen buiten de 50%-nauwkeurigheidsgrens.

De SBR klasse 1 is geschikt voor houtskeletbouw en eerder luchtdichte woningen.

4) Schattingsmethodes lekkageverdeling

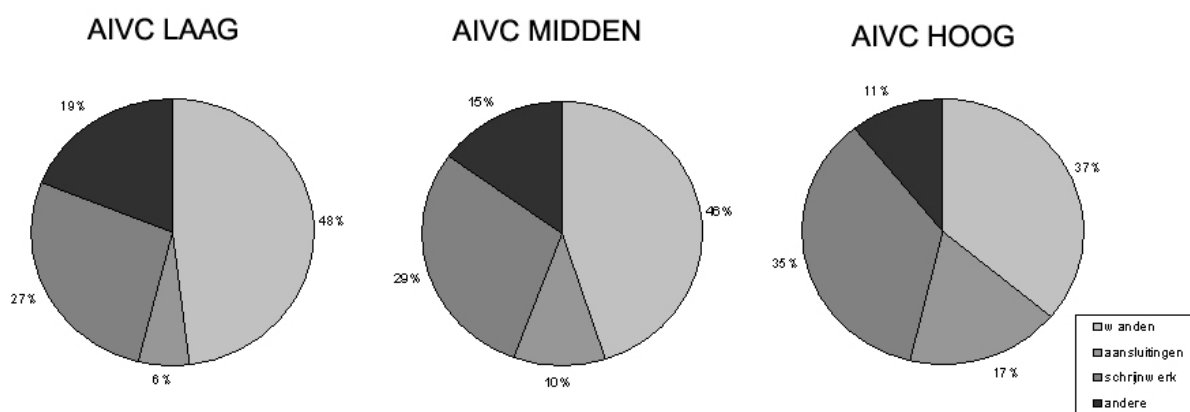
4.1) Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we de 12 verschillende schattingsmethodes behandeld waarmee we de luchtdichtheid van woningen kunnen ramen. Van die 12 methodes zijn er 10 die een uitspraak doen over het relatieve aandeel van de verschillende bouwcomponenten in het totale lekdebiet. We zullen nu het relatieve aandeel van bouwdelen in de schattingsmethodes onderling vergelijken. Aan de hand van de beste schattingsmethodes kunnen we dan zien welke lekverdeling waarschijnlijk het dichtst ligt bij de realiteit van de Vlaamse bouwpraktijk. Voor de lekverdeling hebben we telkens het gemiddelde genomen van de afzonderlijke schattingen van een bepaalde gebouwtypologie.

4.2) Lekkageverdeling per schattingsmethode

4.2.1) Open bebouwing

4.2.1.1 AIVC

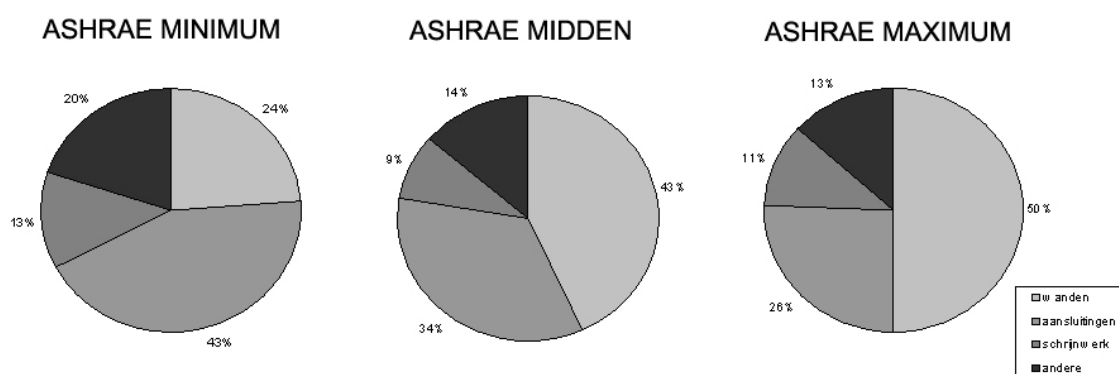


Figuur 36. “lekkageverdeling AIVC – open bebouwing”

Bij de schattingsmethode van het AIVC [18] [32] wordt een groot deel van de verliezen toegeschreven aan de wanden. Bij minder luchtdichte woningen neemt het belang van de wanden iets af, en verdubbelt het aandeel van de aansluitingen. Toch blijft het aandeel van aansluitingen hier vrij klein in vergelijking met andere schattingsmethodes. AIVC midden had

in de test slechts een gemiddelde afwijking van 30%, wat het best was van alle schattingen. Deze lekverdeling zou dus vrij goed moeten aansluiten bij de werkelijkheid.

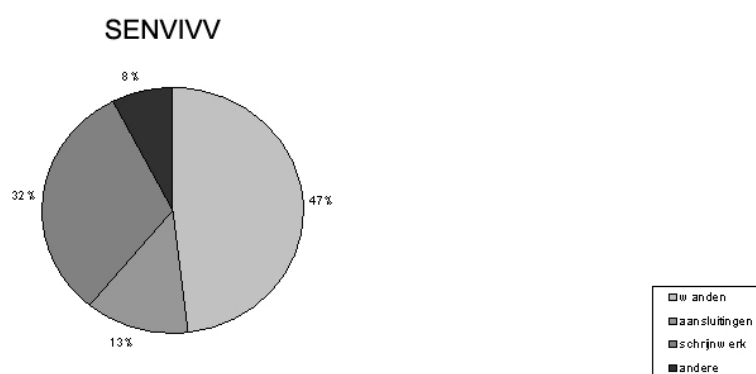
4.2.1.2 ASHRAE



Figuur 37. “lekkeverdeling ASHRAE – open bebouwing”

ASHRAE [14] minimum is een ondergrens voor de 5 woningen in open bebouwing, ASHRAE maximum is een bovengrens voor alle woningen. ASHRAE midden heeft een gemiddelde afwijking van 121%, en geeft minder accurate schattingen voor eerder luchtdichte woningen. In de lekverdeling zien we dat het relatieve aandeel van de wanden sterk stijgt bij meer luchtopen woningen, en ondertussen het aandeel van de aansluitingen daalt. We zouden juist verwachten dat er grotere variaties mogelijk zijn bij aansluitingen, en de verliezen door wanden vrij constant zijn.

4.2.1.3 SENVIVV

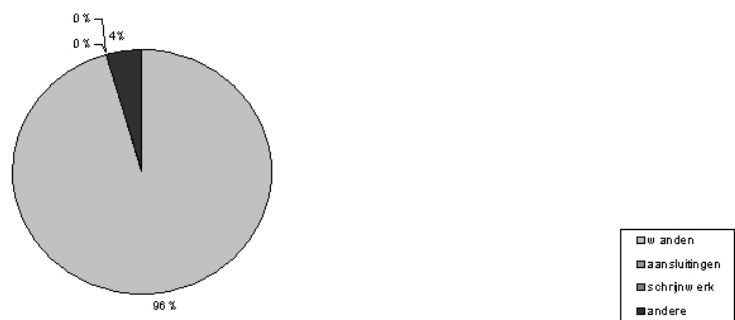


Figuur 38. “lekkeverdeling SENVIVV – open bebouwing”

Voor eerder luchtdichte woningen is deze schattingsmethode aanvaardbaar, maar bij andere is de afwijking te groot. Blijkbaar is het toch nodig om meer kwalitatief onderscheid te kunnen maken om een zekere speling te voorzien. De luchtdichtheid is niet enkel in functie van de geometrie en materialen van de woning, ook de specifieke praktische uitvoering van alle elementen is van belang. [20]

4.2.1.4 Institut Wohnen und Umwelt

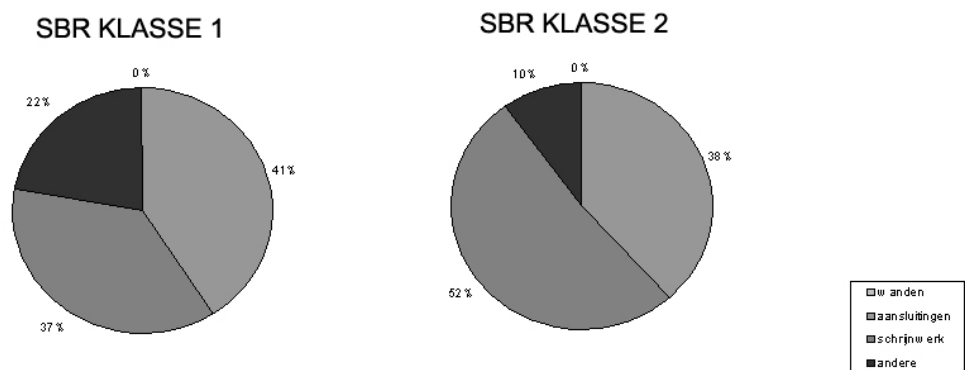
INSTITUT WOHNEN UND UMWELT



Figuur 39. “lekkageverdeling IWU – open bebouwing”

Deze methode [9] moet een ondergrens vormen omdat er enkel rekening gehouden wordt met de wanden, en niet met aansluitingen of schrijnwerk. De gemiddelde afwijking over alle woningen is 76%, wat eigenlijk nog meevalt. Het aandeel van de wanden in de totale luchtlekkage is dus niet te onderschatten. De schatting van de lekkage door de wand bedraagt tussen de 10% en de 30% van de totale gemeten lekkage.

4.2.1.5 SBR



Figuur 40. “lekkageverdeling SBR – open bebouwing”

De gemiddelde afwijking bij SBR klasse 1 is 36%, wat vrij goed is, vergelijkbaar met AIVC midden. Hier wordt echter geen rekening gehouden met de luchtlekkage door wanden. Het aandeel van het schrijnwerk is hier in vergelijking met de andere schattingen bijzonder hoog. De afwijking bij SBR klasse 2 is iets groter.

4.2.1.6 Besluit

Het is verwonderlijk dat zowel schattingsmethodes die geen rekening houden met wanden, als schattingsmethodes die enkel rekening houden met wanden tot vrij goede resultaten komen. Er zijn natuurlijke een aantal geometrische grenzen aan woningen, zodat bij wijze van spreken elk geometrisch kenmerk van woningen als basis kan genomen worden voor schattingsmethodes. Uit de studie blijkt ook dat er geen duidelijke evenredigheid is tussen luchtdichtheid en lengte van aansluitingen, of oppervlakte van gebouwschil.

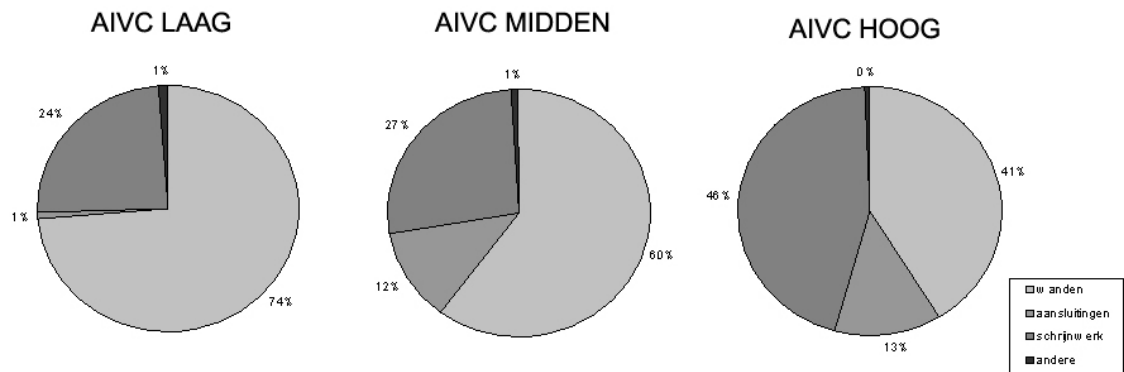
Als we alle schattingen met elkaar vergelijken en alle gegevens in rekening brengen, stellen we volgende schatting van de lekverdeling voorop:

Wanden	40%
Aansluitingen	15%
Schrijnwerk	30%
Doorvoeren, perforaties...	15%

Verder is het moeilijk bepaalde conclusies te trekken, omdat gelijkwaardige schattingen vaak uitgaan van compleet verschillende lekkageverdelingen. We kunnen enkel besluiten dat het vaak toeval is dat er een goede schatting gemaakt wordt. Door het grote aantal geometrische parameters is de kans groot dat er toevallig een ander element door die bepaalde schattingsmethode zwaarder doorweegt, zodat de totale schatting ongeveer gelijk is. Er kan alleen uitsluitsel bekomen worden door deze studie uit te voeren op veel meer woningen, en dan nog is het niet zeker dat de bepalende elementen daar uit gefilterd kunnen worden.

4.2.2) Houtskeletbouw

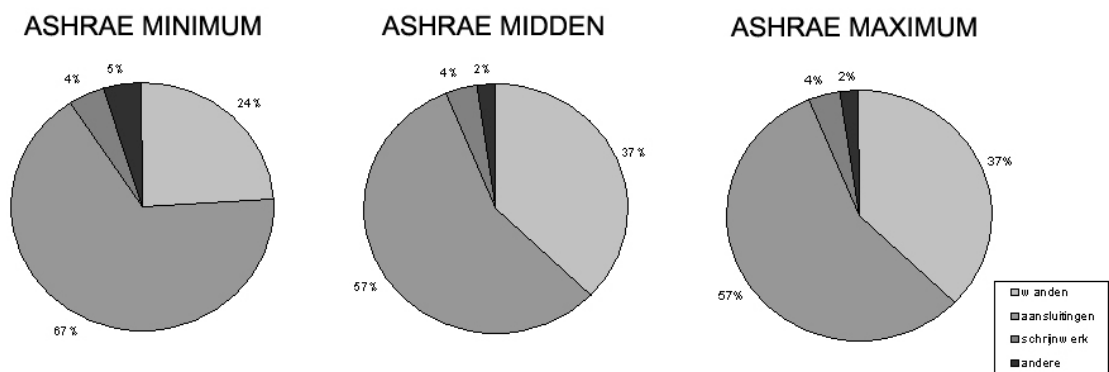
4.2.2.1 AIVC



Figuur 41. “lekkegeverdeling AIVC – houtskeletbouw”

Zowel AIVC laag als AIVC midden geven goede benaderingen van de gemeten waarden (afwijkingen 35% en 34%). In vergelijking met woningen in massiefbouw is het aandeel van de wanden hier veel groter. Verliezen bij doorvoeren en aansluitingen zijn dan weer minimaal. Men gaat er dus van uit dat bij houtskeletbouw er veel meer aandacht geschonken wordt aan alle aansluitingen.

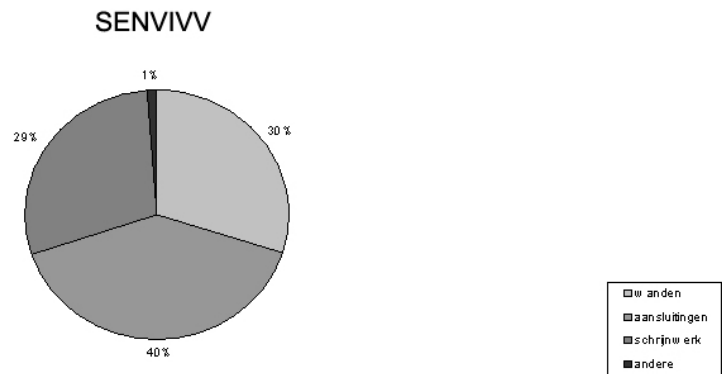
4.2.2.2 ASHRAE



Figuur 42. “lekkegeverdeling ASHRAE – houtskeletbouw”

Geen enkel van de drie methodes maakt aanvaardbare schattingen voor houtskeletbouw. Het belang van de aansluitingen in de totale luchtlekkage is hier waarschijnlijk dus niet correct weergegeven.

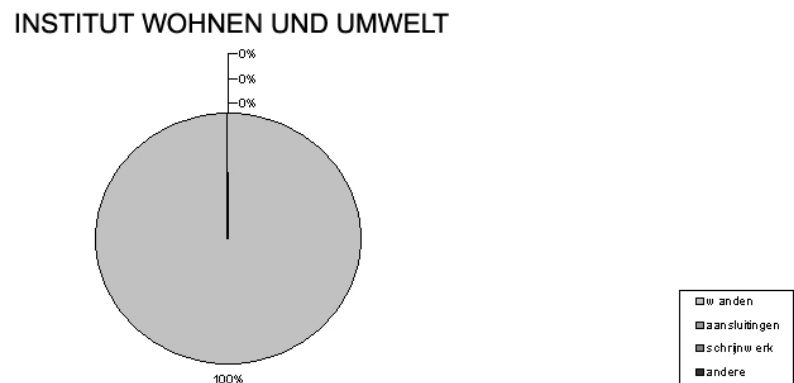
4.2.2.3 SENVIVV



Figuur 43. “lekkageverdeling SENVIVV – houtskeletbouw”

Met een gemiddelde afwijking van 37% is deze methode ongeveer gelijkwaardig met AIVC midden. Alleen is het aandeel van de aansluitingen hier proportioneel veel groter: 40% tegenover 12% bij AIVC midden.

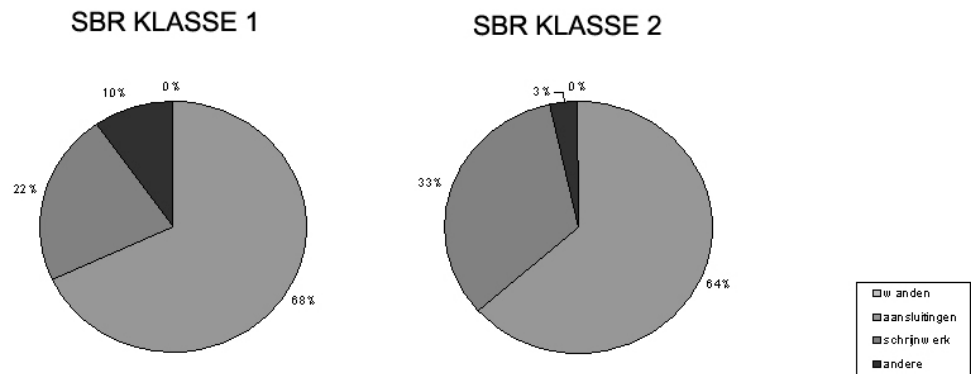
4.2.2.4 Institut Wohnen und Umwelt



Figuur 44. “lekkageverdeling IWU – houtskeletbouw”

De gemiddelde afwijking is 72%, de schatting van de lekkage door de wanden bedraagt volgens deze gegevens in werkelijkheid 15% en 40% van de gemeten waarden.

4.2.2.5 SBR



Figuur 45. “lekkeverdeling SBR – houtskeletbouw”

Hoewel het aandeel van de aansluitingen ongeveer overeenkomt met de methode van ASHRAE zijn beide schattingen (SBR klasse 1 en SBR klasse 2) vrij nauwkeurig, vooral SBR klasse 1 komt goed overeen met de werkelijkheid. De cijferwaardes van deze methode moeten dus beter verdeeld zijn over de verschillende gebouwcomponenten dan bij ASHRAE.

4.2.2.6 Besluit

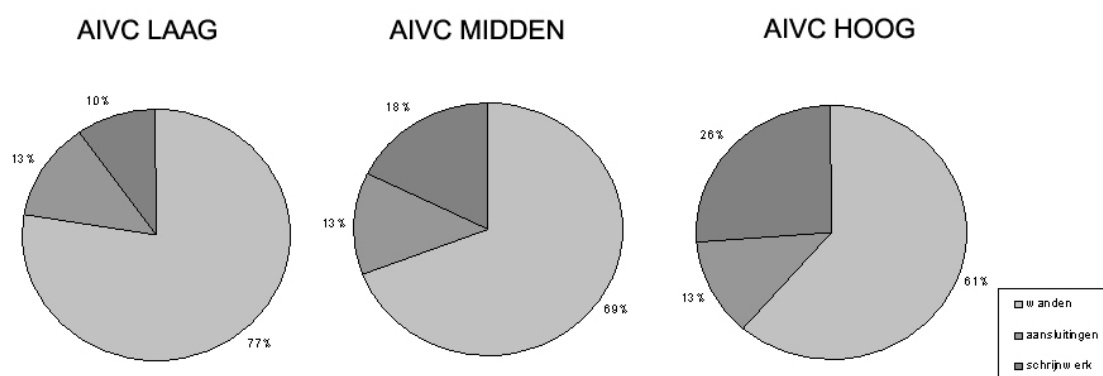
Het belang van de aansluitingen varieert van 1% tot 68% bij schattingen die aanvaardbaar zijn. Het aandeel van het schrijnwerk zit duidelijk tussen de 20% en 30%. Als we alle gegevens in rekening brengen en de verschillende schattingen onderling vergelijken komen we tot de volgende lekverdeling:

Wanden	40%
Aansluitingen	30%
Schrijnwerk	25%
Doorvoeren etc	5%

We moeten er evenwel rekening mee houden dat de verschillende schattingsmethodes slechts voor twee woningen uitgerekend zijn.

4.2.3) Appartementen

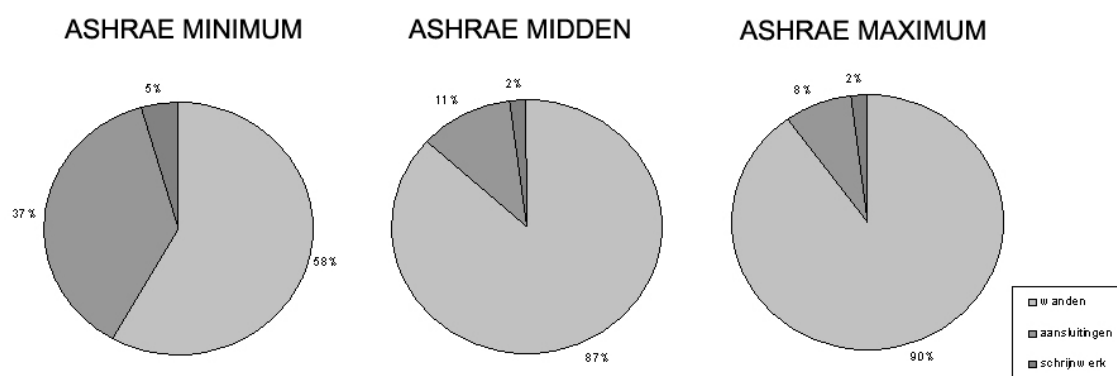
4.2.3.1 AIVC



Figuur 46. “lekkageverdeling AIVC – appartementen”

De luchtdichtheid van de appartementen wordt bij de drie schattingsmethodes lager geschat dan de werkelijke waarde. Hier staan de wanden voor 60 tot 70% van de verliezen in.

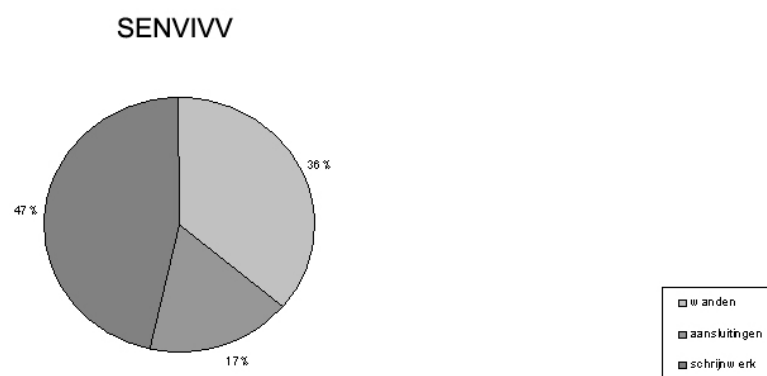
4.2.3.2 ASHRAE



Figuur 47. “lekkageverdeling ASHRAE – appartementen”

De methode ASHRAE midden ligt van alle schattingen op basis van gebouwcomponenten het dichtst bij de werkelijkheid. Hier wordt echter 87% van alle verliezen toegeschreven aan de wanden, terwijl in een werkelijke situatie er geen drukverschil is tussen de appartementen onderling, en de verliezen door de wanden in theorie gelijk is aan 0%.

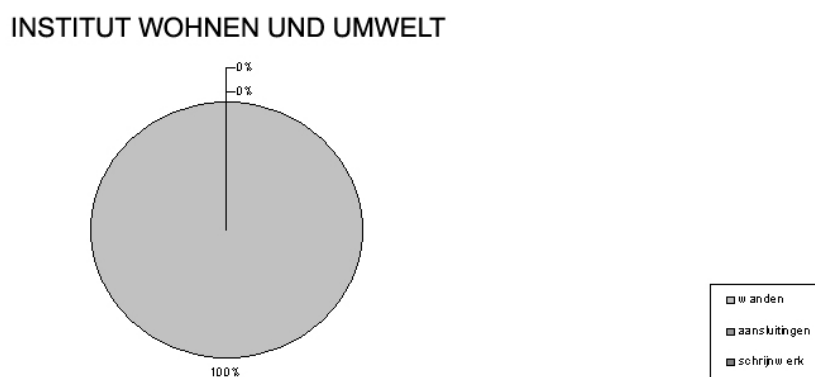
4.2.3.3 SENVIVV



Figuur 48. “lekkageverdeling SENVIVV – appartementen”

Deze methode is niet geschikt om de luchtdichtheid van appartementen in te schatten, de bekomen waardes zijn veel te laag, de gemiddelde afwijking is 85%.

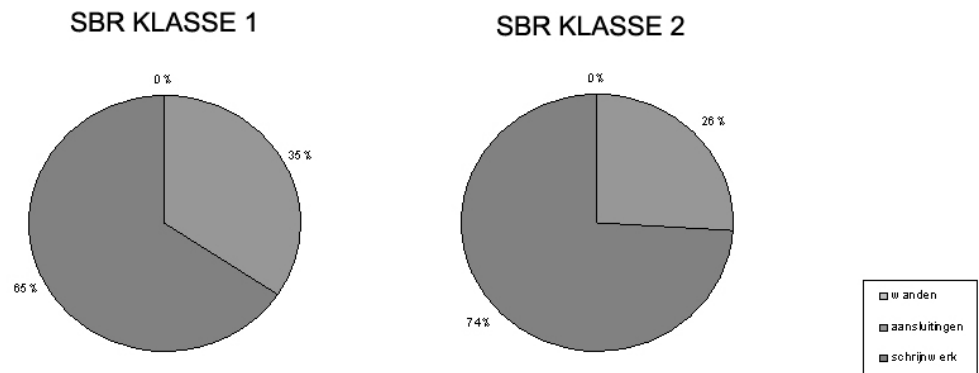
4.2.3.4 Institut Wohnen und Umwelt



Figuur 49. “lekkageverdeling IWU – appartementen”

De wanden zijn volgens deze berekeningen verantwoordelijk voor 15% en 30% van de totale gemeten lekkage.

4.2.3.5 SBR



Figuur 50. “lekkageverdeling SBR – appartementen”

Ook bij deze methodes wordt de n_{50} -waarde veel te laag ingeschat. Ze zijn dan ook niet aanvaardbaar voor appartementen.

4.2.3.6 Besluit

Geen enkele methode is betrouwbaar. Het is typisch bij appartementen dat langs de vloeren, plafonds en wanden in werkelijkheid weinig verliezen zullen optreden. Er is geen enkele schattingsmethode op basis van gebouwcomponenten die daar rekening mee houdt. Daarom kunnen we ook geen lekverdeling bepalen.

4.3) Absolute lekkage per gebouwcomponent

Hier gaan we per gebouwcomponent de verschillende methodes vergelijken in absolute waarden. Ter vereenvoudiging gebruiken we volgende aanduiding voor de verschillende schattingsmethodes in de tabel:

- A AIVC laag
- B AIVC midden
- C AIVC hoog
- D ASHRAE minimum
- E ASHRAE midden
- F ASHRAE maximum
- G Institut Wohnen und Umwelt
- H SENVIVV
- I SBR klasse 1
- J SBR klasse 2

4.3.1) Wanden, vloeren, plafonds

In onderstaande tabel worden de luchtvolumestromen gegeven die per uur door 1m² wand stromen bij een drukverschil van 50 Pa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Bepleurde wand	1.66	1.80	2.02	0.24	3.31	11.2	0.05	1.00	0.00	0.00
Niet bepl. wand	2.12	3.53	6.62	6.33	17.0	19.5	15.0	3.00	0.00	0.00
Houtskeletwand met scherm	0.83	1.30	1.55	0.27	0.73	1.02	0.50	1-10	0.00	0.00
Hellend dak met damp scherm	0.83	1.30	1.55	0.27	0.73	1.02	4.00	1-10	0.00	0.00
Plat dak	2.02	2.02	2.02	0.27	0.73	1.02	1.00	0.00	0.00	0.00
Betonnen vloer	2.02	2.02	2.02	1.94	10.7	23.9	1.00	0.00	0.00	0.00

Tabel 63. “vergelijking lekkageverdeling wanden”

4.3.2) Aansluitingen

In onderstaande tabel worden de luchtvolumestromen gegeven die per uur door 1 lopende meter aansluiting stromen bij een drukverschil van 50 Pa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Kader – muur	0.01	0.09	0.45	5.36	6.33	10.2	0.00	1.00	2.08	1.04
Muur – vloer	0.18	0.9	4.14	0.37	3.90	5.80	0.00	1.00	0.83	0.42
Muur – plafond	0.18	0.9	4.14	0.78	7.30	12.2	0.00	1.00	0.83	0.42
Muur – muur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Muur – dak	1.94	3.13	4.14	0.78	7.30	12.2	0.00	1.00	4.15	2.08
Nok/kil/noordboom	0.01	0.43	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.21

Tabel 64. “vergelijking lekkageverdeling aansluitingen”

4.3.3) Schrijnwerk

In onderstaande tabel worden de luchtvolumestromen gegeven voor verschillende ramen en deuren, uitgedrukt in m³ per lopende meter omtrek van opengaande delen per uur bij een drukverschil van 50 Pa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Binnendeuren	41.4	48.9	75.3	58.4	102.3	258.1	0.00	40.0	8.30	6.20
Buitendeuren met tochtstrip	3.09	10.2	31.6	1.1	1.5	2.2	0.00	10.0	8.30	6.20
Buitendeuren zonder tochtstrip	41.4	45.2	52.7	58.4	102.3	258.1	0.00	40.0	8.30	6.20
Raam, draaiend met tochtstrip	3.24	4.89	15.4	0.97	3.17	9.25	0.00	5.00	8.30	6.20
Raam, draaiend zonder tochtstrip	14.7	27.9	41.4	4.19	12.2	29.7	0.00	20.0	8.30	6.20
Raam, schuivend met tochtstrip	2.97	5.65	7.91	1.31	2.14	4.82	0.00	5.00	8.30	6.20
Raam, schuivend zonder tochtstrip	6.78	8.66	13.9	4.19	12.2	29.7	0.00	10.0	8.30	6.20

Tabel 65. “vergelijking lekkageverdeling schrijnwerk”

4.3.4) Andere

In onderstaande tabel worden de luchtvolumestromen gegevens voor een aantal specifieke lekken, in m³ per lek per uur bij een drukverschil van 50 Pa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Stopcontacten etc	5.93	7.00	7.90	2.43	12.2	30.2	0.00	1.00	0.00	0.00
Rolluikkasten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00
Open haard met klep gesloten	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.0	0.00	0.00
Doorvoer schouw	23.7	27.9	31.6	102.3	141.2	175.3	0.00	20.0	308	58.1

Tabel 66. “vergelijking lekkageverdeling andere”

4.4) Samenstellende schattingsmethode UGENT

Op basis van de analyse die we gemaakt hebben kunnen we nu een schattingsmethode opstellen die rekening houdt met de afzonderlijke lekkages door de verschillende gebouwcomponenten. Daarbij baseren we ons op de schattingsmethodes die het dichtst aanleunen bij de werkelijkheid en de vooropgestelde lekkageverdeling. We kiezen voor een systeem dat voor de meeste componenten een vaste waarde geeft, en voor bepaalde elementen de keuze laat tussen verschillende afwerkingniveaus. Zodoende blijft deze methode hanteerbaar in ontwerpfase, maar laat ze toch toe de uitvoeringskwaliteit van belangrijke elementen te specificeren.

4.4.1) Wanden, vloeren, plafonds

Bepleisterde wand	1.80 m ³ /(h.m ²)
Niet bepleisterde wand	3.50 m ³ /(h.m ²)
Betonnen wanden	1.50 m ³ /(h.m ²)
Houtskeletwand met scherm, gekleefd	0.80 m ³ /(h.m ²)
Houtskeletwand met scherm, geniet	4.00 m ³ /(h.m ²)

Hellend dak met dampscherm, gekleefd	0.80 m ³ /(h.m ²)
Hellend dak met dampscherm, geniet	4.00 m ³ /(h.m ²)
Hellend dak, geen aaneengesloten dampscherm	10.0 m ³ /(h.m ²)
Plat dak, hout, met dampscherm	0.80 m ³ /(h.m ²)
Betonnen vloer, betonnen dak	1.50 m ³ /(h.m ²)

Tabel 67. “lekkage componenten UGENT - wanden”

4.4.2) Aansluitingen

Kader – muur, voeg volledig opgevuld, zorgvuldig afgewerkt	1.00 m ³ /(h.m)
Kader – muur, onvolledige vulling of slordige afwerking	5.00 m ³ /(h.m)
Muur – vloer, muur - plafond	1.00 m ³ /(h.m)
Muur – dak, dampscherm dak luchtdicht aangesloten aan wand	2.00 m ³ /(h.m)
Muur – dak, normale afwerking	6.00 m ³ /(h.m)
Nok, kil, noordboom	0.50 m ³ /(h.m)

Tabel 68. “lekkage componenten UGENT - aansluitingen”

Bij alle aansluitingen die volledig uitgetekend worden voor een luchtdichte aansluiting wordt de luchtvolumestroom per lopende meter gelijkgesteld aan 0.50 m³/(h.m)

4.4.3) Schrijnwerk

Binnendeuren	60.0 m ³ /(h.m)
Buitendeuren met tochtstrip	10.0 m ³ /(h.m)
Buitendeuren zonder tochtstrip	50.0 m ³ /(h.m)
Raam, draaiend met tochtstrip	5.00 m ³ /(h.m)
Raam, draaiend zonder tochtstrip	25.0 m ³ /(h.m)
Raam, schuivend met tochtstrip	5.00 m ³ /(h.m)
Raam, schuivend zonder tochtstrip	10.0 m ³ /(h.m)

Tabel 69. “lekkage componenten UGENT - schrijnwerk”

Voor schrijnwerk met een speciale luchtdichte sluiting (bvb 5-puntssluiting) wordt de luchtvolumestroom gelijk gesteld aan 1 m³/(h.m) (klasse 3 en 4 volgens EN12207)

4.4.4) Andere

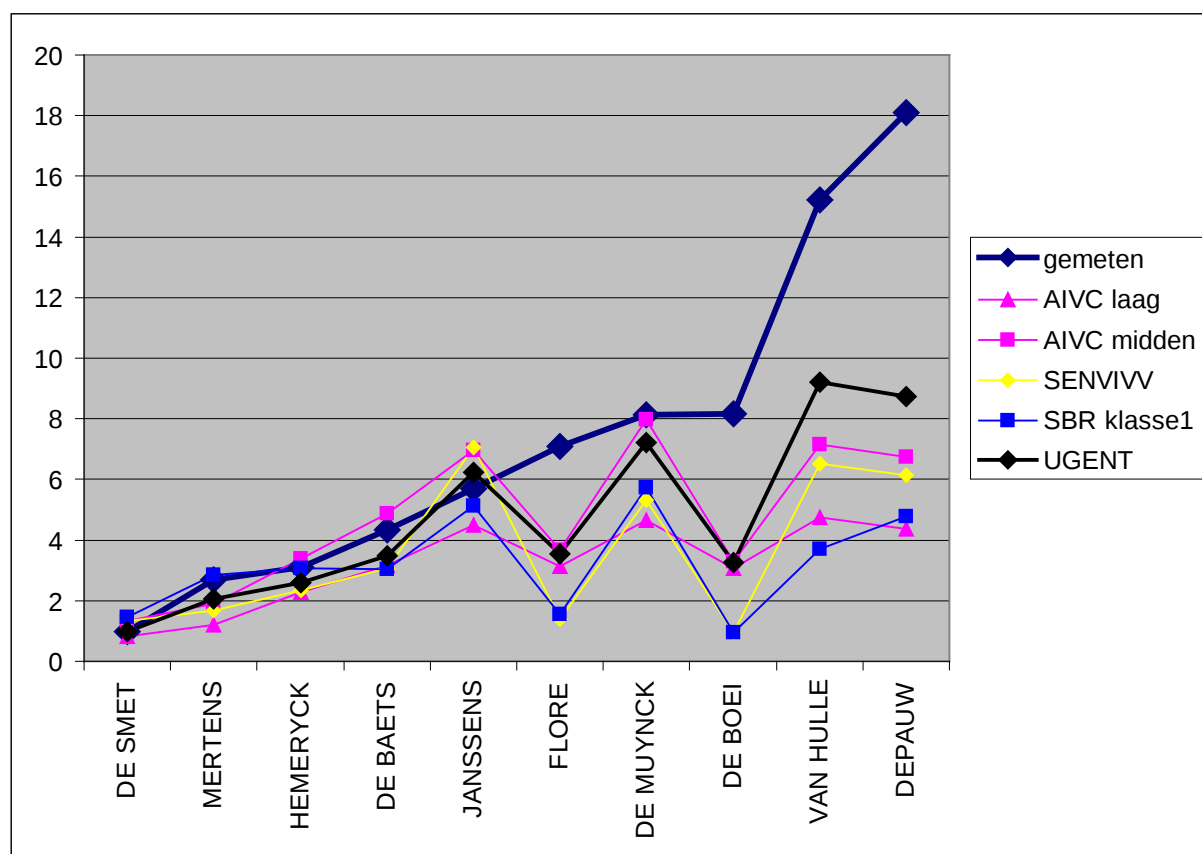
Doorboring pleisterwerk: schakelaar, stopcontact, kabel...	1.00 m³/h per stuk
Doorboring dampscherm: inbouwspots, schakelaars, balken	5.00 m³/h per stuk
Rolluikkast	1.00 m³/h per stuk
Dampkap met afsluiting	20.0 m³/h per stuk
Open haard, met klep gesloten	30.0 m³/h per stuk
Doorvoer schouw door dak	35.0 m³/h per stuk

Tabel 70. “lekkage componenten UGENT - andere”

Aansluitingen die met speciale vormstukken gemaakt worden, of aansluitingen die uitgetekend worden om een luchtdichte aansluiting te garanderen worden gerekend aan 0.50 m³/h per lopende meter.

4.4.5) Controle opgestelde schattingsmethode

De gemiddelde afwijking over de tien woningen is 28%, beter dan alle andere methodes die we getest hebben. De afwijkende metingen van de appartementen hebben we niet kunnen opvangen binnen ons model, verder onderzoek is hier nog nodig.



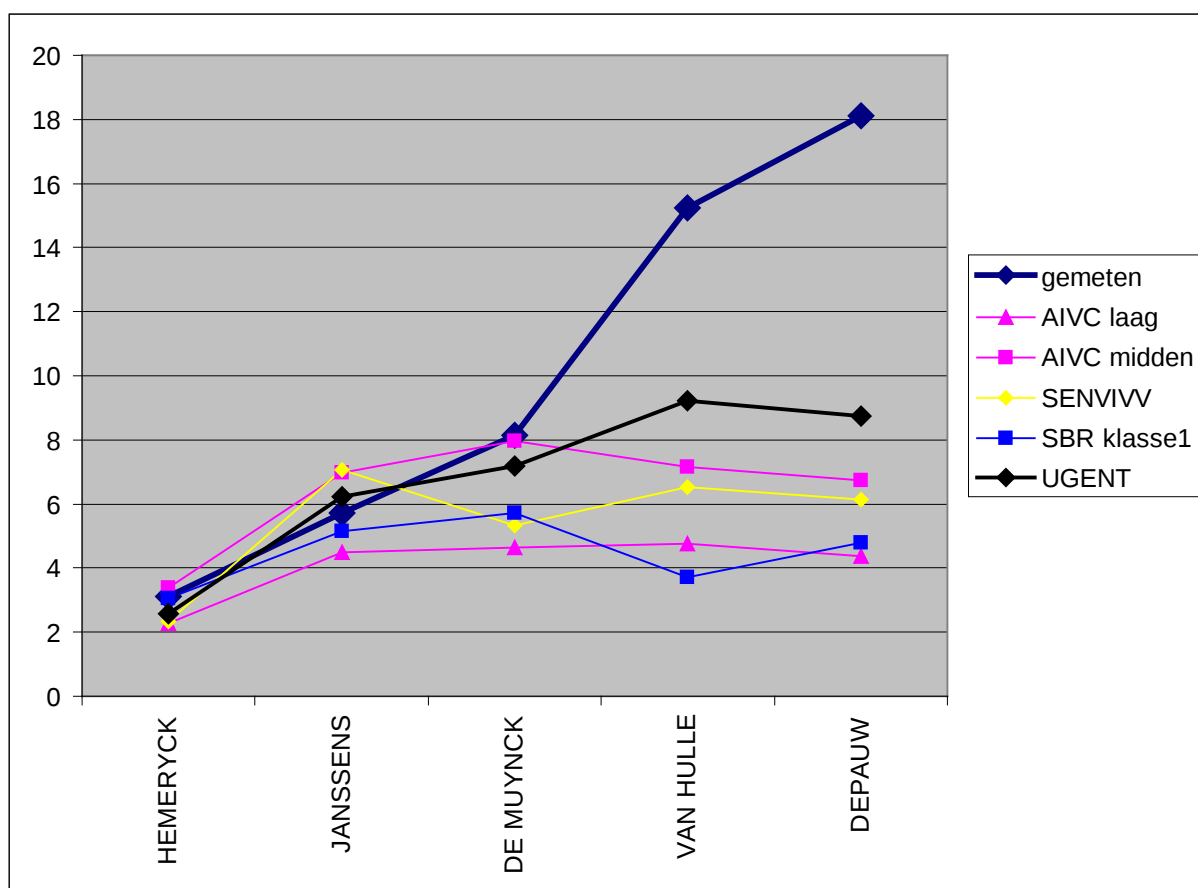
Figuur 51. “schattingsmethodes UGENT”

4.4.5.1 Open bebouwing

Als we enkel naar de open bebouwing volgens traditionele bouwmethodes kijken, dan is de gemiddelde afwijking 26%, beter dan alle andere methodes. Alleen voor de minder luchtdichte woningen is de afwijking nog te groot, tot 52%, hoewel dit de kleinste maximale afwijking is van alle schattingsmethodes.

<i>open bebouwing</i>	GEMETEN	UGENT	% AFW
HEMERYCK	3,1	2,58	17
JANSSENS	5,71	6,24	9
DE MUYNCK	8,13	7,20	11
VAN HULLE	15,23	9,22	39
DEPAUW	18,10	8,74	52

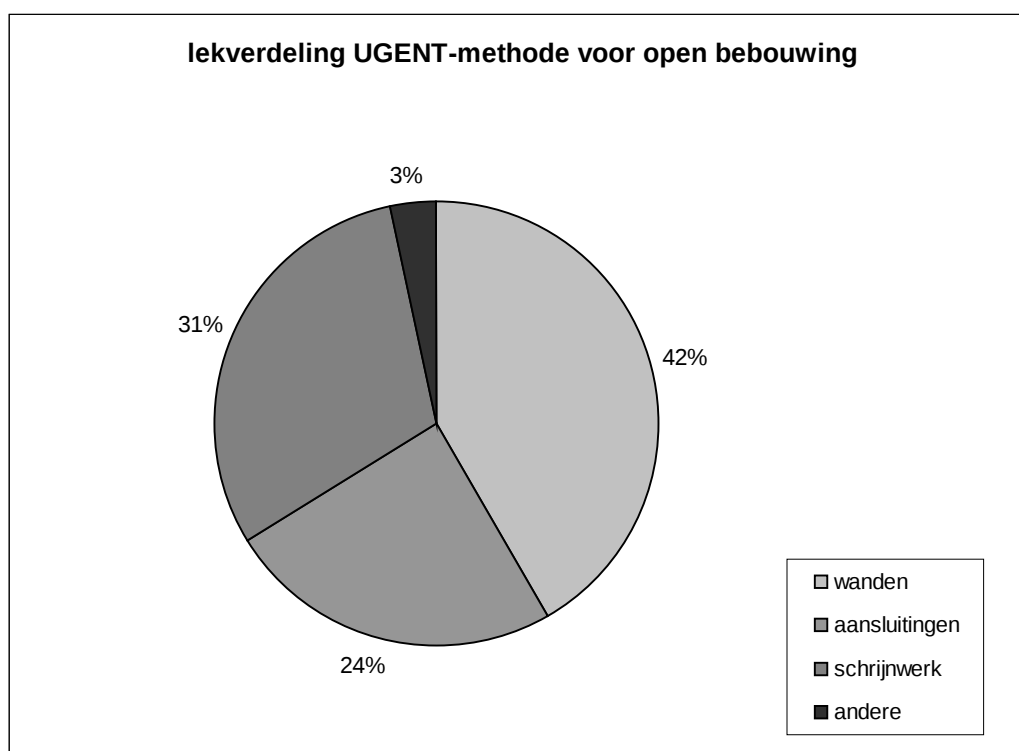
Tabel 71. “schattingsmethodes UGENT – open bebouwing”



Figuur 52. “schattingsmethodes UGENT – open bebouwing”

Als we kijken naar de lekverdeling die bekomen wordt volgens deze methode, zien we dat die vrij goed overeen komt met de vooropgestelde waardes (wanden 40%, aansluitingen 15%, schrijnwerk 30%, doorvoeren etc 15%). Aansluitingen en doorvoeren zijn eigenlijk dezelfde

soort lekken, dus we zouden deze verliezen ook samen kunnen rekenen waardoor de vooropgestelde waarden volledig zouden kloppen.



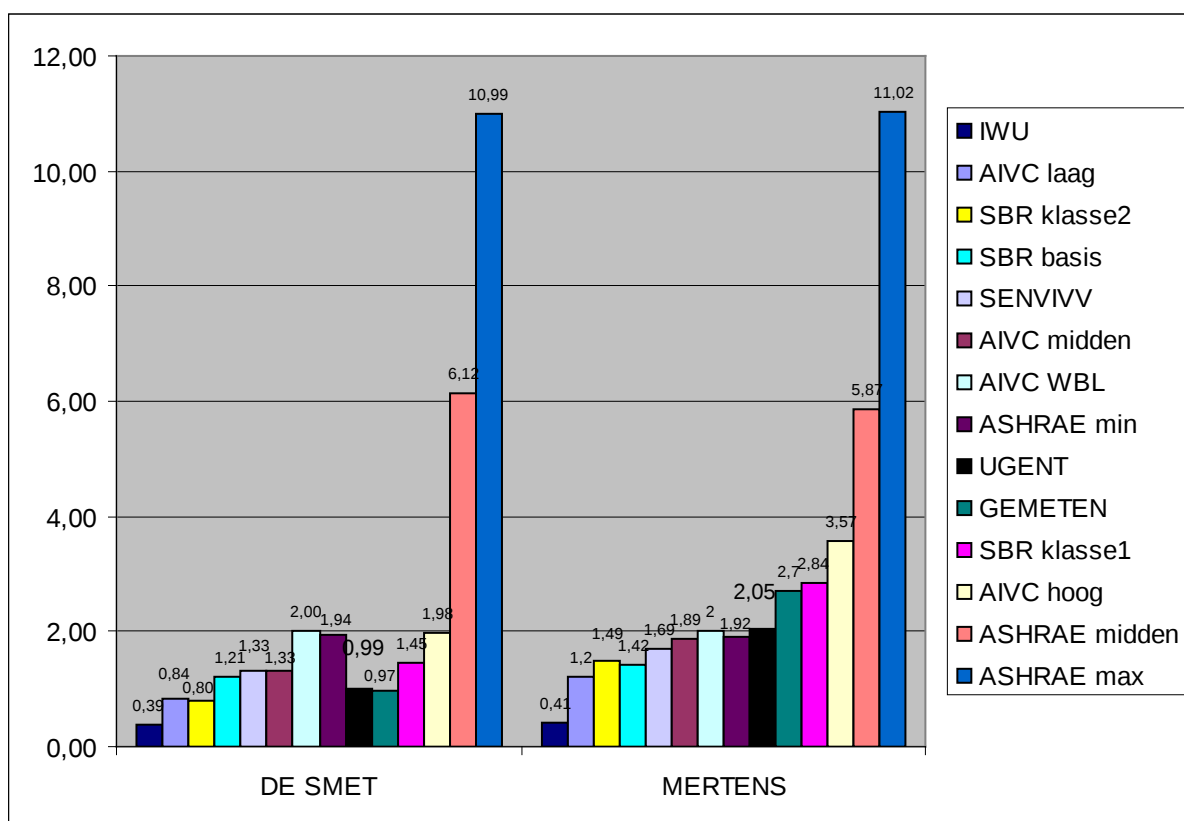
Figuur 53. “lekkageverdeling UGENT – open bebouwing”

4.4.5.2 Houtskeletbouw

Bij houtskeletbouw is de gemiddelde afwijking van deze methode 13%, duidelijk het beste resultaat van alle schattingsmethodes. Dit resultaat hebben we kunnen bekomen door enkele extra waarden op te nemen in de tabel specifiek voor zeer luchtdichte woningen. Deze zijn niet enkel geldig voor houtskeletbouw, maar ook voor massiefbouw, bvb bij woning Hemeryck.

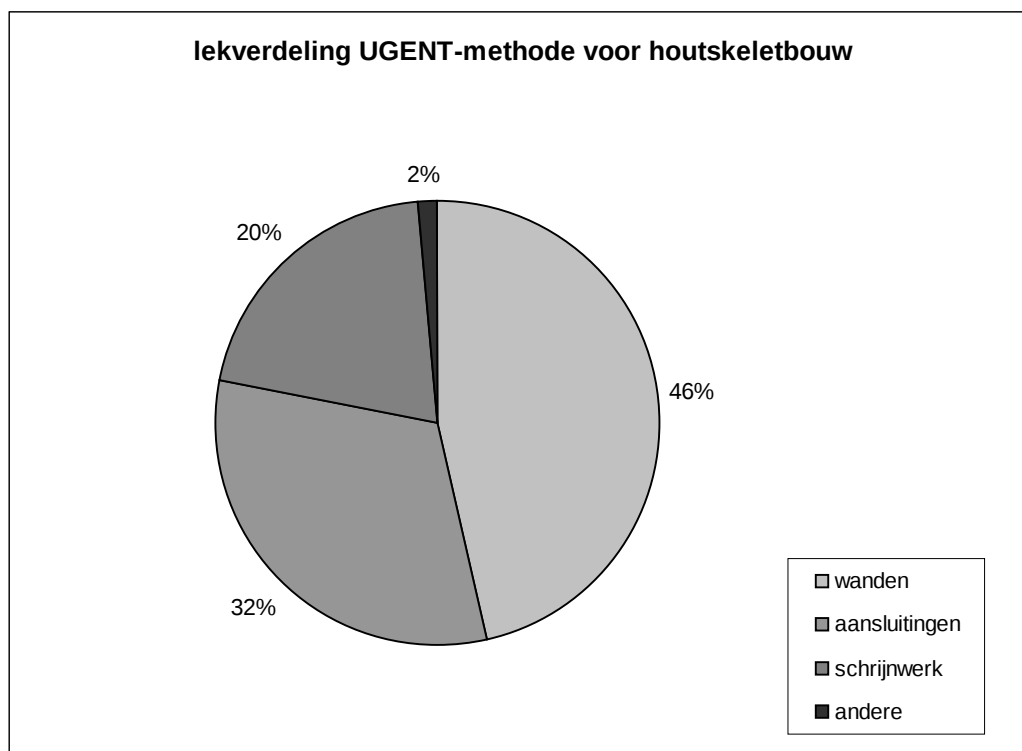
<i>houtskeletbouw</i>	GEMETEN	UGENT	% AFW
DE SMET	0,97	0,99	2
MERTENS	2,7	2,05	24

Tabel 72. “schattingsmethodes UGENT - houtskeletbouw”



Figuur 54. “schattingsmethodes UGENT - houtskeletbouw”

Bij houtskeletbouw klopt de bekomen lekverdeling zeer goed met de vooropgestelde waarden (wanden 40%, aansluitingen 30%, schrijnwerk 25%, andere 5%).



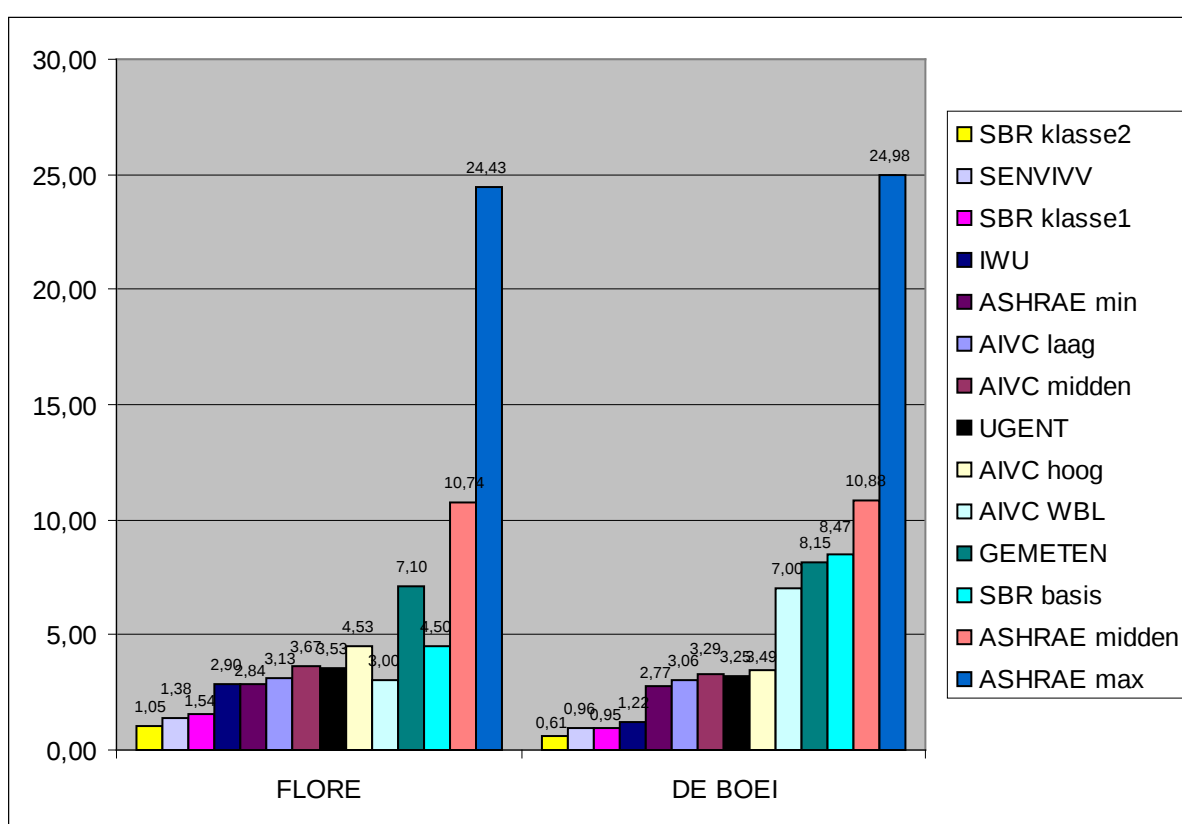
Figuur 55. “lekkageverdeling UGENT - houtskeletbouw”

4.4.5.3 Appartementen

Deze methode blijkt ook niet geschikt te zijn voor appartementen, want de gemiddelde afwijking is 55%. In de toekomst is er dus nog meer onderzoek nodig om de luchtdichtheid van appartementen op een betrouwbare manier te schatten. Hier zijn er ook slechts 2 appartementen doorgemeten.

<i>appartementen</i>	GEMETEN	UGENT	% AFW
FLORE	7,10	3,53	50
DE BOEI	8,15	3,25	60

Tabel 73. “schattingsmethodes UGENT - appartementen”



Figuur 56. “schattingsmethodes UGENT - appartementen”

Het heeft geen zin de lekverdeling te bespreken, omdat de methode niet correct genoeg is, en omdat we geen verdeling voorop gesteld hebben door een gebrek aan gegevens.

5) Lekken

5.1) Inleiding

Geen enkel gebouw is perfect luchtdicht (gelukkig maar), dus we kunnen in elke constructie een aantal grotere of kleinere lekken terugvinden. Deze zullen een bepalende invloed hebben op de algemene luchtdichtheid, maar bovendien zijn er een aantal plaatselijke effecten bij lekken die niet onbelangrijk zijn. Die secundaire effecten gaan we nu bespreken en relateren aan luchtdichtheid.

5.2) Opsporen van lekken^{[10] [33] [34] [36]}

5.2.1) Inleiding

Het kan in bepaalde gevallen zeer interessant zijn om de specifieke luchtlekken in een woning te lokaliseren. Tijdens de constructie van de woning kan er al een blowerdoor-test uitgevoerd worden zodat men de grootste fouten op het gebied van luchtdichtheid kan opsporen. In de bouwfase is er vaak nog de mogelijkheid verbeteringen aan te brengen omdat sommige constructieonderdelen nog toegankelijk zijn. Eens de woning afgewerkt is zijn verschillende aansluitingen niet meer visueel te controleren, en kunnen er moeilijk nog aanpassingen gemaakt worden. Eens men de grootste lekken gevonden heeft, kan men de gepaste maatregelen nemen om de algemene luchtdichtheid van het gebouw te verbeteren. Ook bij schadegevallen zal men soms een test doen om inzicht te krijgen in de fenomenen die aan de basis van het probleem liggen.

Het is niet altijd eenvoudig om een lek te lokaliseren. Een scheur in een luchtdichtheidsscherm of een openstaande voeg zal men wel opmerken, maar vaak zijn de gebreken niet zo duidelijk. Sommige onderdelen zijn al lang niet meer zichtbaar, en andere gebreken kan men gewoon niet waarnemen met het oog. Daarom zijn er verschillende technieken ontwikkeld om de lekken op te sporen. Soms is het niet nodig om ook de kleinste lekken op te sporen, want niet elk lek moet altijd behandeld worden. Er zijn verschillende technieken die de mogelijkheid bieden de lekkage op een bepaalde manier te kwantificeren om zo een onderlinge vergelijking mogelijk te maken. Afhankelijk van het streefdoel op

gebied van luchtdichtheid kan men dan beslissen welke lekken prioritair aandacht moeten krijgen.

Na een eerste testprocedure kunnen er verbeteringen aangebracht worden die de grootste problemen oplossen. Nadien kan eventueel nog een tweede test gedaan worden om de genomen maatregelen te evalueren. Dit is dan ook een goede indicatie voor de effectiviteit van de oplossingen.

5.2.2) Visueel

Gewoon door aandachtig te kijken kun je verschillende gebreken al ontdekken. Stukken muur die niet bepleisterd zijn, luchtdichtheidsschermen die gescheurd zijn, losgekomen aansluitingen, gaten rond doorvoeren... Elk constructieonderdeel is op een bepaald moment zichtbaar, dus kan elk onderdeel een bepaald moment gecontroleerd worden. Eén van de belangrijkste regels voor een goede uitvoering naar luchtdichtheid toe is dus een visuele controle op tijdstippen wanneer cruciale onderdelen geplaatst worden.

Vaak worden dingen over het hoofd gezien, of is er geen aandacht aan besteed tijdens de uitvoering. Verschillende technieken zijn ontwikkeld om de luchtdichtheid achteraf te controleren.

5.2.3) Manueel

Lekken worden meestal opgespoord tijdens een blowerdoor-proef. Op dat moment zal het debiet lucht door elk lek veel groter zijn dan onder normale omstandigheden, zodat deze sneller opgespoord worden. De effecten manifesteren zich het duidelijkst als het gebouw in onderdruk staat als het buiten kouder is dan binnen: dan wordt door de openingen koude lucht naar binnen gezogen. Deze luchtbeweging kan dan gevonden worden door met de hand te voelen, zeker als je hand nat is zal de luchtbeweging sneller opgemerkt worden (water onttrekt warmte door faseovergang bij verdamping). Verder wordt soms nog gebruik gemaakt van een pluimborstel of een kleine hoeveelheid licht stof dat als een rookwolkje rond openingen geblazen wordt. De luchtstroming zal het stof meevoeren, en door de beweging van de rookpluim wordt het lek verraden.



Figuur 57. “manueel lekken opsporen”



Figuur 58. “lekken opsporen met rook”

5.2.4) Thermoanemometer

Bij deze techniek wordt het gebouw met een blowerdoor in onderdruk geplaatst, zodat de koude lucht die binnentreedt gemeten kan worden met een thermoanemometer. Deze procedure is vooral effectief als het buiten minstens 10 graden kouder is dan binnen. Als het buiten warm en vochtig is zullen de metingen te veel verstoord worden. Er bestaan enkele types thermoanemometers, maar allen zijn gebaseerd op het principe van een sonde die aan de hand van afkoeling de luchtsnelheid kan berekenen. Vaak zal men niet elk mogelijk lek testen met dit toestel, omdat dit te veel tijd in beslag zou nemen. Men zal meestal de lekken die op een andere manier gevonden zijn testen met de thermoanemometer om in te schatten hoe belangrijk het lek is. [71]

Nochtans kan men uit de luchtsnelheid niet de stromingskarakteristieken van een opening afleiden. De hoeveelheid lucht die binnenstroomt is het product van de dwarsdoorsnede van de opening met de gemiddelde snelheid. Normaalgezien is geen enkel van de twee bekend, dus kan er geen correcte bepaling zijn van het eigenschappen van het lek. Toch is het een goede indicatie van het relatieve belang van een lek. Grote openingen zullen grotere windsnelheden toelaten dan fijne kieren en spleten. Daarbij moet men wel rekening houden met de geometrie van de opening. Een enkele perforatie waar de windsnelheid 2m/s is, weegt minder zwaar door dan een muur-vloer aansluiting over een lengte van 50m waar overal een windsnelheid gemeten wordt van 1m/s.

Bij het drukverschil van 50 Pa, en een theoretisch ideale opening kan de luchtsnelheid oplopen tot maximaal 9.1 m/s, bij normaal voorkomende openingen zal de snelheid zich meestal beperken tot 5 à 6 m/s. Als we kijken naar ongepleisterde poreuze betonblokken (ongeveer het minst winddichte materiaal voor wanden) zullen deze volgens het AIVC maximaal 72.4 m³/m²/h doorlaten. Omgerekend komt dit overeen met een luchtsnelheid van 0.02 m/s. Het meetbereik van de meeste thermoanemometers begint echter maar aan 0.03 of 0.05 m/s, bovendien geeft de meter maar 2 cijfers na de komma weer en is er een afwijking van 5% van de gemeten waarde: de luchtdichtheid van oppervlaktematerialen op zich kan dus niet gemeten worden. Het is wel nuttig voor de aansluitingen van of openingen in die materialen. Uit onderzoek blijkt ook dat zich daar de meeste problemen stellen, en het zijn ook die problemen die in een later stadium nog kunnen verholpen worden.

Meestal stelt men dat luchtsnelheden tot 0.15 m/s onvermijdelijk zijn bij normale aansluitingen in gebouwen. Als we dit zouden willen omrekenen naar volumestromen, moeten we de oppervlakte van de opening kennen, en dat is normaal niet het geval. De kritieke waarde om van een probleem te spreken zal dus ook afhangen van het streefdoel in verband met luchtdichtheid. Bij een passiefwoning waar men een n₅₀-waarde nastreeft van 0.6 h⁻¹ zal men natuurlijk andere criteria hanteren dan bij een normale woning waar men bvb n₅₀ gelijk aan 3.0h⁻¹ wil bereiken. Verder stelt men dat lekken met luchtsnelheden van 2 m/s of hoger zonder meer af te keuren zijn, ongeacht de algemene luchtdichtheid. Het meetbereik voor thermoanemometers die gebruikt worden voor luchtlekken op te sporen in gebouwen moet dus van 0 tot 2 m/s gaan.



Figuur 59. “thermoanemometer”

5.2.5) Rook

Bij deze methode zal men de woning in overdruk plaatsen met de blowerdoor, waardoor er binnenlucht door lekken naar buiten gedrukt wordt. Nu kan men een rookmachine plaatsen binnen, zodat ter plaatse van de lekken er aan de buitenzijde rook zal verschijnen. Bij ons ligt het luchtdichtheidsscherp meestal aan de binnenzijde van de constructie, zodat de plaats van het lek maar ‘ongeveer’ bepaald kan worden. In sommige gevallen is de weg die de rook moet afleggen te lang zodat het lek niet gelokaliseerd kan worden. Er moeten al vrij grote hoeveelheden lucht naar buiten gaan om de rook te kunnen opmerken, en als er veel wind is wordt dit nog moeilijker.

Met deze methoden kan men dus alleen echt grote lekken opsporen, en bovendien is deze techniek niet altijd mogelijk door bvb het dagelijks gebruik van het gebouw (men dient in voorkomend geval ook het branddetectiesysteem uit te schakelen).



Figuur 60. “rook in overdruk schrijnwerk” Figuur 61. “rook in overdruk dakrand”

5.2.6) Thermografie^{[37] [38] [39] [40] [41] [87]}

Deze onderzoeksmethode is gebaseerd op het principe dat elk lichaam elektromagnetische straling uitzendt, in functie van zijn oppervlaktetemperatuur. Deze straling is niet met het oog zichtbaar omdat de frequentie (0.8 tot 100µm) buiten het zichtbare spectrum valt, we noemen de straling dan ook infrarood of warmtestraling. Deze techniek kent verschillende toepassingen in de bouwwereld:

- koudebruggen opsporen
- lekken in leidingen lokaliseren (bvb bij vloerverwarming)
- vochtinsijpeling vaststellen
- verborgen elementen opsporen (vb beton of baksteen achter pleisterwerk?)
- opsporen van luchtlekken met een blowerdoor

Als we met behulp van een blowerdoor een onderdruk realiseren in het gebouw van 50 Pa, dan wordt koude buitenlucht (deze methode vereist een temperatuursverschil van 10°C) door de kieren naar binnen gezogen. Die luchtstroom zal twee effecten hebben: enerzijds zal de massa rond de opening afgekoeld worden door de doorstromende lucht, anderzijds daalt de luchttemperatuur van de ruimte, en zodoende zal ook de oppervlaktetemperatuur van de materialen dalen. Deze temperatuursverschillen kunnen dan geregistreerd worden met behulp van een infraroodcamera.

Thermografie wordt vaak toegepast om lekken op te sporen op plaatsen die moeilijk bereikbaar zijn. Bvb het dak van een sporthal is meestal meer dan 6m hoog, en kan bijna onmogelijk met manuele middelen gecontroleerd worden. Een rookgenerator gebruiken voor zo'n grote ruimte is praktisch onmogelijk omdat het vermogen van huidige rookgeneratoren praktisch veel te beperkt is.

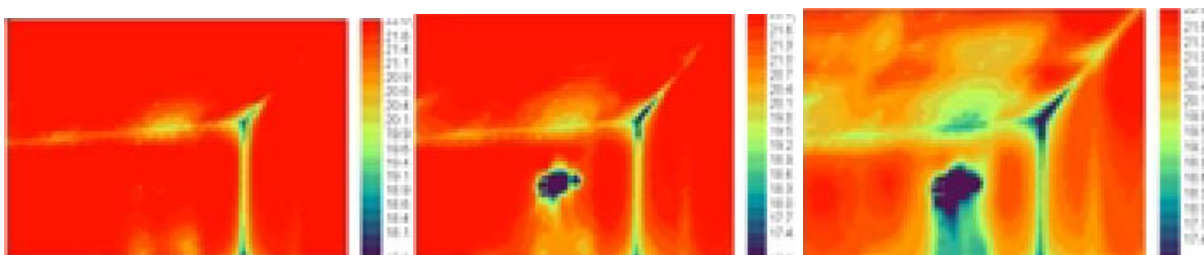
Op een enkel thermogram is het moeilijk onderscheid te maken tussen effecten van luchtlekkage en koudebruggen. Beiden komen ook voornamelijk voor bij aansluitingen, hoeken en onderbrekingen. Daarom worden meestal twee thermogrammen genomen van op dezelfde plaats, de eerste bij normale omstandigheden, de tweede als de woning een tijdje in onderdruk staat. Op de eerste foto kan dan het effect van de eventuele koudebruggen vastgesteld worden, en aan de hand van de tweede foto kunnen dan luchtlekken opgespoord worden. De eenvoudigste methode bestaat er in de oppervlaktetemperaturen van elkaar af te trekken, zodat de gevolgen van onderdruk geïsoleerd bekeken kunnen worden. De gemiddelde oppervlaktetemperatuur zal ook dalen ten gevolge van de koudere lucht die in de ruimte gezogen wordt. De thermogrammen moeten met een statief genomen worden, omdat vanuit een andere hoek iets andere oppervlaktetemperaturen waargenomen worden, en omdat de thermogrammen anders moeilijk van elkaar af te trekken zijn als ze niet hetzelfde kader hebben. Een periode van 15 à 20 minuten tussen de twee opnamen volstaat om een duidelijk beeld te hebben van de eventuele luchtstromen.

De volgende foto toont de aansluiting van twee wanden en een schuin dak (houtskeletbouw). In de linkse wand zijn er een aantal stopcontacten of schakelaars geplaatst.



Figuur 62. “hoek aansluiting: foto” [38]

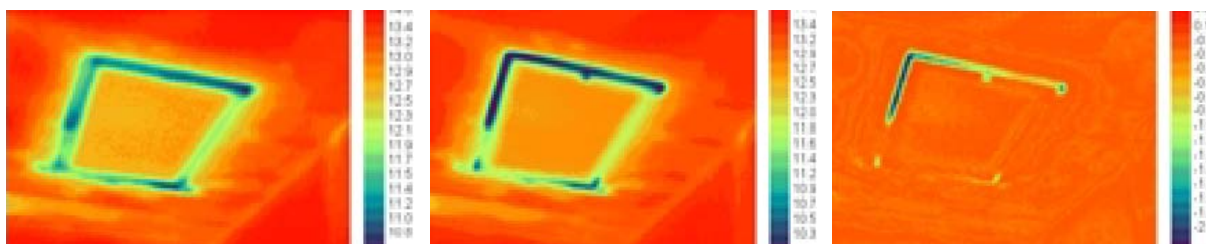
De verschillende thermogrammen tonen het temperatuursverloop door de tijd als er een onderdruk van 50 Pa is in het gebouw. De elektrische installatie is duidelijk een luchtlek in het dak. Na verloop van tijd koelen ook de hoeken van de gipskartonplaten af, maar dit is te wijten aan de achterloopse luchtstroming die zo naar de stopcontacten loopt. Bovendien is het bijna onvermijdelijk dat er in hoeken meer warmte verloren gaat door koudebrugwerking, omdat het verliesoppervlak aan de koude zijde veel groter is dan in een doorlopende wand. We kunnen wel zeggen dat de aansluiting van de platen onderling correct is uitgevoerd, zowel tussen de muren onderling, als tussen de muren en het dak.



Figuur 63. “hoek aansluiting: thermogrammen” [38]

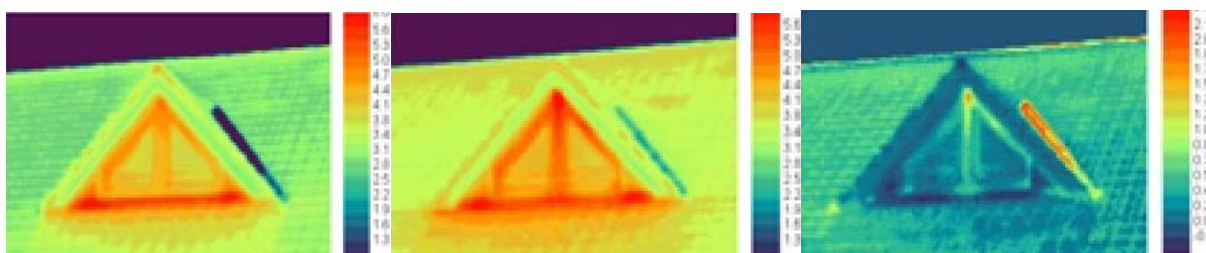
Bovendien kan men met deze techniek tegelijk ook koudebruggen opsporen. Zeker bij schadegevallen kan het interessant zijn deze techniek te gebruiken: dan kunnen zowel de afzonderlijke als het gecombineerd effect van koudebruggen en luchtlekken zichtbaar gemaakt worden.

Op de volgende reeks thermogrammen (figuur 64) heeft men een zolderluik onderzocht. Er is duidelijk een koudebrug aanwezig, want op het eerste thermogram -zonder onderdruk- ziet men al duidelijk de lagere oppervlaktetemperaturen aan de rand van het luik. Op het derde beeld, waar de eerste twee thermogrammen van elkaar afgetrokken zijn, zien we een kleine lucht lekkage aan de scharnieren achteraan het luik, en een duidelijk lek aan de voor- en zijkant.



Figuur 64. “zolderluik: thermogrammen” [38]

Het is ook mogelijk om het gebouw in overdruk te plaatsen en thermogrammen te nemen aan de buitenzijde, waar men dan de opwarming van de elementen kan waarnemen, zoals figuur 65). Normaalgezien wordt het luchtdichtheidsscherm (bepleistering, scherm) aan de binnenzijde van de constructie geplaatst. De exacte locatie van de lekken is moeilijker te bepalen, omdat de warme lucht al door bepaalde openingen gegaan is voor ze aan het buitenoppervlak komt. Ook de invloed van wind kan soms de waarnemingen verstoren. Deze techniek wordt dan ook relatief weinig toegepast. Op de volgende thermogrammen wordt het voorbeeld gegeven van een dakkapel. Er is een luchtlek bij de kilgoot van het rechter dakschild van de kapel.



Figuur 65. “dakkapel: thermogrammen” [38]

5.2.7) Drukproef

Er bestaan een aantal hulpmiddelen om specifieke elementen in situ te beproeven. Zo bestaan er meetapparaten om de correcte plaatsing van ramen te testen, bvb in Canada waar er specifieke normen van toepassing zijn die een voldoende luchtdichte aansluiting garanderen.

Ook om stopcontacten en lichtschakelaars op een eenvoudige manier te testen zijn er apparaten op de markt. Deze toestellen worden vooralsnog niet gebruikt in België.



Figuur 66. “drukproef op stopcontact”

5.2.8) Akoestische proef

Er bestaat ook een techniek om lekken op te sporen aan de hand van akoestische testen. De resultaten zijn echter moeilijk te interpreteren, zoals uiteengezet in hoofdstuk 6.

5.3) Lekkageverdeling

5.3.1) Frequentie

In de literatuur is er weinig informatie te vinden over het relatieve aandeel van gebouwcomponenten op het totale lekkagedebiet. In Duitsland zijn er gegevens bekend over de frequentie dat bepaalde lekken voorkomen in gebouwen[4] [8] [33] [36] [87] [88].

1) aansluiting wand / kader ramen en deuren	72%
2) gevels, dak, vloer	68%
3) ramen, vensterbank	46%
4) rolluiklint	81%
5) rolluikkast	37%
6) technische installaties	95%
7) aansluiting wanden / vloer	40%
8) aansluiting vensterbank / wand	39%
9) aansluiting plafond / wand	56%
10) penetratie van balken door scherm	89%
11) dampkap	71%
12) dakvenster	78%
13) zolderluik	79%
14) deur naar niet verwarmde zone	83%

Als men 100 gebouwen kiest zal men dus gemiddeld in 72 woningen zien dat de aansluiting tussen kader en wand onvoldoende luchtdicht is afgewerkt. Het is vrij moeilijk deze gegevens te vertalen naar de Vlaamse situatie. De Duitse bouwwijze is grondig verschillend van de onze, en zodoende zullen andere specifieke problemen naar voor treden. We dienen wel op te merken dat er in het algemeen in Duitsland meer aandacht wordt geschonken aan luchtdichtheid, dus waarschijnlijk kunnen dezelfde gegevens voor Vlaanderen enkel slechter uitvallen.

Anderzijds is deze frequentieverdeling ook niet zo belangrijk: het is niet omdat een bepaald lek veel voorkomt, dat er daarom meer aandacht naar moet gaan. In eerste instantie is het relatieve belang van een lek belangrijk, en niet de frequentie waarmee een type lek voorkomt. De aansluiting van de vensterbank met de wand is ‘slechts’ in 46% problematisch, maar moet

toch veel aandacht krijgen, omdat de lekken groot kunnen zijn, en omdat ze relatief eenvoudig te verhelpen zijn.

5.3.2) Aandeel garage en zolder in luchtlekkage

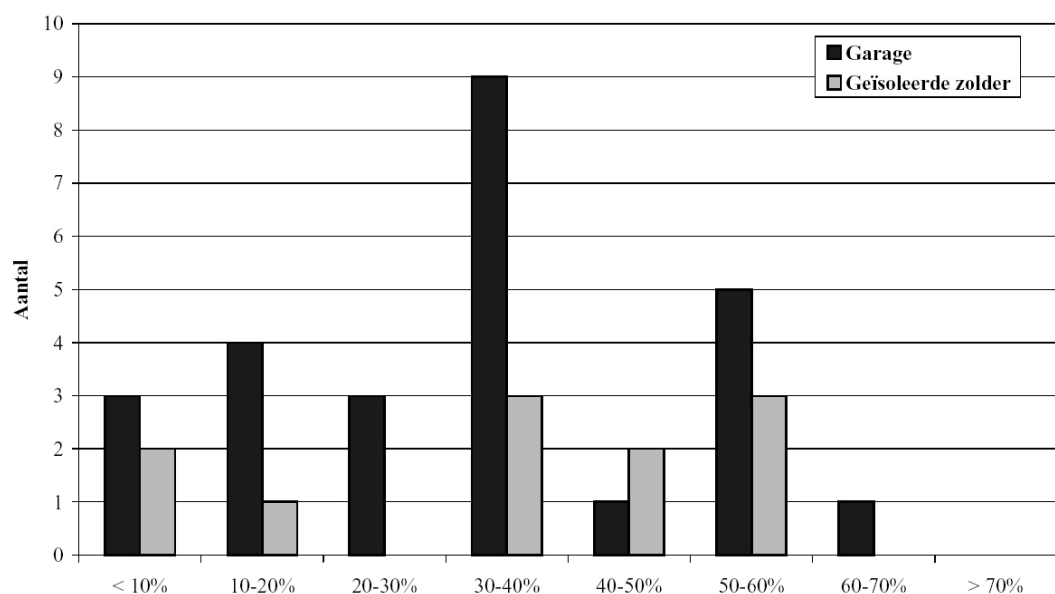
In de SENVIVV-studie [20] heeft men onderzoek gedaan naar het relatieve aandeel van lekken in de garage en de zolder van woningen. Bij die woningen waar er een garage in het beschermd volume van het gebouw zat blijkt het aandeel in luchtlekkage te variëren tussen 0 en 70%. Gemiddeld gaat bij die woningen bijna 33% van het totale luchtdebiet langs de garage naar buiten. Ergens is dit niet zo verwonderlijk, want garages worden zelden luchtdicht afgewerkt, in [24] NBN D50-001, 5.5.2 staat “voor garages met een vloeroppervlakte kleiner dan 40m² moeten verluchttingsmonden voorzien worden met een oppervlakte gelijk aan 0.2% van de vloeroppervlakte”. Voor 40m² komt dit overeen met 8 dm², en dit kan al snel een luchtlekkage veroorzaken van 150m³/h bij een drukverschil van 50Pa (theoretisch maximum 259m³/h). Dit is echter maar een fractie van de luchtlekkage die bij de proeven gemeten wordt. De luchtlekkage is dus veel groter dan nodig volgens NBN D50-001.

Een bijkomende verklaring hiervoor kan liggen in het feit dat veel garages niet gepleisterd zijn aan de binnenzijde, en 1m² onbepleisterd metselwerk kan 3 tot 6 m³ lucht per uur doorlaten bij een drukverschil van 50Pa. Bij een garage die twee buitenmuren heeft van 5m en 8m, 2.5m hoog, zorgt dit voor een lekkage van 100 tot 200m³/h. Bovendien zullen alle aansluitingen van de muren met andere componenten zeer slecht afgewerkt worden omdat er geen luchtdichtheidsscherm is om op aan te sluiten.

Anderzijds wordt bij de meting de deur naar de garage opengezet, en dit is in gebruikstoestand vaak niet het geval. Het kwantificeren van de luchtdichtheid van een woning is vooral interessant met betrekking tot de in- en exfiltratie, en de invloed op de energiehuishouding. Daarom zal het aandeel van de garage voor in- en exfiltratie van een woning onder normale meteorologische omstandigheden veel kleiner zijn dan de grafiek laat uitschijnen.

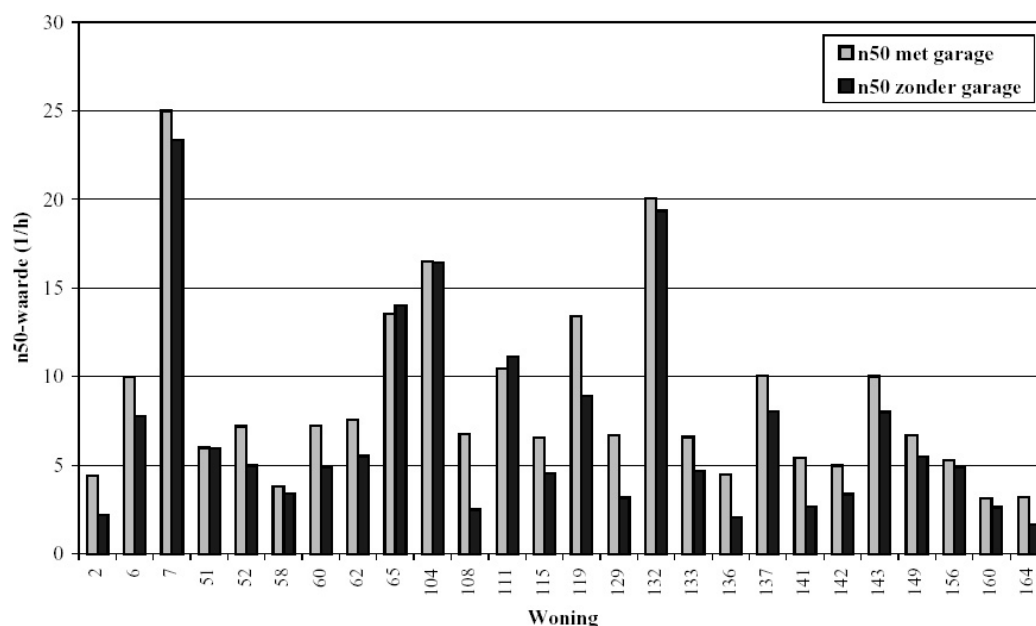
Een voorwaarde is wel dat de deur tussen de garage en de rest van de woning voldoende luchtdicht is [24], want een enkele binnendeur zonder tochtstrip laat toch ook al gauw 100m³/h door bij 50 Pa overdruk.

Indien er een geïsoleerde zolder aanwezig is varieert het relatieve aandeel ervan in luchtlekkage van 0 tot 60%, met een gemiddelde van 35%. Ook hier is het zo dat in gebruikstoestand de infiltratie kleiner zal zijn omdat meestal het zolderluik gesloten is. Een voorwaarde is dat het plafond onder de zolder dan wel luchtdicht afgewerkt is. Bovendien betreft dit slechts 11 woningen van de 51 doorgemeten woningen.



Figuur 67. “aandeel garage en zolder in luchtlekkage” [20]

Als de n₅₀-waarde van een woning opnieuw gemeten wordt zonder de luchtlekkage van de garage, en men houdt rekening met het verkleind binnenvolume krijgen we volgende vergelijkende grafiek.

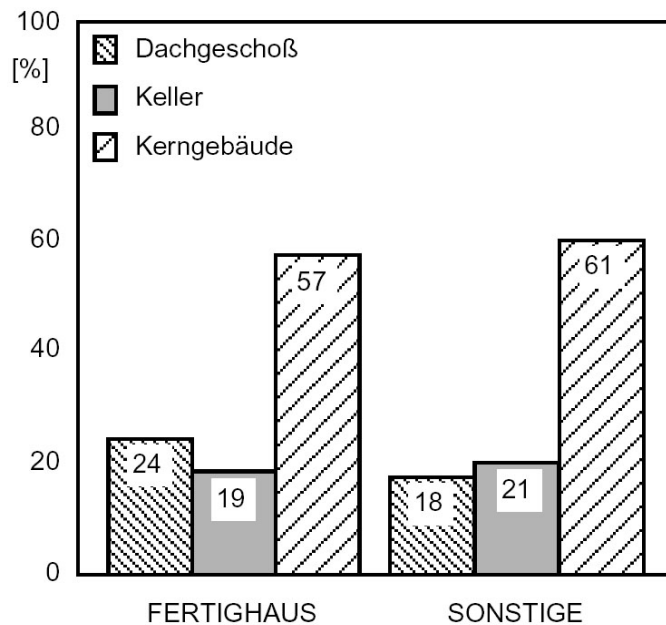


Figuur 68. “vergelijking n₅₀-waardes met en zonder garage” [20]

5.3.3) Aandeel kelder en zolder in luchtlekkage bij houtbouw

In Duitsland [88] is er een onderzoek gedaan op 26 prefabwoningen (fertighauser) en 16 andere woningen (sonstige) allen in houtskeletbouw, waarbij men gekeken heeft wat het relatieve aandeel is van de kelder, de zolder en de rest van het gebouw. Bij de normale woningen blijkt 18% van de luchtvolumestroom door het dak te gaan, 21% door de kelder, en 61% door de rest van het gebouw. Bij houtskeletbouw zal men in het algemeen een scherm plaatsen (of OSB-platen) aan de binnenzijde van de wand, zodat gemeten n₅₀-waarde lager ligt dan bij massiefbouw. Zodoende neemt het relatieve aandeel van de aansluitingen toe, en die bevinden zich aan de kelder en het dak natuurlijk.

De specifieke constructiemethode zorgt ervoor dat deze gegevens moeilijk te vergelijken zijn met de Vlaamse bouwwijze. Toch wijst het er op dat het belang van kelder en zolder niet onderschat moet worden.



Figuur 69. “aandeel kelder en zolder in luchtlekkage bij houtbouw” [88]

5.3.4) Aandeel vloer / wanden / dak

Volgens een studie van de Stichting BouwResearch [16] is de gemiddelde gemeten luchtvolumestroom in Nederlandse woningen bij een drukverschil van 50 Pa gedaald van 3198 m³/h in 1980 naar 984 m³/h in 1990. Bovendien heeft men ook onderzocht welke vlakken de grootste lekkage veroorzaken:

In 1980 was het totale lekdebiet gemiddeld 3198m³/h

55% (of 1759 m³/h) ging door het dak

30% (of 959 m³/h) ging door de vloer

15% (of 480 m³/h) ging door de wanden

In 1990 was het totale lekdebiet gemiddeld 984 m³/h

50% (of 492 m³/h) ging door het dak

30% (of 295 m³/h) ging door de vloer

20% (of 197 m³/h) ging door de wanden

Uit ons eigen onderzoek blijkt dat slechts 40% van alle verliezen effectief door de wand gaan, en de overige 60% door aansluitingen, doorboringen en schrijnwerk, waar men hier blijkbaar geen rekening mee houdt. Deze resultaten zijn dan ook een te gesimplificeerde voorstelling

van de werkelijkheid, die niet bijdraagt tot een betere strategie om luchtdichtheid te verwezenlijken binnen het bouwgebeuren. Meer informatie met betrekking tot de lekverdeling die uit het onderzoek is gekomen staat in hoofdstuk 4.

5.4) Invloed op thermische prestaties

5.4.1) Inleiding

Bij de berekening van het peil van globale warmte-isolatie volgens [22] NBN B62-301 maakt men gebruik van de U-waarden opgegeven door de fabrikanten, of de gedeclareerde waarden (terug te vinden in de appendix van NBN B62-301). Deze zijn allen gebaseerd op labometingen in ideale omstandigheden, waar elke externe invloed wordt geweerd. Voor de uiteindelijke energiehuishouding in een gebouw is de reële U-waarde van belang, want de ideale omstandigheden zijn nu ver weg. In dit hoofdstuk willen we kijken in hoeverre de luchtdichtheid invloed heeft op de werkelijk gemeten U-waarde van wanden en daken, en welke effecten een gebrek aan luchtdichtheid nog met zich kan meebrengen.

We moeten wel een onderscheid maken tussen verschillende soorten invloeden op de U-waarde. Kijken we naar een spouwmuur (buitenspouwblad, spouw, isolatie, binnenspouwblad, bepleistering) kunnen we een aantal fenomenen onderscheiden. Het eerste fenomeen doet zich voor bij de keuze tussen een gedeeltelijke en volledige spouwvulling, deze kan invloed hebben op de U-waarde: door een convectieve luchtstroming in de spouw wordt het buitenspouwblad thermisch kortgesloten. Door de hogere windsnelheden kan de warmteovergangscoefficiënt ook dalen en het isolerend vermogen verminderen. De luchtdichtheid wordt algemeen gerealiseerd aan de binnenzijde van de isolatie dus zal dit fenomeen een minimale impact hebben op de globale luchtdichtheid (dit is in het geval het buitenspouwblad niet bepleisterd is). Dit fenomeen noemen we verder het ‘spouweffect’.

Een tweede fenomeen is de luchtstroming achter de isolatie. Bij onnauwkeurige plaatsing van de isolatie kunnen er luchtstromen ontstaan tussen de achterzijde van de isolatie en het binnenspouwblad. Hierdoor wordt de isolatie kortgesloten en zal het isolerend vermogen van de wand drastisch naar beneden gaan. Naar luchtdichtheid toe is de isolatie geen bepalende factor, en de invloed van deze luchtstromen op de globale luchtdichtheid is dan ook te verwaarlozen. Dit fenomeen noemen we verder ‘achterloopse convectie’.

Het derde fenomeen is de luchtstroom door het binnenspouwblad en de bepleistering. Als er een luchtstroom mogelijk is vanuit de spouw of isolatie door de volledige wand zal die zowel de isolatie (geheel of gedeeltelijk) als het binnenspouwblad kortsluiten, met alle gevolgen van dien. Het bestaan van deze stroom hangt hoofdzakelijk af van de keuze van binnenspouwblad en de kwaliteit van de bepleistering, en zal een relatief grote impact hebben op de globale luchtdichtheid van het gebouw. Dit fenomeen noemen we wanddoorstroming.

Het enige fenomeen dat praktisch relevant is voor de globale luchtdichtheid is dus de wanddoorstroming, maar niettemin zijn het spouweffect als de achterloopse convectie gerelateerd aan de problematiek van luchtdichtheid en ongecontroleerde luchtstromen. Bovendien is de invloed ervan te belangrijk om hier te negeren, en zullen deze gegevens later nuttig blijken om bepaalde keuzes te verantwoorden.

De gevolgen van temperatuursdalingen voor condensatie worden in 5.5 besproken.

5.4.2) VLIET-project

5.4.2.1 Inleiding

In het kader van het VLIET-programma (Vlaams Impulsprogramma voor Energie Technologie) zijn er door de K.U.Leuven tal van onderzoeken gedaan op wanden en daken in het VLIET-proefgebouw [44] [45] [46]. Gedurende een lange periode werd het thermisch en hygroscopisch gedrag van sterk geïsoleerde muren en daken gemeten en geëvalueerd. (bij de testcomponenten werd gestreefd naar een U-waarde gelijk aan $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$) Bij de bespreking van de resultaten moeten we er dus rekening mee houden dat deze enkel gelden bij grote isolatiediktes, en niet zonder meer geëxtrapoleerd kunnen worden naar andere omstandigheden.

5.4.2.2 Muren

Er zijn zes wandtypes vooropgesteld om te beproeven:

- Type 01: gevelsteen 9cm, vingerspouw (1 à 2 cm), 14 cm glaswolisolatie (slecht geplaatst), betonsteen 14cm
- Type 02: gevelsteen 9cm, vingerspouw (1 à 2 cm), 14 cm glaswolisolatie (goed geplaatst), snelbouw baksteen 14cm

- Type 03: gevelsteen 9cm, geventileerde luchtsponw 5cm, 10 cm XPS (slecht geplaatst), betonsteen 14cm
- Type 04: gevelsteen 9cm, geventileerde luchtsponw 5cm, 10 cm XPS (goed geplaatst), snelbouw baksteen 14cm
- Type 05: gevelsteen 9cm, vingersponw (1 à 2 cm), 10 cm XPS (slecht geplaatst), betonsteen 14cm
- Type 06: gevelsteen 9cm, vingersponw (1 à 2 cm), 10 cm XPS (goed geplaatst), snelbouw baksteen 14cm

De wanden zijn gedurende twee winters beproefd ('96-'97 en '97-'98) en de resultaten kunnen samenvattend als volgt weergegeven worden:

WANDTYPE	NOORDOOST	ZUIDWEST	THEORIE
	$R [m^2.K/W]$	$R [m^2.K/W]$	$R [m^2.K/W]$
Type01: glaswol,slechte plaatsing,gn spouw	3.0	2.4	4.4
Type02: glaswol, goede plaatsing,gn spouw	4.7	4.6	4.6
Type03: XPS,slechte plaatsing, spouw	1.0	1.0	4.2
Type04: XPS, goede plaatsing, spouw	4.7	4.1	4.4
Type05: XPS, slechte plaatsing, gn spouw	1.1	1.6	4.3
Type06: XPS, goede plaatsing, gn spouw	4.4	4.4	4.5

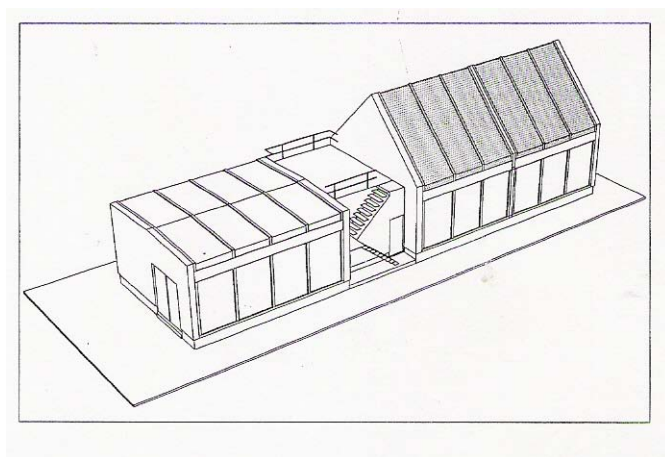
Tabel 74. “warmteweerstand wanden in functie van plaatsingskwaliteit”

We kunnen hieruit enkele conclusies trekken:

Het spouweffect heeft een duidelijke invloed: wanden die enkel een vingersponw hebben blijken gemiddeld beter te isoleren. De gemeten waardes komen bij goede plaatsing ook redelijk overeen met de theoretische berekeningen.

Ook de verschillen tussen goed geplaatste en slecht geplaatste isolatie is opmerkelijk. Vooral bij XPS is het verschil groot, omdat de stijve platen weinig toleranties bieden voor uitvoeringsfouten op te vangen. In de typewanden is de goede plaatsing echter altijd gebeurd bij wanden in snelbouwsteen, en de slechte plaatsing bij wanden in betonblokken.

Luchtdichtheidsproeven wijzen uit dat de muur in snelbouwsteen veel luchtdichter is dan die in betonblokken. De minder goede thermische prestaties van bepaalde wanden is dus het gecombineerd effect van slechte plaatsing en gebrek aan luchtdichtheid. Om meer uitsluitsel te krijgen over de afzonderlijke invloeden van achterloopse convectie en wanddoorstroming heeft men de wanden nadien aan de binnenzijde voorzien van een luchtschermfolie. Hierdoor kan men de invloed van luchtdichting beter inschatten.



Figuur 70. “VLIET-proefgebouw” [46]



Figuur 71. “proefopstelling wand” [20]

We kunnen nu de resultaten met en zonder luchtscherf vergelijken voor de wanden aan de noordoost zijde:

WANDTYPE	ZONDER LUCHTSCHERM	MET LUCHTSCHERM
	$R [m^2.K/W]$	$R [m^2.K/W]$
Type01: glaswol,slechte plaatsing,geen spouw	2.9	2.7
Type02: glaswol, goede plaatsing,geen spouw	4.5	4.3
Type03: XPS,slechte plaatsing, spouw	1.0	0.8
Type04: XPS, goede plaatsing, spouw	4.7	4.5
Type05: XPS, slechte plaatsing, geen spouw	1.1	0.9
Type06: XPS, goede plaatsing, geen spouw	4.4	4.3

Tabel 75. “warmteweerstand wanden in functie van plaatsingskwaliteit & luchtscherf”

Uit de resultaten blijkt dat de wanden waarbij een luchtscherf is aangebracht minder goed isoleren als dezelfde wand zonder luchtscherf, wat eigenlijk niet kan. De metingen met luchtscherf zijn gedaan in warmere omstandigheden dan die zonder luchtscherf. Het feit dat de warmteweerstand gemiddeld met $0.2 \text{ m}^2\text{K/W}$ daalt is enkel een gevolg van de temperatuursafhankelijkheid van de meettoestellen en de lambda-waarde. Blijft de opmerkelijke vaststelling dat luchtdichtheid nagenoeg geen invloed heeft op de warmteweerstand. De lage waarden bij slechte plaatsing van de isolatie zijn dus volledig het gevolg van achterloopse convectie. Deze vaststelling kunnen we veralgemenen naar alle spouwmuuren, ongeacht de isolatiedikte.

We dienen nog op te merken dat bij deze proeven geen enkele doorboring aanwezig was in het pleisterwerk. Ter plaatse van stopcontacten, aansluitingen en doorvoeren is het dus best mogelijk dat wanddoorstroming de thermische prestaties plaatselijk vermindert.

5.4.2.3 Daken

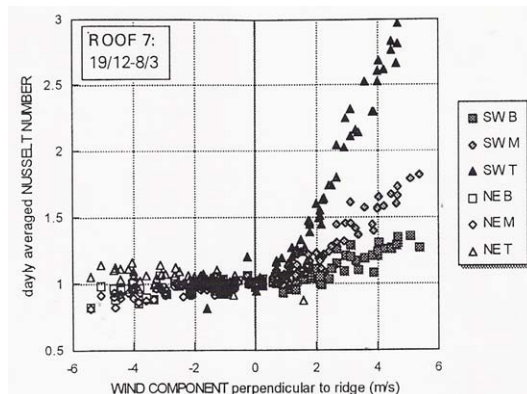
We bespreken hier vier types van hellende daken:

- | | |
|----------|--|
| Type 01: | betonpannen, onderdakfolie, 14cm glaswolisolatie tss kepers,
5cm glaswolisolatie tussen horizontale latten, geschilderd gipskarton |
| Type 02: | betonpannen, onderdakfolie, 14cm glaswolisolatie tss kepers, PE-folie
5cm glaswolisolatie tussen horizontale latten, geschilderd gipskarton |
| Type 03: | betonpannen, onderdakfolie, 5cm geventileerde spouwruimte,
14cm glaswolisolatie tussen kepers, 5cm glaswolisolatie tussen
horizontale latten, geschilderd gipskarton |
| Type 04: | betonpannen, onderdakfolie, 5cm geventileerde spouwruimte,
14cm glaswolisolatie tussen kepers, PE-folie, 5cm glaswolisolatie
tussen horizontale latten, geschilderd gipskarton |

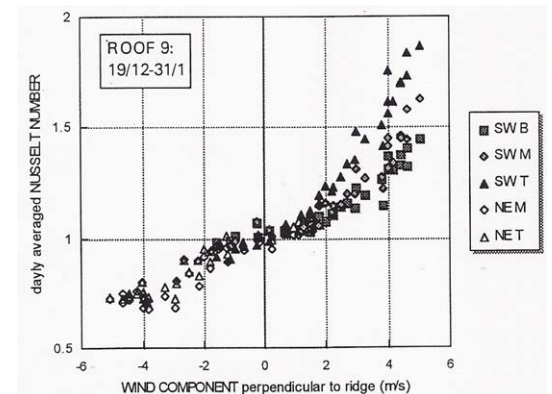
Types 01 en 02 zijn dus compacte daken, types 03 en 04 worden geventileerde daken genoemd. Om de windinvloed op de warmtetransmissie te onderzoeken maakt men gebruik van het dimensieloos getal van Nusselt:

$$Nu(v) = \frac{R_0}{R_{1D,M}(v)} \quad \text{met } R_0 = R_{1D,M}(v < 0.5 \text{ m/s})$$

Dit getal vertelt ons dus hoe de gemeten warmteweerstand zich verhoudt tot die bij windstille omstandigheden (R_0). Als de warmteweerstand daalt, zal die kleiner worden dan R_0 , en zal het Nusseltgetal groter worden dan 1. Stijgt de warmteweerstand, wordt het Nusseltgetal kleiner dan 1.



Figuur 72. “Nusseltgetal in functie van windsnelheid voor een dak type 03” (links)



Figuur 73. “Nusseltgetal in functie van windsnelheid voor een dak type 01” (rechts)

Figuur 72 toont het verband tussen het Nusselt-getal en de windsnelheid voor een dak type 03: geventileerd en geen PE-folie. Bij overdruk is er een duidelijk verband: de warmteweerstand van het dak is omgekeerd evenredig met de windsnelheid.

Figuur 73 toont het verband tussen het Nusselt-getal en de windsnelheid voor een dak type 01: compact en geen PE-folie. Ook hier is het verband bij overdruk duidelijk, maar het Nusselt-getal is minder hoog door het ontbreken van een geventileerde ruimte boven de isolatie. Als er buitenlucht stroomt onder het onderdak daalt de warmteweerstand dus duidelijk.

Bij onderdruk lijkt de warmteweerstand te stijgen, een soort warmteterugwineffect. Dit is afkomstig van luchtcirculatie tussen de twee dakschilden onderling. Lucht die aan de lijzijde in de isolatie zit wordt door de overdruk aan die zijde naar het dakschild aan de loefzijde geperst, waar er onderdruk heerst. Dit effect doet zich niet voor bij een geventileerd dak, omdat de lucht minder stromingsweerstand ondervindt als het aan de nok gewoon de spouw verlaat (wat niet mogelijk is bij een compact dak).

DAKTYPE		NOORDOOST		ZUIDWEST	
		R_0 $m^2.K/W$	Bij ZW-wind 4.0 m/s	R_0 $m^2.K/W$	Bij ZW-wind 4.0 m/s
Type 01:	O			5.0	128%
Compact zonder PE	M	5.2	73%	4.8	137%
	B	5.6	75%	6.0	159%
Type 02: compact met PE-folie		5.6	102%	4.9	92%
Type 03:	O	5.4	95%	5.3	122%
Geventileerd zonder PE-folie	M	4.8	92%	5.1	155%
	B	5.2	106%	4.9	252%
Type 04: geventileerd met PE		5.3	99%	4.5	106%

Tabel 76. “warmteweerstand Onderaan, Midden en Bovenaan het dak en de relatieve invloed van wind op de warmteweerstand op die plaatsen”

Net zoals bij de wanden kunnen we de drie effecten onderscheiden: spouweffect, achterloopse convectie en dakdoorstroming. Het spouweffect zien we zoals gezegd duidelijk in de grafieken, waar geventileerde daken minder goed isoleren. De aanwezigheid van de PE-folie tussen de twee isolatielagen verhoogt de warmteweerstand bij wind aanzienlijk. De meest logische verklaring zou zijn dat dit het gevolg is van een verhoogde luchtdichtheid. Om meer zekerheid te bekomen heeft men bijkomende proeven uitgevoerd met tracergas. Daaruit blijkt echter dat de luchtdichtheid niet significant verbetert door de PE-folie. De PE-folie beschermt enkel de onderste 5cm glaswol, die dus niet onderworpen wordt aan achterloopse convectie, en dit verklaart de verhoogde warmteweerstand. Uit het tweede jaarrapport van de VLIET-studie blijkt dit verschil 8% te bedragen. Verder vinden we in hetzelfde rapport nog dat het schil tussen een geventileerd dak met PE-folie en een compact dak met PE-folie 7% bedraagt. Zonder PE-folies bedraagt het verschil tussen een compact en een geventileerd dak 17%, bij ventilatie zal de achterloopse convectie natuurlijk groter zijn.

De luchtdichtheid aan de binnenzijde van de isolatie is volgens deze studie dus niet bepalend voor de algemene warmteweerstand. We moeten er wel rekening mee houden dat er bij de

uitvoering veel aandacht gegaan is naar een goede uitvoering van de luchtdichtheid. Er is dus enkel getest wat het verschil voor de warmteweerstand is tussen een goede en een zeer goede luchtdichtheid. Bovendien waren er geen specifieke aansluitingen en randen die bij normale daken wel voorkomen: deze zijn verantwoordelijk voor een groot deel van de in- en exfiltratie. Volgens de SENVIVV-studie laat de algemene luchtdichtheid van daken van woningen in Vlaanderen te wensen over. Verder onderzoek op minder ideale uitvoeringen is dus zeker nog nodig.

5.5) Invloed op vochthuishouding

5.5.1) Inleiding

Vaak komt vochthuishouding pas aan de orde als er sprake is van schade. De aanwezigheid van vochtplekken en schimmels geven te kennen dat er iets goed fout zit. Lange tijd heeft men gedacht dat dampdiffusie de enige belangrijke factor was voor damptransport die bouwkundige implicaties met zich meebracht. In Canada was Hutcheon er in '54 [47] al van overtuigd dat dampdiffusie alleen niet voldoende was om de opeenstapeling van vocht in sommige constructies te verklaren. Na onderzoek werd duidelijk dat convectief vochttransport veel grotere hoeveelheden water met zich kon meebrengen dan diffusie.

Het grootste probleem bij een schadegeval is natuurlijk dat dit moeilijk op te sporen is: is vocht afkomstig van condensatie door interne productie, convectief vochttransport, dampdiffusie of van een lek? Enkel gericht onderzoek kan sluitende resultaten geven over de potentiële risico's ten gevolge van luchtlekken, en welke criteria gebruikt moeten worden om dit te vermijden.

5.5.2) VLIET-project[44] [45]

In de VLIET-studie is er weinig aandacht uitgegaan naar convectief vochttransport. De enige proeven die uitgevoerd zijn hadden betrekking op een koud dak, waar men een opening van 47mm heeft gemaakt in het luchtscherm en de binnenbekleding. Uit de resultaten bleek dat de invloed van de binnenomgeving op de vochtbalans 1.5 à 2 keer groter was dan in het luchtdichte dak. Verder lezen we in het verslag: "Ook het belang van condensatie is 2 tot 3 keer groter: het gevolg van condensatie van exfiltrerende waterdamp tegen het onderdak?". Er

zijn dus indicaties dat luchtlekkage een grote invloed kan hebben op vochtgedrag, maar het onderzoek is te beperkt om hier conclusies uit te trekken.

5.5.3) Diffusie – convectie^[47] ^[48]

5.5.3.1 Inleiding

Dampdiffusie is een gekend fenomeen dat kan leiden tot condensatie^[49] ^[50]. Diffusie is niet afhankelijk van drukverschillen: het is een chemisch evenwichtsproces dat enkel gestuurd wordt door de verhouding van absolute dampdrukken. Daarom is het ook een vrij continu proces: jaarlijks kan er telkens een kleine hoeveelheid water opstapelen, en pas na verloop van tijd zal dit zich manifesteren in een schadegeval. Een statische berekening ligt dan ook aan de basis van de risico-evaluatie. Convectief damptransport kan veel grotere hoeveelheden water transporteren. Dit water is afkomstig van de binnenomgeving en komt bij een koud oppervlak waar de dauwpuntstemperatuur onder de luchttemperatuur ligt. Deze convectie kan verschillende oorzaken hebben.

Als condensatie effectief tot een schadegeval leidt is meestal ook afhankelijk van de opbouw van een wand of dak. Hoeveel condenswater een constructie zonder problemen kan opnemen hangt onder meer af van de capaciteit van materialen om vocht te bufferen zonder lekkage. Er is geen eenduidige bepaling van die hoeveelheden bekend. Verdere verdieping in deze problematiek zou ons te ver leiden.

5.5.3.2 Oorzaken convectie^[14] ^[19] ^[53] ^[54]

Het kan louter toevallig zijn dat een bepaalde turbulente luchtstroom juist op de plaats van een lek een constructie binnentreedt. Het is weinig waarschijnlijk dat dit grote condensatiehoeveelheden zou kunnen veroorzaken: de stroming is niet sterk genoeg om een constante stroom te genereren die vocht naar het condensatieoppervlak brengt. Door het tijdelijk karakter zal droging het condensaat tijdig doen verdampen^[16].

Een tweede mogelijkheid is de natuurlijke convectie: warme lucht stijgt en koude lucht daalt door het verschil in massadichtheid. Dit kan een constante druk zijn, waardoor er te weinig droging van de constructie is. Volgens het ASHRAE-handboek kunnen we schatten dat er per meter hoogte, en per graad verschil 0.04 Pa drukverschil is, zonder stromingsweerstand in rekening te brengen. Bij een gebouw van 10m hoog en bij een temperatuursverschil van 5

graden is er dus een drukverschil van 2 Pa. In bepaalde gevallen kan het drukverschil nog veel groter zijn, vooral in koudere klimaten. Dit drukverschil zal zich zowel boven als onder de neutrale lijn manifesteren. Bovenaan het gebouw zal er overdruk zijn, die exfiltratie en condensatie tot gevolg kan hebben.

Een derde mogelijkheid is de onderdruk op een bepaald constructiedeel, waardoor er lucht van de binnenruimte door de scheidingswand gezogen wordt. Dit is onder invloed van winddrukken op gebouwen: aan de lijzijde creëert de windzuiging een onderdruk op de constructie. Ook hier is het al dan niet statisch karakter van belang om het risico in te schatten. Twee situaties kunnen een statisch karakter geven: een dominante windrichting, of een bepaalde omgeving die door beschutting meestal onderdrukken veroorzaakt op een gedeelte van het gebouw. Dan nog moet men rekenen met de gemiddelde windsnelheden, en niet met pieksnelheden, waardoor de invloed minder groot zal worden. Toevallige overdruk op diezelfde constructie zal op zijn beurt een drogend effect hebben. Het risico op condensatie door winddrukken zal niet zo groot zijn, maar door gecombineerde effecten zal in voorkomend geval condensatie sneller optreden op plaatsen waar er overwegend onderdruk op het gebouw is.

Een laatste mogelijkheid is een overdruk die permanent gecreëerd wordt door een HVAC-installatie[52]. In het algemeen zal men proberen vermijden overdrukken te creëren in een gebouw juist om geen condensatie te veroorzaken. Een tweede belangrijke factor bij HVAC-systemen is de relatieve vochtigheid: de extractie zal normaal in de vochtige ruimtes gebeuren als die er zijn. Bvb in woningen zal men extractie voorzien in keuken en badkamer, en verse lucht in slaapkamers en woonruimtes toevoeren, om te vermijden dat vochtige lucht in de constructie terecht komt. Toch is het altijd mogelijk dat de afregeling niet goed is, infiltratie de voorziene luchtstromen verstoort of een lichte overdruk om praktische redenen noodzakelijk is.

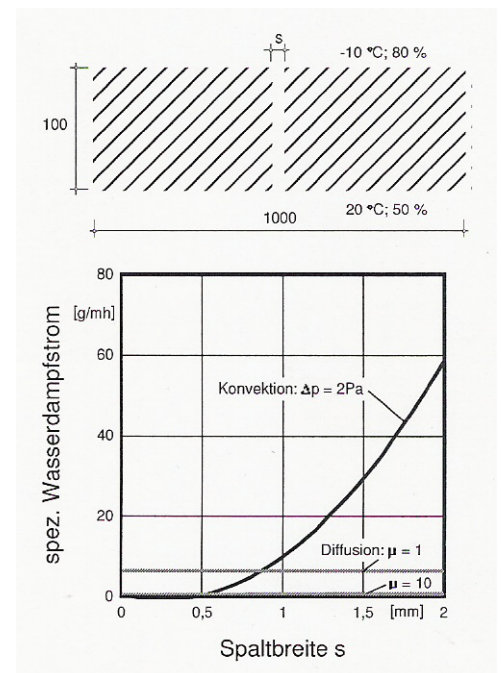
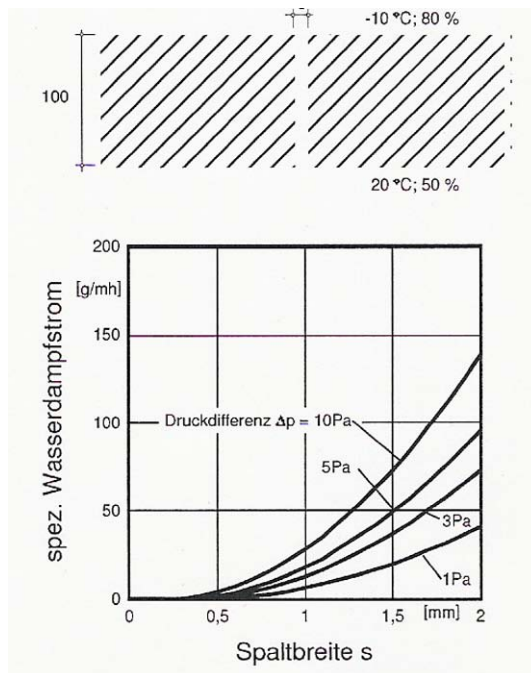
Ook in de zomer bestaat er risico op condensatie op onderdelen die door airconditioning worden gekoeld. Het vocht is nu van buiten afkomstig, en de luchtstromen zullen nu omgekeerd zijn. Stel dat er door onderdruk buitenlucht in een retourplenum terechtkomt is het mogelijk dat de vochtige lucht condenseert op vb gipskartonplaten die het retourplenum scheiden van de gekoelde ruimte. In kantoorgebouwen gebeurt het soms dat ventilatieopeningen 's nachts sluiten, maar de extractie in toiletten blijft doorgaan waardoor

het gebouw in onderdruk komt zonder de droging die overdag door de airconditioning gebeurt. Een zwembad van een hotel dat in onderdruk staat kan door verbindingen andere ruimtes die gekoeld worden ook in onderdruk brengen, met een verhoogd risico op condensatieproblemen.

Bij HVAC-systemen moet men de drukverschillen tussen binnen en buiten beperken, en dient men na plaatsing te controleren of er geen onverwachte luchtstromen opstreden die het systeem verstoren. Een goede luchtdichtheid zal bovendien het rendement van de installatie ten goede komen.

5.5.3.3 Kwantitatieve bespreking

Convectie is dus minder continu dan diffusie, maar kan daarentegen grote hoeveelheden vocht transporteren[74]. De onderlinge verhouding kunnen we bespreken aan de hand van figuur 74 en figuur 75. In een muur van 1m op 1m en 10cm dik heeft men een voeg gemaakt. Door de breedte van de voeg en de dampdichtheid van de muur te variëren kan men de onderlinge verhouding tussen convectie en diffusie onderzoeken. Lucht van -10°C met RV 80% bevat 208 gram/m^3 , lucht van $+20^{\circ}\text{C}$ met RV 50% bevat 1168.5g/m^3 . Aan de hand van de stromingskarakteristieken kan men dan uitrekenen hoeveel vocht door convectie in de constructie terecht komt [51] [52][90].

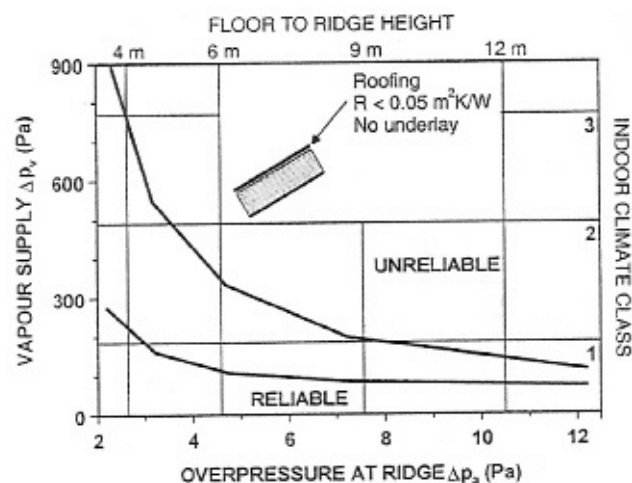


Figuur 74. “vochttransport in functie van drukverschil en voegbreedte” (links) [51] [90]

Figuur 75. “vergelijking vochttransport diffusie - convectie” (rechts) [51]

Als de dampdiffusieweerstand μ gelijk is aan 1, dan is bij een drukverschil van 2 Pa en een voeg van 2mm de dampconvectie gemiddeld 9 keer groter dan dampdiffusie. Als μ gelijk is aan 10 wordt convectie gemiddeld 92 keer belangrijker. Het relatieve belang van convectie vermindert door het tijdelijke karakter ervan.

De plaats van een bepaalde scheur of kier is ook belangrijk voor het risico op condensatie. Bovendien is het altijd mogelijk dat de vochtige lucht die in het dak terechtkomt door andere stromen onmiddellijk wordt afgevoerd, en niet te kans krijgt om af te koelen en te condenseren. Afhankelijk van de grootte en de plaats van een scheur zal men verschillende situaties krijgen, die niet eenvoudig te voorspellen zijn, zoals afdoende blijkt uit “Reliable Control of Interstitial Condensation in Lightweight Roof Systems” (A. Janssens, 1999) [47]. Er zijn wel beslissingsgrafieken opgesteld die kunnen helpen in ontwerpfase om risico's te vermijden, of om bij schadegevallen de mogelijke oorzaken van vochtschade te achterhalen.



Figuur 76. “beslissingsgrafiek voor beheersing van condensatie door luchtlekkage” [47]

5.5.4) bouwkundige criteria

Het luchtdichtheidsscherm moet op zich genoeg luchtdicht zijn, en alle aansluitingen en randen mogen geen al te grote verzwakkingen zijn. De verschillende elementen worden aan elkaar verbonden door tape, vormstukken, spanringen of lijm. Er zijn door Di Lenardo et al.(1995) en Uvsløkk (1996) criteria opgesteld die grenzen stellen aan de maximale lekkage of doorlatendheid [47].

Application	air leakage <i>m³/m²/h (75 Pa)</i>	air permeance <i>m³/m²/s/Pa</i>
Air barrier material	< 0.07	< 0.3 10 ⁻⁶
Air barrier system	< 0.72	< 2.7 10 ⁻⁶
+ joints	< 0.18	< 0.7 10 ⁻⁶
Wind barrier + joints	< 3.75	< 14.0 10 ⁻⁶

Tabel 77. “criteria voor maximaal toelaatbare luchtlekkage”

5.6) Besluit



Figuur 77. “bouwschade door luchtlekkage” [10]

Het luchtdichtheidsschermb wordt in België meestal aan de binnenzijde aangebracht. Bij muren is dat het pleisterwerk (of scherm bij houtskeletbouw), bij het dak is dat het scherm aan de binnenzijde van de isolatie. Op die manier wordt verhinderd dat warme vochtige binnenlucht aan de koude kant van de isolatie komt. Aan de andere kant zou het interessant zijn als het pakket isolatie aan de buitenzijde ook beschermd zou zijn, om het isolerend vermogen te optimaliseren. Daarom wordt best niet gekozen voor een geventileerd dak, maar een compact dak om achterloopse convectie te vermijden. Het luchtdichtheidsschermb kan dus niet boven de isolatie door het risico op condensatie. Er is ook een betere plaatsing en controle mogelijk als het scherm aan de binnenzijde aangebracht wordt.

De verschillende aansluitingen moeten goed verzorgd worden, want zoals blijkt kunnen kleine openingen aanleiding geven tot vrij grote vochtstromen. Een drukverschil van 2 Pa en een opening van een paar millimeter kan genoeg zijn om 50 tot 100 g per uur door een spleet van 1m lengte te laten stromen. Vooral het gecombineerde effect van overdruk door thermiek, windinvloeden en eventuele HVAC-systemen kunnen risicovolle situaties creëren. Door de variatie van drukverschillen is er steeds een opeenvolging van bevochtiging en droging. Ook de relatieve vochtigheid van de binnenruimte kan schommelen door een variërend gebruik in de tijd (bvb kantooruren). Een te hoge vochtigheid kan tijdelijk problematisch zijn, maar hoeft misschien niet echt tot een structureel probleem te leiden. De bufferende capaciteit van de materialen zijn dan bepalend.

6) Akoestiek

6.1) Inleiding

De laatste jaren wordt steeds meer aandacht besteed aan het thermisch isoleren van gebouwen. Dit is niet alleen milieuvriendelijk, het zorgt ook voor een comfortverhoging die de bewoners ten goede komt. Door een goede isolatie verdwijnt het ‘koude wand-effect’, en de hogere oppervlaktetemperaturen worden door veel mensen als aangenaam ervaren.

De comforteisen voor woningen worden in het algemeen steeds hoger. Geluidscomfort is momenteel echter voor weinig mensen een prioriteit: alleen als er zich pertinent problemen stellen zal men er aandacht aan besteden. Toch zien we dat de problematiek steeds meer aan belang wint, bvb door de commotie rond de nachtvluchten bij Zaventem. Een overmaat aan akoestisch geweld kan zowel fysiologische (hoofdpijn, stress, hoge bloeddruk) als psychologische (slaapstoornissen, concentratieproblemen) effecten veroorzaken [56] [57]. Er wordt zelfs beweerd dat geluidsoverlast na roken de belangrijkste factor is die tot hartinfarcten leidt [58]. We willen nu gaan kijken welke relatie er bestaat tussen luchtdichtheid en geluidscomfort. Dit is belangrijk omdat de luchtdichtheid achteraf moeilijk te verbeteren is, en bovendien zal de aanwezigheid van kieren en spleten de bovengrens bepalen van de geluidsisolatie die kan bereikt worden.

6.2) Achtergrond[55] [56] [61]

De weerstand die een wand biedt tegen de overdracht van luchtgeluiden wordt de geluidsisolatie of de geluidsverzwakkingsindex R (uitgedrukt in dB(A)) genoemd. In een proefopstelling zal men zowel het geluidsdrukniveau meten aan de zijde dat het geluid invalt op de wand, als aan de zijde waar de ontvanger staat. Nu blijkt dat het geluidsdrukniveau in de ontvangstkamer ook nog afhankelijk is van de geometrie en de afwerking van die kamer zelf. In formulevorm geeft dit:

$$R = L_{I,z} - L_{I,ont} + 10 \log \frac{S}{A_{T,0}}$$

Waarbij: R = geluidsisolatie of geluidsverzwakkingsindex [dB(A)]

$L_{I,z}$ = geluidsdrukniveau aan de zenzijde [dB(A)]

$L_{I,ont}$ = geluidsdrukniveau aan de ontvangstzijde [dB(A)]

S = oppervlakte van het beproefde gedeelte [m²]

$A_{T,0}$ = totaal absorptieoppervlak of equivalent open raam [m²]

Soms worden ook in situ proeven gedaan op wanden: de bekomen gegevens worden dan verwerkt tot de genormaliseerde bruto akoestische isolatie D_n . Aan de hand van de geluidsverzwakkingsindex kunnen materialen of samengestelde wanden dus akoestisch beoordeeld worden. Dit is echter geen materiaaleigenschap die constant is voor elke frequentieband van het geluidsspectrum. Bepaalde materialen zullen lagere geluiden dempen, andere zullen gemakkelijker hoge geluiden dempen.

De mens is niet voor alle frequenties even gevoelig: vooral geluiden rond 1000Hz worden duidelijker waargenomen, dit komt onder andere naar voor in de verschillende decibel weegfuncties. Aan de hand van die weegcurves worden de gemeten waardes per frequentie dan vertaald naar een enkelvoudige referentiewaarde die representatief is voor de overlast die ermee gepaard gaat.

6.3) Normen

6.3.1) Criteria voor binnenruimtes

In België zijn geen specifieke normen van toepassing die het geluidscfort in gebouwen behandelen, enkel het ARAB stelt bepaald grenzen aan maximale geluidsdosissen en de geluidsbelasting op de werkvloer, maar dit is hier niet aan de orde.

Voor de fysiologische problemen te vermijden stelt men algemeen dat het equivalent geluidsdrukniveau lager moet zijn dan 70dB(A). In specifieke situaties bestaan nog andere akoestische criteria, bvb bij vliegtuigen zal men voor nachtelijke hinder met andere waarden rekenen om deze zwaarder te laten doorwegen. [56] [61]

Criteria om psychologische schade te weren zijn opgesteld door het WHO (World Health Organisation). Een minimeis voor verstaanbaarheid en concentratie is 50dB(A), optimaal is een geluidsdrukniveau lager dan 35dB(A). Ook voor slaapverstoring heeft men specifieke eisen opgesteld: gemiddeld moet het geluidsdrukniveau lager zijn dan 30dB(A), maar

eventuele pieken tot 45dB(A) worden toegelaten. Uit metingen blijkt dat mensen die in de buurt van Zaventem wonen 's nachts vaak pieken te verwerken krijgen van 62dB(A), dit is te vergelijken met het achtergrondlawaai in een druk kantoor. [61] [62]

6.3.2) Criteria voor wanden NBN S01-400:1977

Om verschillende wanden kwalitatief te kunnen vergelijken, heeft men in de Belgische norm NBN S01 400 vier referentiecurven (zogenaamde V-curven: Va, Vb, Vc, Vd) opgesteld om de gemeten geluidsisolatie van gevels aan te relateren. Die curve die gemiddeld het best overeenkomt met de gemeten curve duidt dan de klasse aan waartoe de wand behoort. Er zijn zestien frequenties vastgelegd waarvoor men de geluidsverzwakkingsindex kan meten, en zodoende door de kleinste kwadratenmethode vaststellen welke curve het dichtst aanleunt bij de gemeten curve. Deze norm is geen wettelijke verplichting, maar geldt wel als referentie bij geschillen. [55]

6.3.3) Criteria voor wanden NBN S01-400: ontwerp 2004-04^[63]

Momenteel werkt men aan een nieuwe norm, die de norm van 1977 zal vervangen. Voor gevelisolatie wordt een onderscheid gemaakt tussen dagruimten en nachtruimten. Bij dagruimten wordt de geluidsbelasting op een gevel bepaald op basis van de equivalente A-gewogen geluidbelasting die gemeten wordt in de periode van 07-23h. Voor de avondperiode (19-23h) wordt daarbij een penalisatie van 5dB toegepast. Dit niveau wordt aangeduid als ED. Voor nachtruimten wordt de geluidsbelasting op een gevel bepaald op basis van het equivalente A-gewogen geluiddrukkniveau in de nachtperiode (23-07h). Dit niveau wordt aangeduid als EN.

Aard van de ruimte en de geluidbelasting	Eisen
Dagruimte die beschermd moet worden tegen buitengeluid	$D_n \geq ED - 35$ en $D_n \geq 30$
Nachtruimte die overwegend beschermd moet worden tegen weg- en/of spoorlawaai	$D_n \geq EN - 30$ en $D_n \geq 30$
Nachtruimte die overwegend beschermd moet worden tegen vliegtuiglawaai	$D_n \geq EN - 25$ en $D_n \geq 30$

Tabel 78. “criteria wanden volgens NBN S01-400 ontwerp” [63]

Praktisch wil dit zeggen dat het gestandaardiseerde niveauverschil gemeten in situ altijd groter moet zijn dan 30dB. D_n wordt geformuleerd op basis van de gemiddelde gemeten waardes. Men stelt dus eigenlijk grenzen op basis van het geluidsdrukniveau in de binnenruimte, en niet op basis van het niveauverschil tussen binnen en buiten. Zodoende moet geen compromis gemaakt worden die te grote waardes zou opleggen aan woningen in een stille omgeving, en te lage waardes voor woningen in bvb een stadsomgeving.

6.4) Homogene wanden

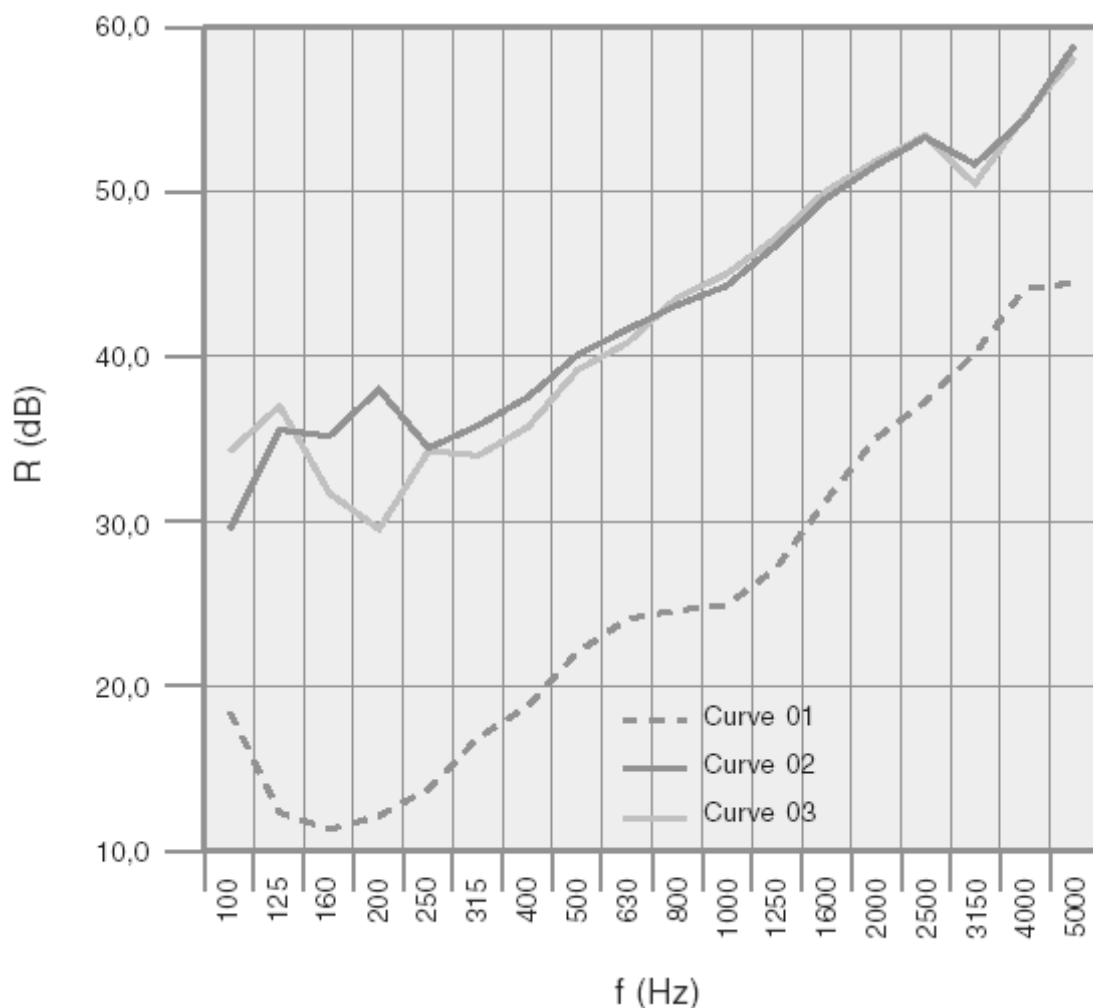
Met homogene wanden bedoelen we een doorlopend materiaal, zonder specifieke voegen, spleten of gaten die niet inherent verbonden zijn met het materiaal. Het is bvb normaal dat er poriën en minuscule gaten zijn in keramische materialen, maar grotere scheuren beschouwen we niet als inherent aanwezig. Verder evalueren we enkel het belang van luchtdichtheid, en hoe deze invloed heeft op de geluidsisolatie.

Figuur 78 toont de resultaten van een aantal metingen van het WTCB. [60]

Curve 01: onbepoisterde muur uit lichte betonblokken 140mm

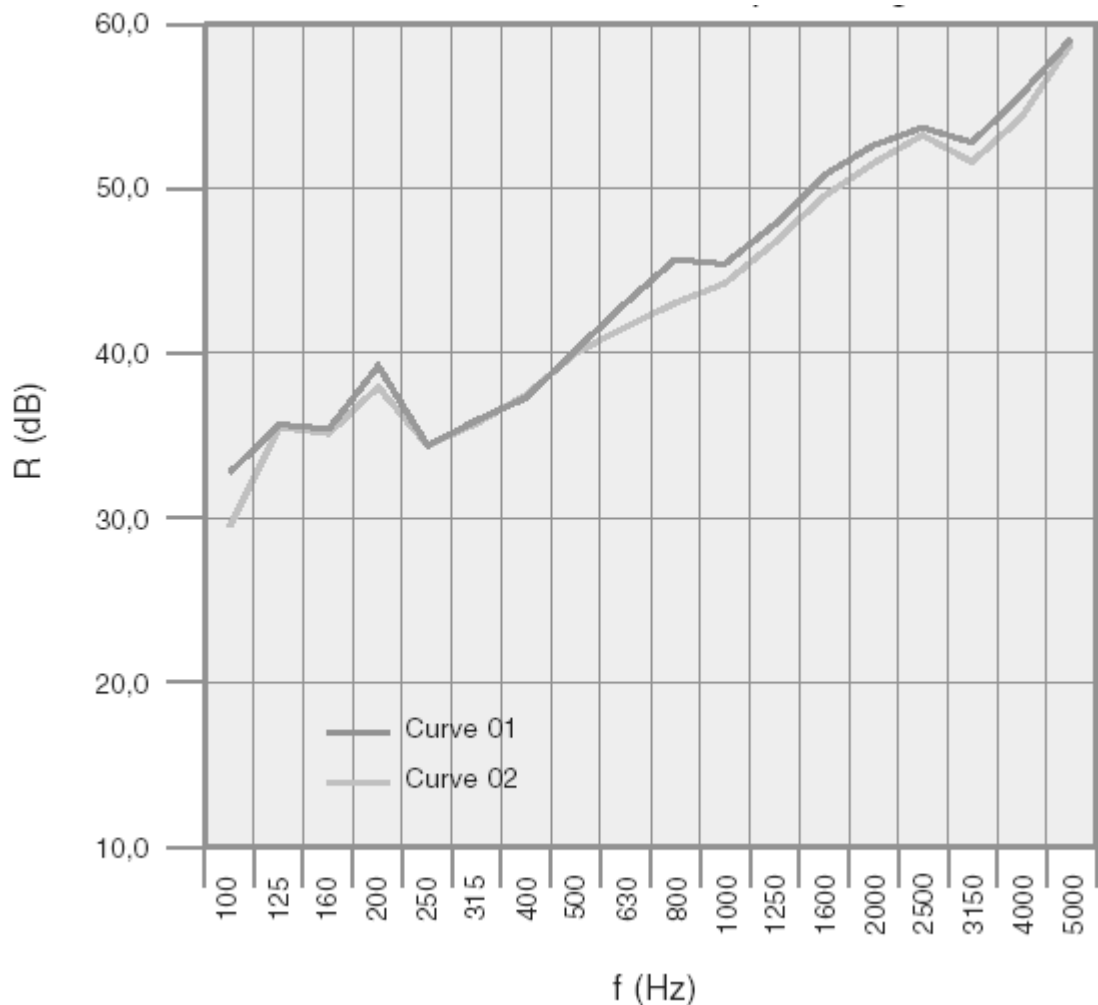
Curve 02: idem met een bepoistering aan twee zijden

Curve 03: idem met een bepoistering aan één zijde.



Figuur 78. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie - afwerking” [60]

De geluidsverzwakkingsindex van de onbepleisterde wand bedraagt 25 dB, de geluidsverzwakkingsindex van zowel de enkel- als dubbelzijdig bepleisterde wand is 44 dB. Dat is toch wel een opmerkelijk verschil door een laagje pleisterwerk van 3mm dik. Dit kan noch verklaard worden door de massawet (vermeerdering oppervlakttemassa), noch door dubbele wand-effecten (interne damping door elastische laag): de luchtdichtheid is de bepalende factor die de geluidsisolatie maar liefst 19 dB verhoogt. Dit wordt bevestigd door figuur 79. Hier heeft men gekeken naar de invloed van de dikte van het pleisterwerk. Indien de massa bepalend zou zijn, dan zou er een duidelijk verschil moeten zijn tussen de twee curves: dit is klaarblijkelijk niet het geval. De minuscule poriën in de lichte betonblokken zorgen voor de verhoogde geluidstransmissie als er geen bepleistering is.



Figuur 79. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie - bepleistering” [60]

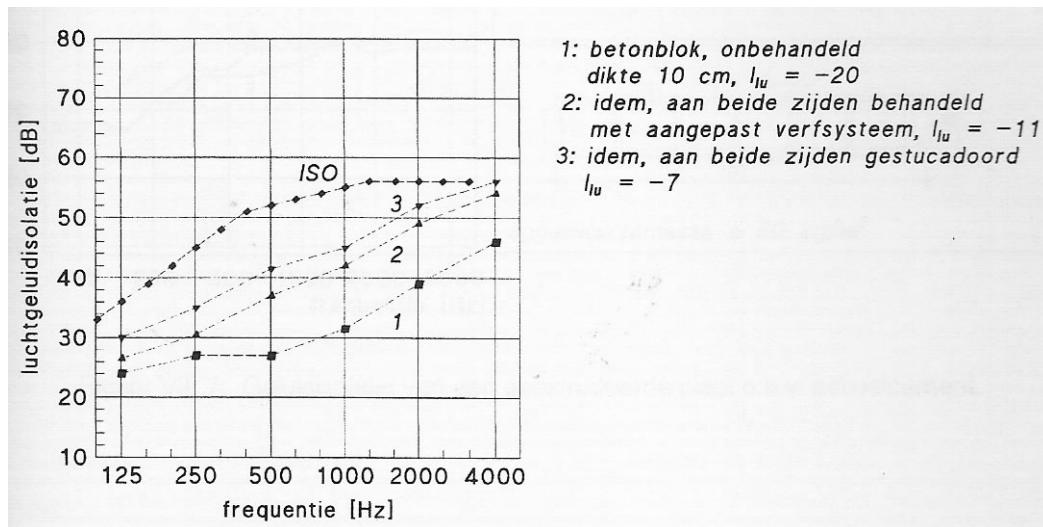
Curve 01: muur van lichte betonblokken 140mm met een traditionele bepleistering aan beide zijden. (10mm)

Curve 02: muur van lichte betonblokken 140mm met een dunne bepleistering aan beide zijden. (3mm)

Het effect is enkel zo duidelijk als de muur zelf niet luchtdicht is. Kijken we naar normale muren uit bakstenen of klassieke betonblokken zal de bepleistering slecht een verbetering met zich meebrengen van 2 à 3 dB, bij kalkzandsteenblokken en gipsblokken zal het slechts 0 à 1 dB zijn.

In figuur 80 zien we het verschil in geluidsisolatie tussen onbehandelde betonblokken, geverfde betonblokken en bepleisterde betonblokken. Ook hier is opnieuw duidelijk de

invloed te zien van luchtdichtheid. De aanwezigheid van de verflaag geeft bijna hetzelfde effect als het pleisterwerk.



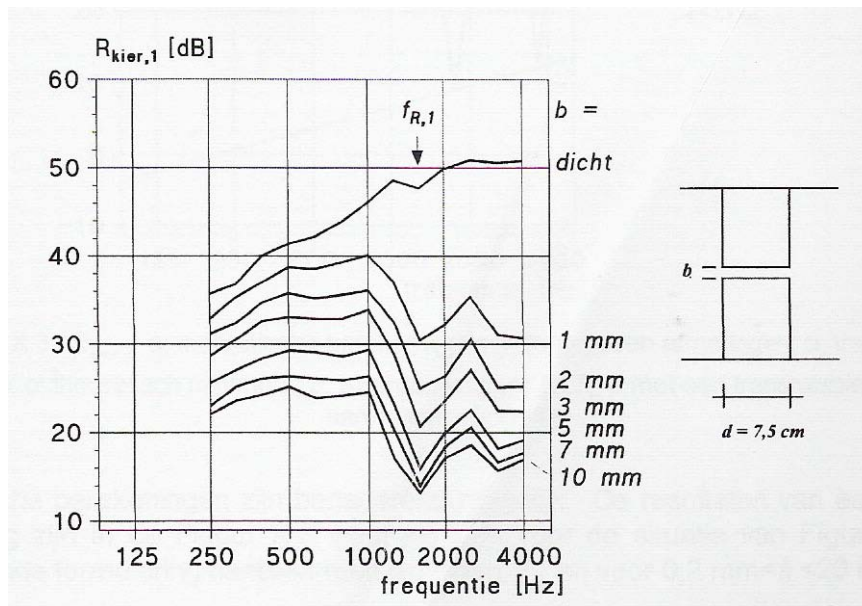
Figuur 80. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie - afwerking” [55]

6.5) Voegen in wanden

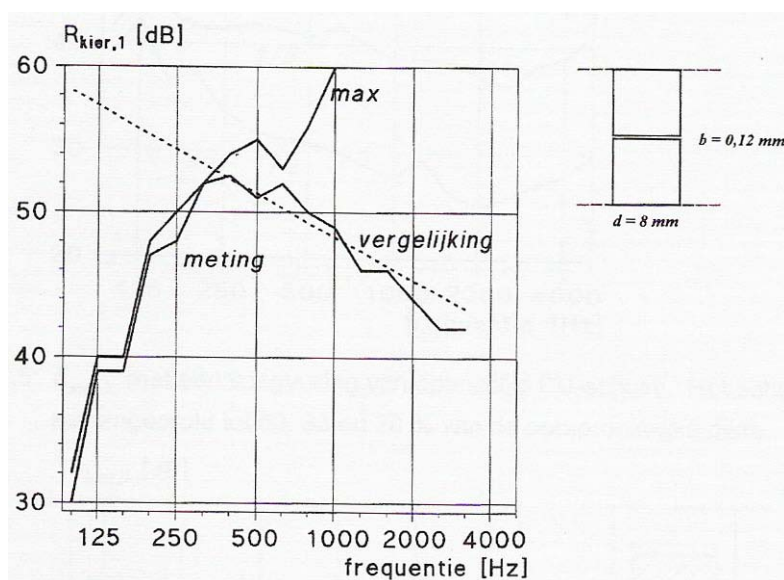
Hier behandelen we de invloed van spleten, kieren en gaten die niet inherent zijn aan het materiaal. Openingen zoals deze zijn oorzaak nummer één van verlaagde geluidsisolatie. Als een eerste ruwe benadering kunnen we gebruik maken van volgende formule [55] [64] (in de veronderstelling dat de oppervlakte van de wand veel groter is dan de oppervlakte van het lek):

$$R = -10 \log \left(10^{-R_w/10} + \frac{S_{lek}}{S_w} \right)$$

Dus we weten dat R in elk geval kleiner zal zijn dan $10 \log (S_w / S_{lek})$. Als we nu een muur hebben van 2.5m hoog en 3 meter breed, en aan de zijkant is een voeg van 3mm over de totale hoogte, dan kan de geluidsisolatie van het totaal nog maximaal 30 dB zijn. We moeten eigenlijk ook nog rekening houden met resonantie en de specifieke transmissiekaracteristiek van de opening, maar dit zou ons te ver leiden.



Figuur 81. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie – voegen 1-10mm” [55]



Figuur 82. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie – voeg 0.12mm” [55]

In figuur 81 en figuur 82 wordt de invloed van de kierbreedte duidelijk, terwijl de kierdiepte constant gehouden wordt. De geluidsisolatie is duidelijk frequentieafhankelijk. De geometrie van die kier bepaalt rond welke frequentie er resonantie zal zijn: op dat moment is er een verhoogde transmissie. Het verschil tussen een dichte muur, en een muur met een spleet van 1mm is bijzonder groot. Zelfs bij een spleet van amper 0.12mm breed is er nog een aanzienlijke daling van de geluidsisolatie in de hogere frequentiebanden (let wel: het betreft hier een plaat van 8mm dik). De breedte van de spleet bepaald dus niet welke frequenties meer of minder worden geïsoleerd. Vooral de wetenschap dat openingen met minimale

afmetingen de akoestische prestatie van wanden snel doet dalen is belangrijk. De breedte van die spleet zal daarentegen wel bepalend zijn voor de luchtdichtheid van de wand.

De kierdiepte heeft een andere invloed: naarmate de kier dieper is, neemt het geluidsdruk-niveauverschil toe, met uitzondering van de resonantiefrequentie. De luchtvolumestroom daarentegen neemt af naarmate een kier dieper is, omdat de stromingsweerstand vergroot. De luchtdichtheid is immers omgekeerd evenredig met de luchtvolumestroom in tegenstelling tot de luchtdoorlatendheid [64].

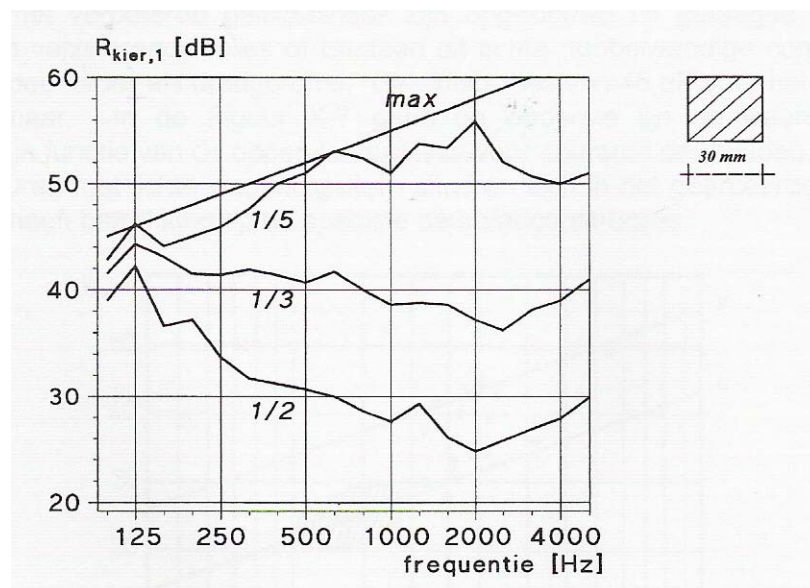
Speet- breed- te [mm]	Lucht- doorla- tendheid $Q_{v,10}$ [dm ³ /s]	Geluids- isolatie $D_{ne,A}$ [dB(A)]	Kwaliteit $R_{l/q,A}$ [dB(A)]	$R_{q,A}$ [dB(A)]
1	0.23	35.6	1.98	-10.78
2	0.99	30.3	-9.66	-9.74
3	3.11	26.0	-18.93	-9.07
4	5.22	23.7	-23.48	-9.12
5	8.11	21.7	-27.39	-9.21
6	10.45	21.1	-29.09	-8.71
7	13.58	19.2	-32.13	-9.47
8	14.31	18.9	-32.66	-9.54

Tabel 79. “eigenschappen voegen naar akoestiek en luchtdoorlatendheid toe” [64]

De luchtdoorlatendheid neemt inderdaad sterk toe bij een verdubbeling van de kierbreedte, zoals we kunnen aflezen in de tabel. De geluidsisolatie daarentegen neemt veel minder spectaculair af. Heel fijne spleten zullen dus een geringe impact hebben op de luchtdichtheid, maar des te meer op het geluidsisolerende vermogen van de wand in totaal. Er zijn reeds pogingen gedaan om luchtdichtheid en geluidsisolatie door formules met elkaar te verbinden, waarbij $R \sim \log(1/Q_v)$, maar de toepassingen zijn vooralsnog zeer beperkt, en praktisch niet bruikbaar in functie van het schatten van luchtdichtheid [64].

We kunnen de globale geluidsisolatie van een wand niet relateren aan de luchtdoorlatendheid ervan. Variaties in spleetbreedte zullen weinig effect hebben op de akoestische isolatie, maar des te meer op de luchtdichtheid. Ook de wetenschap dat bepaalde frequenties beter of slechter geïsoleerd worden kunnen we niet relateren aan luchtdichtheid: daarbij is vooral de geometrie van de opening bepalend, en die kennen we niet.

Het is dan ook niet verwonderlijk dat opencellig PU-schuim zeer dicht moet samengedrukt worden akoestisch goed te isoleren. Naar luchtdichtheid toe is dit veel minder noodzakelijk [55].



Figuur 83. “geluidsverzwakkingsindex in functie van frequentie – samendrukking schuimband” [55]

7) Infiltratie & Normering

7.1) Inleiding

Een goede luchtdichtheid is belangrijk om schade te voorkomen, wooncomfort te verhogen, en de energiefactuur te doen dalen. Het is niet zo evident een kosten-baten analyse op te stellen voor luchtdichtheid: schade en wooncomfort zijn moeilijk uit te drukken in eenheidsprijzen. Bovendien is luchtdichtheid veeleer afhankelijk van uitvoeringskwaliteit, dan van materiaalkeuze, en het is des te moeilijker te bepalen wat een goede uitvoering kost aan arbeidsuren, dan wel een slechte uitvoering.

Daarom beperken we ons tot de bespreking van de energiehuishouding in verband met luchtdichtheid en de financiële aspecten die daarmee samen gaan. In de berekening gaan we uit van 2817 graaddagen (standaardgraaddag in Ukkel in 19/12 regime) per jaar. Eén kWh kost 0.10€ in elektriciteit (gewogen gemiddelde van dag- en nachttarief), 0.025€ voor aardgas en 0.05€ bij stookolie [49]. Deze waarden zijn echter nogal veranderlijk, en daarom zijn de resultaten die we zullen bekomen eerder indicatief.

Om de invloed van luchtdichtheid op energiehuishouding te kunnen analyseren moeten we de blowerdoor resultaten omrekenen tot de werkelijke luchtvolumestromen die plaatsvinden onder normale meteorologische omstandigheden. Deze infiltratie kan enkel correct gemeten worden door tracergas-proeven, welke niet gebeurd zijn in het kader van dit onderzoek. Er bestaan enkele methodes om de infiltratie te bepalen aan de hand van de gemeten luchtdichtheid, de belangrijkste zullen we nu bespreken.

Het is vrij eenvoudig om die verschillende methodes te controleren aan de hand van tracergas-metingen. Men voert een blowerdoor test uit, past de berekening toe, en zet de gegevens uit in een diagram met als abscis de gemeten waarden van de tracergas-proeven, en met als ordinaat de berekende waarden. De beste methode zal een rechte benaderen met een helling van 45° die in theorie door de oorsprong gaat. De methode die de kleinste afwijking heeft met de kleinste kwadraten methode is dan het meest geschikt. Helaas beschikken we niet over zo'n gegevens, en hebben we geen uitgebreide onderzoeken gevonden die de problematiek behandelen. De beschreven methodes worden dus onder voorbehoud weergegeven.

Multizonale modellen bespreken we niet omdat dit ons te ver zou leiden, meer informatie kan hieromtrent kan men onder meer vinden bij het AIVC [64] [65] [72].

7.2) Natuurlijke ventilatie

Bij natuurlijke ventilatie kunnen we een onderscheid maken tussen ‘gewenste ventilatie’ en ‘toevallige infiltratie’. Met ‘gewenste ventilatie’ bedoelen we hier ramen die open gezet worden, roosters boven de ramen, roosters in natte cellen... In veel woningen wordt er enkel af en toe een raam open gezet, en berust de luchtverversing verder enkel op infiltratie. Infiltratie is dus niet in alle woningen per definitie negatief, men moet het evalueren binnen het kader van het ventilatiesysteem dat aanwezig is. Hier komen we later op terug. [19] [54] [66] [68]

7.2.1) prEN 832 (Europa)

In prEN 832 vinden we tabel 80 met het ventilatievoud n (h^{-1}) voor woningen met natuurlijke verluchting in functie van de beschutting en de gemeten luchtdichtheid:

Terreinruwheid	Gebouwluchtdichtheid bij 50 Pa drukverschil		
	Slecht $n_{50} > 10h^{-1}$	Gemiddeld $4h^{-1} < n_{50} < 10h^{-1}$	Goed $n_{50} < 4h^{-1}$
Geen beschutting	1.5	0.8	0.5
Matige beschutting	1.1	0.6	0.5
Sterke beschutting	0.7	0.5	0.5

Tabel 80. “schatting infiltratie natuurlijk verluchtte woningen prEN 832” [49]

7.2.2) ASHRAE (Verenigde Staten)

De enige methode waarvan de berekening naar voor wordt gebracht in ASHRAE – fundamentals [14] is:

$$n_x = n_{50} / 20 \text{ of } n_x = 0,05 \cdot n_{50} \text{ (Sherman 1987)}$$

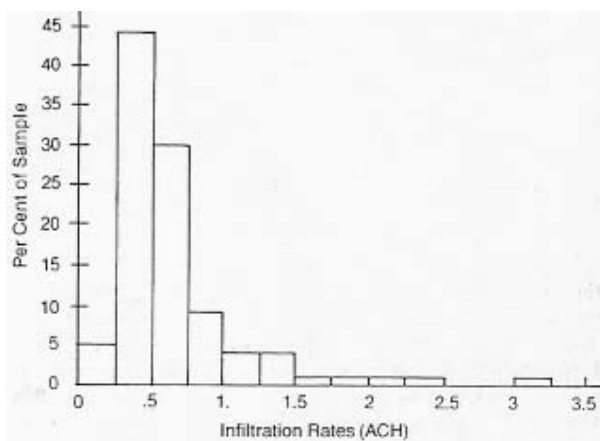
Als we nu rekening houden met de stromingsvergelijking die we bekomen zijn bij de blowerdoor-proef: $n_x = C \cdot \Delta p^n$

geeft dit: $C = n_{50} / (50 \text{ Pa})^n$

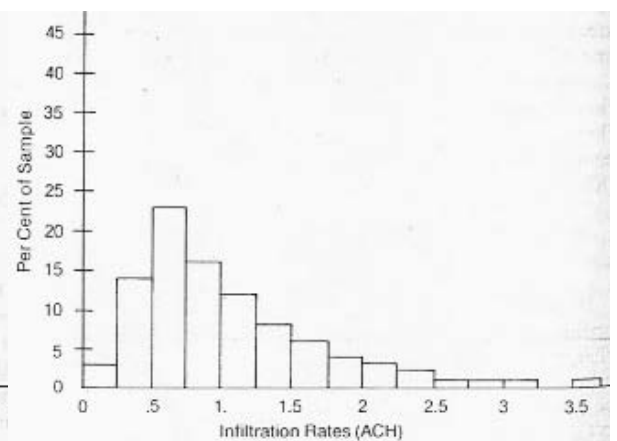
Waardoor $n_x = n_{50} \cdot (\Delta p / 50 \text{ Pa})^n$

Om nu te bekomen dat $n_x = n_{50} / 20$, moet Δp liggen tussen 0.5 en 1 Pa (we stellen n gelijk aan 0.66 [16])

In figuur 84 zijn de gegevens verwerkt van 312 nieuwbouwwoningen in Noord-Amerika waar er aandacht besteed is aan energiehuishouding, in figuur 85 staan de gegevens van 266 bestaande woningen waar geen aandacht is besteed aan energiehuishouding. De eerste groep woningen heeft een gemiddeld infiltratievoud van 0.5 h^{-1} , de tweede groep gemiddeld 0.9 h^{-1} .



Figuur 84. “gemeten infiltratie bij 312 energiezuinige nieuwbouwwoningen” (links) [14]



Figuur 85. “gemeten infiltratie bij 266 woningen van ongeveer 30 jaar oud” (rechts) [14]

7.2.3) Lawrence Berkely Laboratory (Verenigde Staten) [6]

In het Lawrence Berkely Laboratory is men op basis van experimenteel onderzoek gekomen tot volgende methode om de infiltratie te bepalen aan de hand van de n_{50} -waarde:

$$n_x = n_{50} / N$$

Om de resultaten beter te kunnen vergelijken geven we in onderstaande tabel de waarden voor $1/N$, waarbij N de LBL correlatiefactor is:

Terreinruwheid	Aantal verdiepingen		
	1	1.5	2
Geen beschutting	0.045	0.051	0.057
Matige beschutting	0.041	0.045	0.051
Sterke beschutting	0.034	0.038	0.043

Tabel 81. “schatting infiltratie in functie van beschutting en aantal verdiepingen” [9]

7.2.4) EnergiePrestatieRegelgeving (Nederland) [11] [12] [15] [17] [69]

Men stelt de q_{v10} -waarde gelijk aan de karakteristieke lucht volumestroom voor infiltratie. Andere methodes stellen dat de infiltratie overeenstemt met de lucht volumestroom bij een statisch drukverschil van bvb 1 Pa, wat dus een heel stuk lager is dan het drukverschil in de Nederlandse wetgeving (10 Pa). Voor woonfuncties met natuurlijke luchttoevoer kan als richtwaarde voor de karakteristieke luchtdoorlatendheid 1,0 - 1,43 dm³/s.m² worden aangehouden volgens NEN 5128. Voor een woning met een compactheid gelijk aan 1.24 en binnenvolume gelijk aan 516m³ (gemiddelde waardes SENVIVV-studie open bebouwing) komt dit neer op een infiltratievoud van 2.9h⁻¹ tot 4.15h⁻¹ ($\Delta p = 10$ Pa) of $n_{50} = 7.9h^{-1} - 11.3h^{-1}$. Artikel 71 van het Bouwbesluit bepaald echter dat voor dezelfde woning het infiltratievoud maximaal 1.39h⁻¹ mag zijn ($\Delta p = 10$ Pa), dus een n_{50} -waarde gelijk aan 3.8h⁻¹.

De q_{v10} -waarde kunnen we aan de hand van volgende formule afleiden uit de n_{50} -waarde:

$$q_{v10} = (n_{50} \cdot V_{\text{net,geb}})/9.84$$

Voor een gebouw met compactheid 1 zal het infiltratievoud dus gelijk zijn aan $n_{50}/9.84$ of $0.10 \cdot n_{50}$.

Bij het bepalen van de infiltratie wordt dus geen rekening gehouden met het ventilatiesysteem.

7.3) Niet gebalanceerde ventilatie^[9]

Volgende formule uit prEN 832 geeft een richtwaarde voor de infiltratie bij woning met of zonder balansventilatie, op basis van gemiddelde meteorologische omstandigheden, (en zegt niets over maximale waarden) [34]:

$$n_x = \frac{n_{50,R} \cdot e}{1 + \frac{d}{e} \cdot \left(\frac{n_s - n_e}{n_{50}} \right)^2}$$

Waarbij: $n_{50,R}$ = rekenwaarde voor de luchtdichtheid bij een drukverschil van 50 Pa
 $d = 15$ voor woningen die meer dan één gevel hebben die blootgesteld wordt
 n_s = ventilatievoud van buitenlucht
 n_e = ventilatievoud van retourlucht
 e = beschuttingsfactor

Als er dus enkel afzuiging [73] is vervalt de term n_e in de vergelijking en krijgen we:

$$n_x = \frac{n_{50,R} \cdot e}{1 + \frac{d}{e} \cdot \left(\frac{n_s}{n_{50}} \right)^2}$$

7.4) Gebalanceerde ventilatie

Als we dezelfde algemene formule uit prEN 832 [53] voor infiltratie toepassen bij een gebalanceerd systeem

$$n_x = \frac{n_{50,R} \cdot e}{1 + \frac{d}{e} \cdot \left(\frac{n_s - n_e}{n_{50}} \right)^2}$$

Dan is n_s gelijk aan n_e en wordt de noemer van de breuk gelijk aan 1. Zodoende krijgen we al vergelijking [73]: $n_x = e \cdot n_{50}$

Waarbij $e = 0.10$ – geen afscherming
 $e = 0.07$ – matige afscherming
 $e = 0.04$ – sterke afscherming

Kijken we bijvoorbeeld naar een woning met matige afscherming en een n_{50} -waarde gelijk aan 1h^{-1} , dan bedraagt de infiltratie 0.07h^{-1} . Als het ventilatiesysteem een ventilatievoud van 0.5h^{-1} veroorzaakt, en het rendement van de warmtewisselaar 65% bedraagt, dan verhoogt de infiltratie het ventilatievoud met 14%, maar de energieverliezen door ventilatie stijgen met 40%.

7.5) Energieverbruik

7.5.1) Belang^[68] ^[70]

Sinds de energiecrisis in 1973 is het bewustzijn gegroeid dat energievoorraden niet eindeloos zijn. De laatste 15 jaar is ook duidelijk geworden dat de gevolgen van de vergaande industrialisering nefast zijn voor het ecologische systeem op deze wereld. De broeikasgassen tasten de ozonlaag aan, waardoor er meer UV-licht in de atmosfeer terechtkomt dat de aarde opwarmt en het risico op huidkanker bij mensen verhoogt. Bovendien zorgt een onstabiel politiek klimaat in het Midden-Oosten, en een boomende economie in China voor spectaculair hoge energieprijzen. Analisten zien op korte en middellange termijn geen veranderingen optreden in deze situatie.

In 1997 werd in Kyoto in Japan beslist om de uitstoot van broeikasgassen (onder meer CO_2) tegen 2012 te verminderen met 5 procent tegenover 1990. Per land wordt een individueel doel vooropgesteld, België moet zijn uitstoot met 7.5% doen dalen. Dit akkoord treedt echter maar in werking als 55 landen die samen 55% van de vervuiling veroorzaken dit akkoord ondertekenen. De Verenigde Staten, Australië, Rusland en China hebben altijd geweigerd hun verantwoordelijkheid op te nemen, maar eind 2004 heeft de Russische Doema het verdrag dan toch geratificeerd, zodat de 55% eindelijk gehaald wordt. Het verdrag is uiteindelijk van kracht geworden in februari 2005, 8 jaar na het opstellen ervan.

In een relatief koud klimaat met hoge comforteisen zoals in België gaat er veel energie naar de verwarming van woningen en andere gebouwen. In België gaat 37.5% van het jaarlijkse eindverbruik naar het energieverbruik in gebouwen, en 70% à 75% van die energie gaat naar ruimteverwarming. Hoewel er bijna in alle nieuwbouwwoningen isolatie geplaatst wordt zijn er nog grote veranderingen nodig: het potentieel om energie te besparen wordt slechts

minimaal benut. Vanaf 1 januari 2006 wordt dan ook de nieuwe EnergiePrestatieRegelgeving van kracht die de bouwwereld verplicht om meer aandacht te besteden aan energiezuinigheid en energiehuishouding in het algemeen. Luchtdichtheid is één van de vele schakels die kunnen bijdragen tot een energiezuinig wonen.

7.5.2) Energiebesparing

De jaarlijkse energiebehoefte in woningen voor verwarming kunnen we uitdrukken aan de hand van volgende formule [49]:

$$Q_h = 0,024 \cdot V \cdot [(U/C) + 0.34n] \cdot G_b^a$$

Waarbij: Q_h = de jaarlijkse energiebehoefte voor verwarming [kWh]

V = het verwarmde volume [m³]

0,024 = omrekenfactor (van Joule naar kWh, van Q/sec naar Q/dag) [-]

U = gemiddelde U-waarde van de gebouwschil [W/(m².K)]

C = compactheid [-]

0,34 = $\rho_a c_a / 3600$ ($\rho_a c_a = 1200$ J/m³/K) met correctie van s⁻¹ naar h⁻¹

n = ventilatievoud in de woning [h⁻¹]

G_b^a = aantal graaddagen per jaar, afhankelijk van temperatuursregime [K.dag]

Voor de invloed van luchtdichtheid kunnen we dus werken met volgende formule (rekening houdend met het aantal graaddagen per jaar gemeten te Ukkel, met 19/12 regime):

$$\Delta Q_h = 0,024 \cdot V \cdot 0.34n \cdot 2817 \text{ [kWh]}$$

$$\Delta Q_h = 23 \text{ nV [kWh]}$$

In [89] vinden we $\Delta Q_h = 27.7 \text{ nV [kWh]}$ dit heeft te maken met het aantal graaddagen dat men in rekening brengt.

Kijken we naar de SENVIVV-studie [20], dan is het gemiddeld verwarmde volume bij woningen in open bebouwing gelijk aan 516m³, en de gemiddelde $n_{50} = 12,4$. Deze luchtdichtheid resulteert in een infiltratievoud van 0.62h⁻¹ tot 1.5h⁻¹, afhankelijk van de berekeningswijze. Men stelt in de SENVIVV-studie ook dat het gemiddeld ventilatievoud ten gevolge van de vereiste debieten volgens de norm NBN D50-001 gelijk is aan 0.52 voor

eengezinswoningen, en 0.72 voor appartementen. Een $n_{50} = 3$ zou leiden tot een infiltratievoud van $0.15h^{-1}$ tot $0.5h^{-1}$. Als het infiltratievoud daalt met $0.5h^{-1}$ in een woning van $516m^3$ komt dit overeen met een energiebesparing van 5934 kWh per jaar. Als het infiltratievoud daalt met $1.0h^{-1}$ dan daalt het energieverbruik met 11868 kWh. Wordt de woning met gas verwarmd (0.025€ /kWh) bespaart men respectievelijk 148€ en 297€ per jaar. Per volumewisseling dat de n_{50} -waarde beter is levert dit dus een besparing op tussen de 16€ en 32€ per jaar. Stel dat men een terugverdientijd inreken van 15 jaar, zou de meerkost om die luchtdichtheid per woning van gemiddeld $12.4h^{-1}$ naar $3h^{-1}$ te brengen maximaal 2220€ tot 4440€ mogen bedragen. Bovendien zal men minder risico's hebben op bouwschade en tochtproblemen.

Bovendien is de gemiddelde luchtdichtheid van woningen in België veel hoger dan in andere landen, en is er hier nog niet veel onderzoek gedaan naar het verband tussen luchtdichtheid in infiltratie. Hoogstwaarschijnlijk is het mogelijk om de infiltratie door een betere luchtdichtheid met meer dan één volumewisseling per uur teug te dringen waardoor de besparing evenredig zal stijgen.

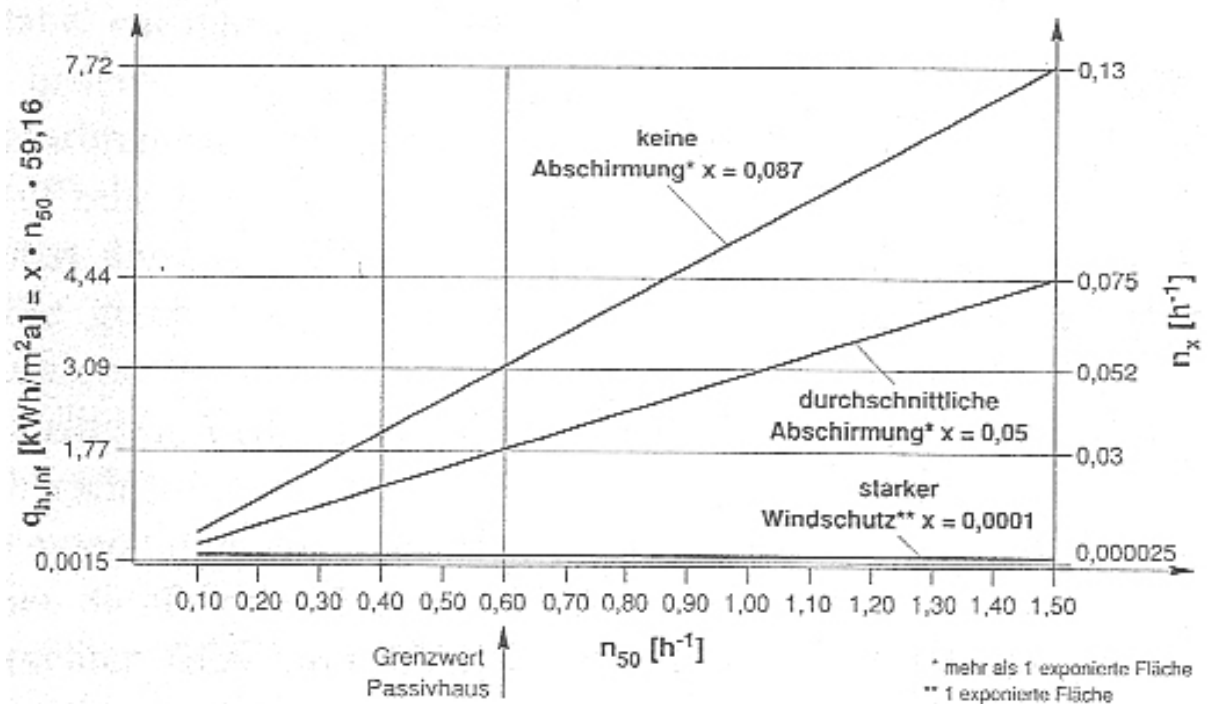
In figuur 86 uit een Duitse studie [53] kunnen we zowel de natuurlijke infiltratie als de energieverliezen die daar mee gepaard gaan aflezen in functie van de gemeten n_{50} -waarde. Als men de gemeten luchtdichtheid vermenigvuldigt met x (in functie van de beschuttingsgraad) bekomt men hier het infiltratievoud. De overeenkomstige warmteverliezen worden dan berekend aan de hand van volgende formule (met een nogal ruwe benaderingswijze voor de vloeroppervlakte):

$$q_{h,inf} = \frac{H_{V,inf} \cdot F_{Gt}}{A_N} = \frac{n_x \cdot V \cdot 0,34 \cdot 69,6}{0,32 \cdot \frac{V}{0,8}} = n_x \cdot 59,16 = x \cdot n_{50} \cdot 59,16 \quad [kWh / m^2 \text{ per jaar}]$$

Waarbij: $F_{Gt} = 69,6$ staat voor het aantal graaddagen, uitgedrukt in kKh/a of het aantal duizend graaduren per jaar
 n_x = infiltratievoud [h^{-1}]

Als we de uitkomst vermenigvuldigen met 0,4V verkrijgen we het energieverlies voor de totale woning, en is dit niet meer afhankelijk van de schatting van de vloeroppervlakte. We

stellen V gelijk aan 516m^3 , $0,4V$ is dan gelijk aan $206,4\text{m}^3$. Voor een woning met n_{50} gelijk aan $1,50\text{h}^{-1}$ die niet beschut is vinden we een jaarlijks energieverlies van 1593 kWh . Dit komt overeen met onze eigen berekening, want als men dit vermenigvuldigt met $3,85$ is dit ongeveer gelijk aan 5934 kWh (fout van 3%), we hebben het energieverlies namelijk berekend met een infiltratie die $3,85$ maal hoger was.



Figuur 86. “infiltratie en energieverlies in functie van n_{50} -waarde” [53]

Als we bovendien kijken naar de passiefhuisnorm die zegt dat het jaarlijkse energiegebruik voor verwarming lager moet zijn dan 15 kWh/m^2 , weten we dat het belang van luchtdichtheid voor passiefwoningen niet te onderschatten is.

In de “Minneapolis Blower Door – operation manual” stelt men dat werken die de luchtdichtheid verbeteren maximum $50\$$ per 100CFM mogen kosten. $50\$$ staat bij de huidige koers ongeveer gelijk aan 40€ . Verder zegt men dat de werklieden die verbeteringen aanbrengen $100\$$ kosten voor 2 uur voor 2 personen. Nu zou dit ongeveer 100€ à 120€ kosten, en daarom stellen we dat de verbeteringen 55€ mogen kosten per 100CFM . 1 CFM is gelijk aan $1.699\text{ m}^3/\text{h}$. Na omrekening mag de verbetering dus $32,4\text{€}$ per $100\text{m}^3/\text{h}$. Voor de gemiddelde woning in open bebouwing uit de SENVIVV-studie mag een verbetering van de

n_{50} -waarde met 1 volumewisseling 167€ kosten. Volgens onze berekeningen zou deze investering zichzelf beginnen terugbetalen na 5 tot 9 jaar.

Hoeveel verbeteringen dan worden aangebracht hangt af van de productiviteit van de werklieden: hoeveel kunnen ze de luchtdichtheid verbeteren binnen 1 uur. Eerst worden de meest evidente luchtlekken aangepakt, dus naarmate men meer werk verricht daalt de productiviteit. Tijdens de aanpassingen moet dus om het uur of om de twee uur in een woning de luchtdichtheid gemeten worden om de productiviteit te evalueren. Op die manier kan telkens een kosten-baten analyse gemaakt worden: men moet met twee personen op twee uur de lucht volumestroom verminderen met meer dan 300 tot 400 m³/h, anders is het niet langer economisch verantwoord (misschien wel ecologisch).

7.5.3) Relatief aandeel infiltratie in totaal energieverbruik

We kunnen de besparingen wel berekenen in absolute waarde, maar als we het relatieve aandeel willen berekenen moeten we dit vergelijken met de absolute waarde van onder meer de transmissieverliezen. In de SENVIVV-studie [21] vinden we dat de gemiddelde compactheid van de woningen in open bebouwing is 1,24 en de gemiddelde U-waarde is 0,824. Uit de formule[49]:

$$Q_h = 0,024 \cdot V \cdot [(U/C) + 0.34n] \cdot G_b^a$$

kan men dan het relatieve aandeel berekenen van infiltratie. U/C is gelijk aan $0,824/1,24$ of $0,6645$. Het ventilatievoud n varieert van $0.5h^{-1}$ tot $1.5h^{-1}$, voor sommige woningen zelfs tot $3.5h^{-1}$.

$n = 0,5$ resulteert in een relatief aandeel van 20.4%

$n = 1,0$ resulteert in een relatief aandeel van 33.8%

$n = 1,5$ resulteert in een relatief aandeel van 43.4%

$n = 2,0$ resulteert in een relatief aandeel van 50.6%

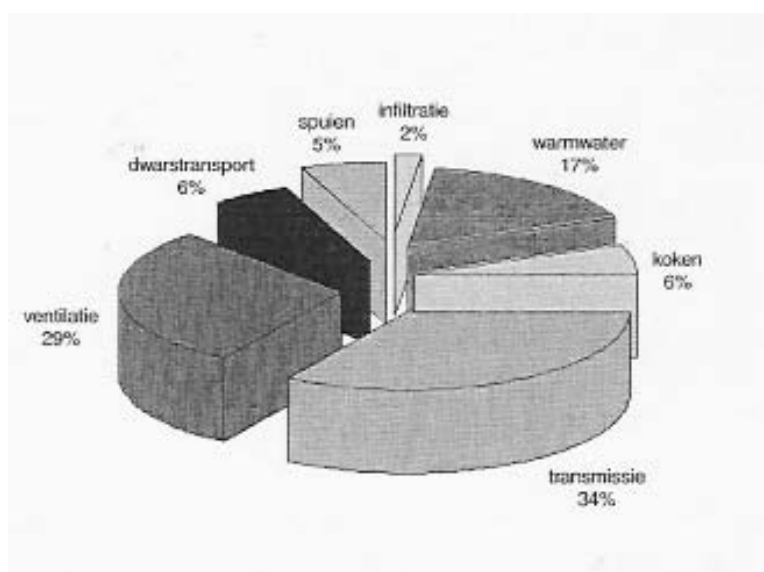
$n = 2,5$ resulteert in een relatief aandeel van 56.1%

$n = 3,0$ resulteert in een relatief aandeel van 60.6%

Deze waarden zijn dus representatief voor het totale energieverlies door ventilatie. Een deel daarvan is gewenste ventilatie, een deel is ongewenste infiltratie. Vooral dat aandeel van de ongewenste infiltratie is interessant. Stel nu dat een woning een werkelijke infiltratie heeft van 1,0 volumewisseling per uur, en slechts een ventilatievoud van $0,5h^{-1}$ nodig heeft, dan is er een ongewenste infiltratie die een relatief aandeel heeft van 17% in de totale energiebalans. Zijn er 3.0 volumewisselingen per uur terwijl er slechts 0.5 nodig zijn, dan kan het relatieve aandeel oplopen tot 50.5%. Dit kunnen we niet enkel toeschrijven aan de luchtdichtheid van de woning, ook bewonersgedrag heeft een grote invloed op het ventilatievoud. Als men al te vaak ramen en deuren open zet, zal het ventilatievoud hoog blijven ook al is de woning zeer luchtdicht afgewerkt. Anderzijds kan een verkeerde dimensionering en onoordeelkundige plaatsing van roosters ook verliezen met zich meebrengen.

Dit bewijst nogmaals dat luchtdichtheid vooral moet gezien worden binnen een integrale aanpak van het ventilatiesysteem, en niet als alleenstaande bouwtechnische eigenschap.

In ‘Handboek Vocht & Ventilatie’ van SBR [16] vinden we volgende figuur:



Figuur 87. “de energiestromen in een eengezinswoning met vier personen” [16]

Spuien is de ventilatie die doelbewust veroorzaakt wordt door het openzetten van ramen en deuren, en dwartransport kunnen we ook bij infiltratie rekenen. Infiltratie is hier dus verantwoordelijk voor 8% van de energiestromen. Verder worden geen specificaties gegeven over het type woning, het temperatuursregime, ventilatievoud en dergelijke meer.

7.6) Normen en voorschriften

De voorschriften in verband met het verloop van de blowerdoor proef werden reeds beschreven in hoofdstuk 1.

7.6.1) België

In de Belgische ventilatienorm[24] NBN D50-001 worden aanbevelingen gegeven voor woningen met mechanische ventilatie: $n_{50} \leq 3,0h^{-1}$ zonder warmterecuperatie, en $n_{50} \leq 1,0h^{-1}$ met warmterecuperatie. Voor woningen met natuurlijke ventilatie worden geen aanbevelingen gedaan.

Op 1 januari 2006 gaat de nieuwe EnergiePrestatieRegelgeving [31] [79] [80] [81] van kracht in België (die de ventilatienorm niet opheft). In bijlage 1 van ‘Besluit van de Vlaamse Regering tot vaststelling van de eisen op het vlak van de energieprestaties en het binnenklimaat in gebouwen’ staat ‘de bepalingsmethode van het peil van primair energiegebruik in woongebouwen’. Indien er een luchtdichtheidsmeting wordt uitgevoerd conform de bepalingen gespecificeerd in NBN EN 13829, dient men de infiltratie als volgt te bepalen:

$$V_{in/exfilt} = 0,04 \cdot V_{50} \cdot A_T \text{ [m}^3\text{/h]}$$

Waarbij: $V_{in/exfilt}$ = gemiddeld in/exfiltratiedebiet [m³/h]

V_{50} = het lekdebiet bij een drukverschil van 50 Pa, gedeeld door de oppervlakte die het luchtdicht volume ontsluit (ook q_{50}) [m³/h.m²]

A_T = gebouwschiloppervlakte [m²]

Ten eerste is het onzinnig de gemeten lucht volumestroom eerst te delen door de grenzen van het ‘luchtdicht beschermd volume’ en dan te vermenigvuldigen met de oppervlakte van het ‘thermisch beschermd volume’. Dit is eigenlijk ook tegenstrijdig met prEN 13829. Ten tweede is het niet verantwoord een q_{50} -waarde te hanteren om normen op te stellen: op die manier worden minder compacte woningen bevoordeeld. Ten derde wordt de infiltratie lager ingeschat dan ze werkelijk is, geen enkele schattingsmethode is zo optimistisch. Dit kan misschien begrepen worden als beloning voor de opdrachtgevers die zo’n test laten uitvoeren.

Indien er geen meting conform NBN EN 13829 gedaan wordt, stelt men $V_{50} = 12 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$. Als we dit omrekenen met de gegevens van de SENVIVV-studie ($C = 1.24$, $V = 516\text{m}^3$) is dit vergelijkbaar met een n_{50} -waarde van 9,7 volumewisselingen per uur voor woningen in open bebouwing, wat vrij goed klopt met de werkelijkheid.

Helaas is er op het moment dat deze thesis geschreven wordt nog geen berekeningssoftware beschikbaar om de invloed van de luchtdichtheid op het peil van het primair energieverbruik te evalueren.

7.6.2) Nederland[11] [12] [13] [17] [66] [69]

In artikel 71 van het Bouwbesluit wordt een eis gesteld aan de luchtdichtheid van woningen. In het artikel staat dat volgens NEN 2686 de luchtvolumestroom door alle scheidingsconstructies van verblijfsruimtes of sanitaire ruimtes samen niet meer dan $0,2\text{m}^3/\text{s}$ mag bedragen bij een drukverschil van 10 Pa [66]. Dit komt overeen met een luchtvolumestroom van 1968m^3 per uur bij een drukverschil van 50 Pa, of met een n_{50} -waarde van 3.8h^{-1} (als het gemiddelde binnenvolume gelijk is aan 516m^3). Momenteel voldoet 10% van alle nieuwbouwwoningen in Nederland niet aan deze richtlijn.

Anderzijds worden er ook richtwaardes naar voor geschoven die de luchtdichtheid uitdrukken per vierkante meter gebouwschil: voor woningen met natuurlijke ventilatie $1,0 - 1,43 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$, (of $q_{50} = 35,4 - 50,7 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$), en $0,625 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ voor woningen met balansventilatie (of $q_{50} = 22,1 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$).

De ondergrens van $1,0 \text{ dm}^3/\text{s.m}^2$ bij natuurlijke ventilatie is om te garanderen dat er voldoende verse lucht binnendringt in de woning.

Verder is er voor woongebouwen nog een eis volgens NEN 2690 dat de luchtdichtheid van de begane grondvloeren beter of gelijk moet zijn aan $0.020\text{dm}^3/\text{s}$ per vierkante meter bij een drukverschil van 1 Pa, dit komt overeen met $q_{50} = 0,8 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$.

Voor gebouwen die niet voor bewoning bestemd zijn geldt volgende eis: de luchtdoorlatendheid van het geveloppervlak moet kleiner zijn dan $1,8 \text{ dm}^3/(\text{s.m}^2)$ (of $q_{50} = 63,8 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$) voor gebouwen met te openen ramen, en $0,5 \text{ dm}^3/(\text{s.m}^2)$ (of $q_{50} = 17,7 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$) voor geheel gesloten gebouwen. [66]

In Nederland is met NPR 5129:2002 een regelgeving in voege getreden die het primair energiegebruik in woningen aan banden legt. Bij die regelgeving is er een softwarepakket ter beschikking gekomen om de berekeningen sneller en eenvoudiger uit te kunnen voeren. Bij het programma zijn twee voorbeeldwoningen opgenomen. Voor elke woning stijgt de EnergiePrestatieCoëfficiënt met 0.01 per eenheid dat de n_{50} -waarde groter wordt. Dus als de n_{50} -waarde teruggebracht wordt van 10 h^{-1} naar 3 h^{-1} zal de EPC met 0.07 dalen. Bij de ene woning ging de toename van de n_{50} -waarde met 1 volumewisseling gepaard met ongeveer 500 MJ extra energiebehoefte, bij de andere woning 8.500 MJ extra, maar deze woning is dan ook 18 maal zo groot.

Als q_{v10} groter wordt dan $200 \text{ dm}^3/\text{s}$ geeft het programma bij de resultaten een waarschuwing dat de infiltratie niet voldoet aan de eis van het bouwbesluit.

7.6.3) Duitsland[9] [10] [71]

In DIN 4108-7:2001 vinden we voor woningen met natuurlijke ventilatie ' $n_{50} < 3.0 \text{ h}^{-1}$ '. Voor woningen met mechanische ventilatie, hetzij afzuiging, hetzij pulsie, hetzij gebalanceerde ventilatie, wordt een n_{50} -waarde voorgeschreven kleiner of gelijk aan 1.0 h^{-1} . Lage energiewoningen met RAL-certificaat moeten voldoen aan ' $n_{50} < 1.0 \text{ h}^{-1}$ ', en passiefwoningen moeten voldoen aan ' $n_{50} < 0.6 \text{ h}^{-1}$ '.

7.6.4) Zweden[9] [23]

In 1975 heeft Zweden als eerste land ter wereld een streefwaarde voor luchtdichtheid vooropgesteld ($n_{50} < 4.5 \text{ h}^{-1}$). In 1980 zijn er dan enkele aanpassingen opgenomen in de Zweedse bouwnorm: de n_{50} -waarde moet bij woningen voor één gezin beperkt worden tot 3.0 h^{-1} , voor andere woongebouwen tot twee verdiepingen moet de n_{50} -waarde beperkt worden tot 2.0 h^{-1} , en voor gebouwen met meer dan twee verdiepingen tot 1.0 h^{-1} .

In de huidige bouwnorm wordt de luchtdichtheid uitgedrukt in functie van de gebouwschiloppervlakte door een q_{50} -waarde: voor woongebouwen geldt ' $q_{50} < 3 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ '. Voor een woning met compactheid 1 komt dit overeen met $n_{50} < 3 \text{ h}^{-1}$. De gemiddelde compactheid van de woningen in de SENVIVV-studie is 1.24, waarvoor de Zweedse norm overeen komt met de voorwaarde ' $n_{50} < 2.42 \text{ h}^{-1}$ '. Compacte woningen moeten dus aan strengere eisen voldoen dan woningen die minder compact zijn. Dit bevestigt onze stelling dat men in normen n_{50} -waardes moet opleggen in plaats van q_{50} -waardes.

7.6.5) Noorwegen[9]

In Noorwegen is in 1987 een classificatie ingevoerd voor luchtdichtheid: de n_{50} -waarde moet bij woningen voor één gezin beperkt worden tot 4.0 h^{-1} , voor andere woongebouwen tot twee verdiepingen moet de n_{50} -waarde beperkt worden tot 3.0 h^{-1} , en voor gebouwen met meer dan twee verdiepingen tot 1.5 h^{-1} .

7.6.6) Zwitserland[9] [77]

In de Zwitserse norm SIA 180 (1988) geldt bij natuurlijke verluchting ' $2 \text{ h}^{-1} < n_{50} < 4.5 \text{ h}^{-1}$ '. Ook hier is er een ondergrens van twee volumewisselingen per uur om te garanderen dat er voldoende verse lucht binnendringt in de woning. Als er enkel mechanische afzuiging is dan moet ' $2 \text{ h}^{-1} < n_{50} < 3 \text{ h}^{-1}$ ', en als er gebalanceerde ventilatie is met warmterecuperatie moet ' $n_{50} < 1 \text{ h}^{-1}$ ', en is er geen ondergrens. Men kan zich afvragen of dit wel veilig is in het geval van stroompannes en defecten: op die momenten kan niet voldoende verse lucht de woning binnentreden. [76]

7.6.7) Canada

In Canada is er een project opgestart om lage energie woningen te promoten en te bouwen, het R2000-programma. In sommige regio's voldoen al meer dan 20% van alle woningen aan de R2000 standaard. Bij die nieuwbouwwoningen wordt geëist dat ' $n_{50} < 1.5 \text{ h}^{-1}$ '. [78]

De Canadese bouwnorm van 1995 (National Building Code of Canada) vraagt een minimum luchtdichtheid van de materialen ' $q_{50} < 0.056 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ', ongeveer gelijkwaardig met een ongeverfde gipskartonplaat van 12,5mm dik. Dit getal mogen we niet relateren aan waarden bekomen uit blowerdoor metingen, want hier legt men enkel een materiaaleigenschap op, en houdt men geen rekening met de invloed van aansluitingen, voegen en schrijnwerk.

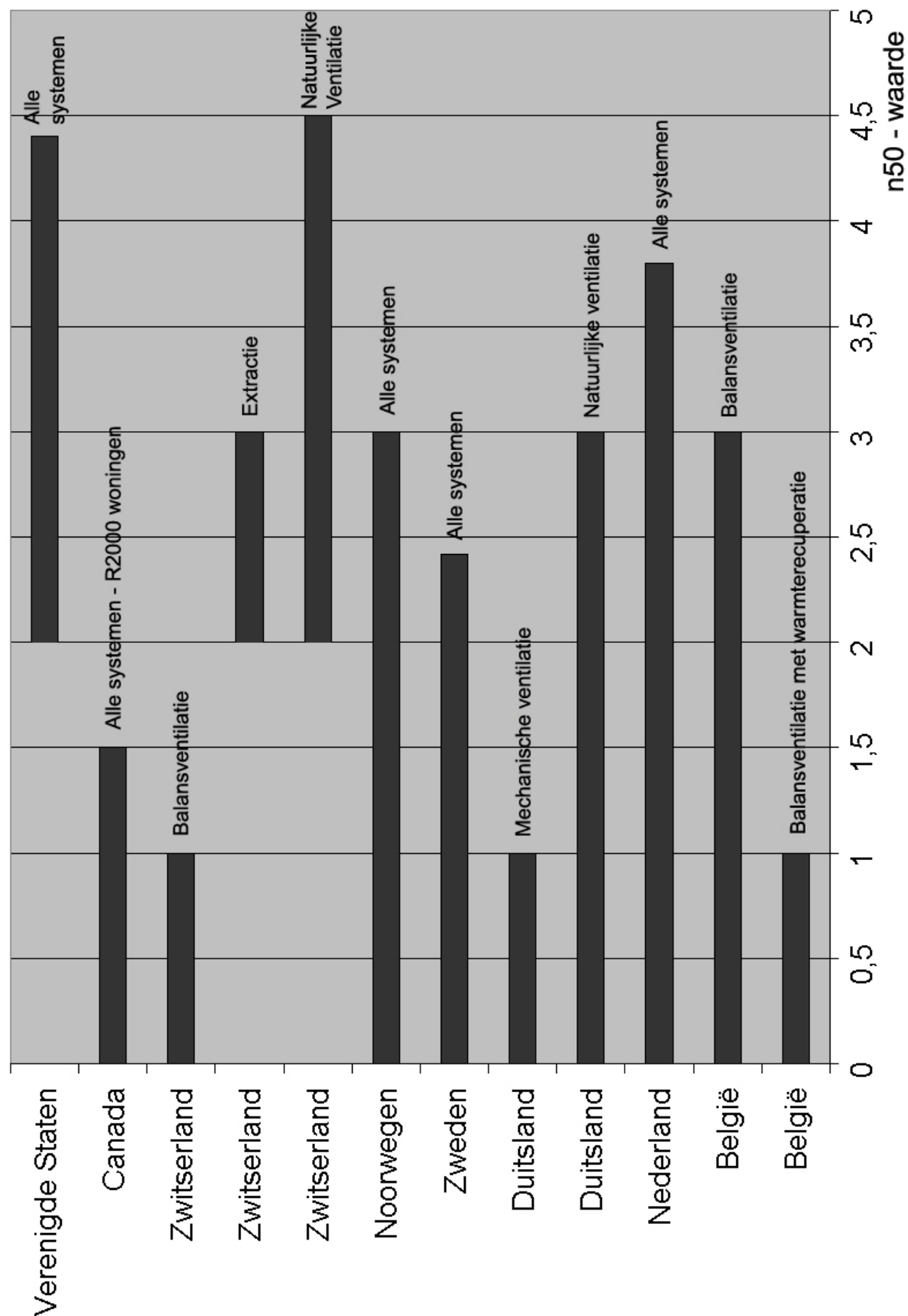
7.6.8) Verenigde Staten

Ooit hebben de staten Minnesota en Wisconsin gesteld dat de gemeten luchtvolumestroom bij een drukverschil van 50 Pa kleiner moet zijn dan respectievelijk 2039m³/h en 2549m³/h. Deze waarden zijn dan overgenomen door veel andere staten. [86]

Ook hier is er een ondergrens van twee volumewisselingen per uur bij natuurlijke ventilatie om te garanderen dat er voldoende verse lucht binnendringt in de woning.

7.6.9) Besluit

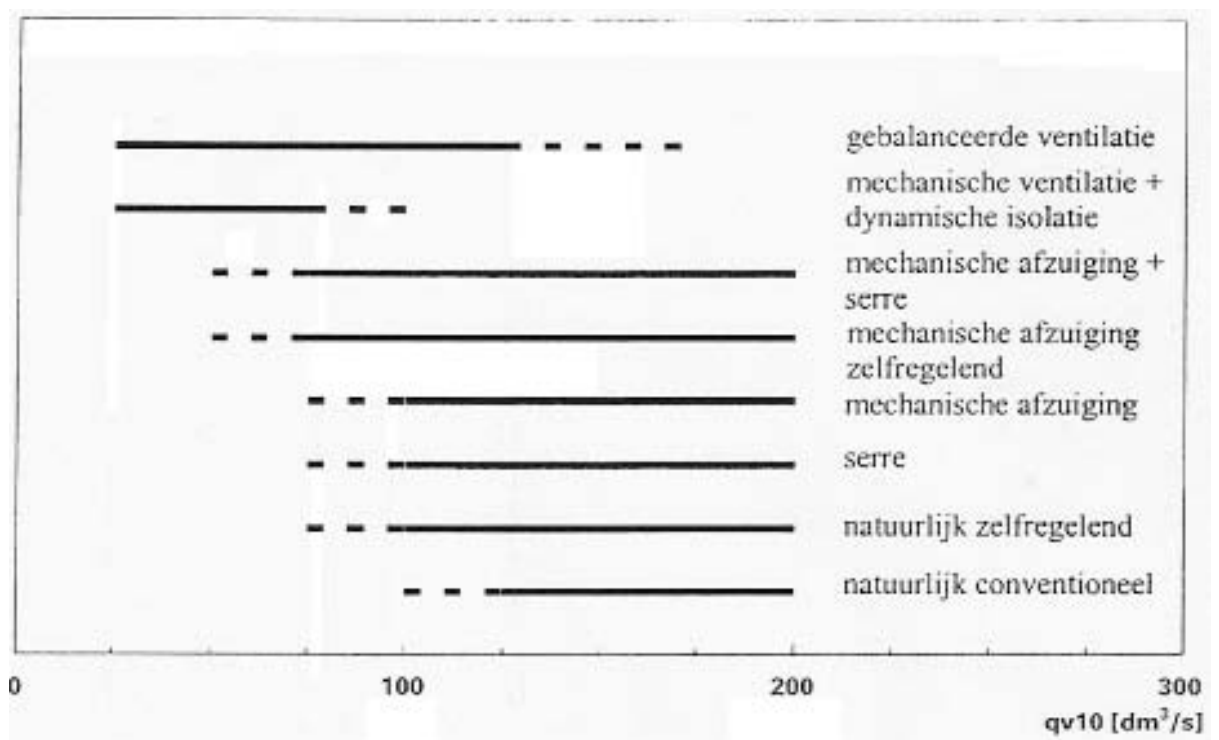
In figuur 85 worden de verschillende eisen in een aantal landen vergeleken. De normen die niet opgesteld zijn in functie van een n_{50} -waarde hebben we omgerekend met volgende gegevens: binnenvolume 516m³, gebouwschiloppervlak 416m², compactheid 1.24 (gegevens uit SENVIVV-studie voor woningen in open bebouwing). In de Verenigde Staten geldt de ondergrens voor luchtdichtheid dus enkel voor woningen met natuurlijke verluchting.



Figuur 88. “de verschillende eisen naar luchtdichtheid naargelang het ventilatiesysteem”

7.7) Luchtdichtheid in functie van ventilatiesysteem

In figuur 89 wordt de toepasbaarheid van enkele ventilatiesystemen gegeven in relatie tot de luchtdichtheid volgens de Nederlandse wetgeving. Een waarde $q_{v10} = 100$ komt ongeveer overeen met een luchtdichtheid $n_{50} = 1.9 \text{ h}^{-1}$, en $q_{v10} = 200$ komt ongeveer overeen met een luchtdichtheid $n_{50} = 3.8 \text{ h}^{-1}$.



Figuur 89. “aangewezen ventilatiesysteem in functie van luchtdichtheid - SBR” [15]

In ‘gebouwen en installaties’ van H.Hens vinden we volgende tabel die het verband weergeeft tussen luchtdichtheid en ventilatiestrategie. Deze komt vrij goed overeen met de gegevens van SBR.

n_{50} in h^{-1}	Wijze van ventileren	
> 13	Te luchtopen	
8 - 13	Gematigd klimaat	Natuurlijke ventilatie via infiltratie
	Koud klimaat	Te luchtopen
5 - 8	Gematigd klimaat	Te luchtdicht voor natuurlijke ventilatie via infiltratie, te luchtopen voor gestuurde ventilatie
	Koud klimaat	Te luchtopen
3 - 5	Gematigd klimaat	Gestuurde natuurlijke ventilatie of afzuigventilatie
	Koud klimaat	afzuigventilatie
1 - 3	Gematigd klimaat	Gebalanceerde ventilatie
	Koud klimaat	Gebalanceerde ventilatie
< 1	Gematigd klimaat	Gebalanceerde ventilatie met warmterecuperatie
	Koud klimaat	Gebalanceerde ventilatie met warmterecuperatie

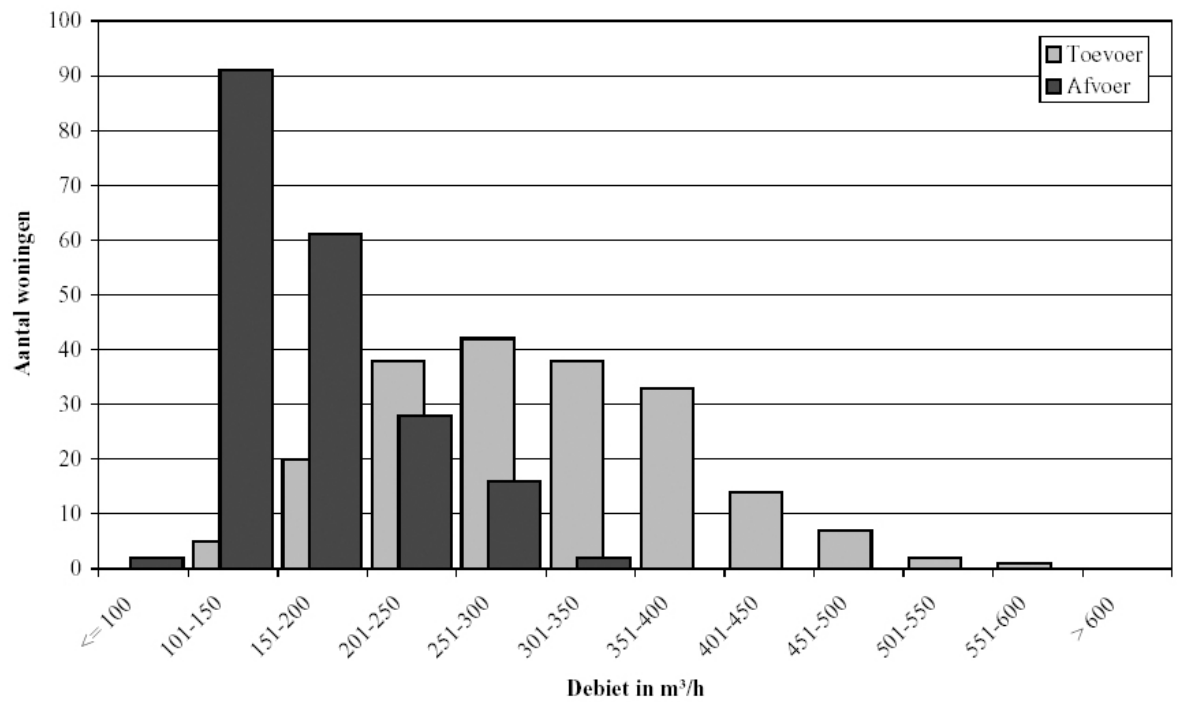
Tabel 82. “aangewezen ventilatiesysteem in functie van luchtdichtheid – H.Hens” [68]

7.8) Minimale ventilatie

In de ASHRAE Standard 62-1989 staat dat elke persoon in een woning 25.5 m^3 verse lucht per uur moet krijgen (bij rokers het dubbele of het driedubbele), en een tweede voorwaarde is dat het ventilatievoud van een woning minstens 0,35 moet bedragen. [6] [75]

In Nederland wordt in woningen met natuurlijke ventilatie een minimale ondergrens van $q_{v,10} = 1,0 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ gehanteerd, of $q_{50} = 9,84 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$, om voldoende verse buitenlucht te garanderen in de woning (men rekent dus op een natuurlijk ventilatievoud gelijk aan 3 h^{-1} , weliswaar bij een drukverschil van 10 Pa). Voor een woning met compactheid 1.24 en binnenvolume 516 m^3 komt dit neer op 7.9 volumewisselingen per uur bij een drukverschil van 50 Pa. [13] [69]

In de SENVIVV-studie is er onderzoek gedaan naar de minimale debieten die per ruimte moeten gehaald worden volgens NBN D50-001. Het gemiddeld benodigd ventilatievoud is 0.60h^{-1} , maar kan sterk variëren: voor grote woningen gaat dit tot 0.3h^{-1} , voor kleine woningen tot 0.95h^{-1} .



Figuur 90. “minimaal benodigde ventilatiestromen volgens NBN D50-001” [20]

8) SENVIVV-studie

8.1) Inleiding

Van 1995 tot 1997 is er een grootschalige studie geweest van woningen door een samenwerking van het WTCB met WenK (departement architectuur, sint Lucas): de SENVIVV-studie [20] [21]. SENVIVV staat voor: Studie van Energieaspecten van Nieuwbouwwoningen in Vlaanderen: Isolatie, Ventilatie en Verwarming. In deze studie zijn 200 woningen op verschillende vlakken getest, waaronder ook luchtdichtheid. Een luchtdichtheidsproef is echter betrekkelijk omslachtig, en uiteindelijk is deze proef op 51 woningen uitgevoerd. Deze gegevens zijn reeds gedeeltelijk verwerkt in het Eindverslag van de SENVIVV-studie van 13/03/1998, maar toch lijkt het ons nuttig hier een diepere analyse te maken van de resultaten.

De SENVIVV-studie is zo ongeveer de enige referentie in België op het gebied van luchtdichtheid. Verschillende instanties en bedrijven beschikken wel over een blowerdoor, maar zelden werkt men volgens de procedure beschreven in ISO/DIS 9972. Op die manier zijn de gegevens onderling niet vergelijkbaar. In het buitenland zijn er wel diverse studies gebeurd, maar vaak is het bijzonder moeilijk om die gegevens te vergelijken met de Belgische context: de constructiemethodes wijken vaak af.

Naast het officiële eindverslag [20] en de bijhorende database [21], maken we ook gebruik van een aantal interne documenten van de werkgroep. Omdat deze niet gepubliceerd zijn, hebben we ze niet opgenomen in de bibliografie.

8.2) Procedure

Het is niet de bedoeling de volledige procedure te beschrijven die bij de metingen gebruikt is, maar toch kunnen we niet voorbijgaan aan enkele duidelijke tekortkomingen in het onderzoek van de SENVIVV-studie.

Een eerste probleem: alle metingen zijn uitgevoerd bij overdruk over de gebouwschil ten opzichte van de buitenomgeving. Internationaal wordt altijd gerekend met het gemiddelde van de resultaten bij overdruk en die bij onderdruk. Door de wet van behoud van massa weten we

dat de infiltratie gelijk is aan de exfiltratie bij woningen zonder mechanische ventilatie, dus zal de invloed van luchtdichtheid evenredig zijn met het gemiddelde van resultaten bij over- en onderdruk. In een document ‘procedure voor het uitvoeren van pressurisiëmetingen’ van 21 maart 1996 kunnen we lezen: “Het is de bedoeling de metingen altijd op overdruk uit te voeren om te vermijden dat er bvb. vuil en roet uit de schouw of het afvoerkanaal van de dampkap in de woning terecht komt.” Verder wordt er in geen enkele tekst argumentatie aangevoerd om enkel metingen te doen bij overdruk. Uit onze proefnemingen blijkt echter dat de volumestroom bij overdruk gemiddeld 80% hoger is dan de volumestroom bij onderdruk. De variatie hierop is echter zo groot (van -2.5% tot 188%) dat we geen redelijke schatting kunnen maken zonder onderdrukmeting.

Een tweede grote tekortkoming is dat men geen correctiefactoren heeft toegepast. Uit onze eigen metingen blijkt dat luchtvolumestroom bij overdruk na correctie tussen de 0.3 en 3.3% afwijkt van de oorspronkelijke waarde (kan in specifieke gevallen oplopen tot 10%). Dit is echter afhankelijk van de weersomstandigheden tijdens de test, we beschikken echter niet over voldoende gegevens om de correctie alsnog uit te voeren.

Een derde probleem: bij 13 metingen waren er roosters niet afgekleefd en bij 4 metingen was het dak nog niet geïsoleerd (dus nog geen dampscherm). Dat zijn samen 17 van de 51 metingen met grove tekortkomingen.

Een vierde probleem: in de Access database van de SENVIVV-studie kunnen we wel de luchtvolumestromen vinden, maar niet de n_{50} -waarde. We vinden in ‘procedure voor het uitvoeren van pressurisiëmetingen’ van 21 maart 1996: “ $n_{50} = Q_{50}/V$ Hierbij is V het beschermd volume van het gebouw: dit is niet het luchtvolume, maar een volume bepaald op basis van de buitenafmetingen”. Helaas vinden we nergens terug hoe deze V werkelijk is berekend. Wij zijn uitgegaan van het nettobinnenvolume van de woning, dat elders in de database terug te vinden was. Internationaal wordt ook altijd met het nettobinnenvolume gerekend, en nergens wordt in de SENVIVV-studie een argumentatie naar voor gebracht om hiervan af te wijken. Het beschermd volume berekenen op basis van buitenafmetingen is gewoon verkeerd, zoals beschreven in hoofdstuk 1.

Nu stelt zich natuurlijk een dilemma: moeten de eigen metingen volgens ISO/DIS 9972 vergeleken worden met gegevens die niet conform zijn? Dit is nogal zinloos: we kunnen enkel

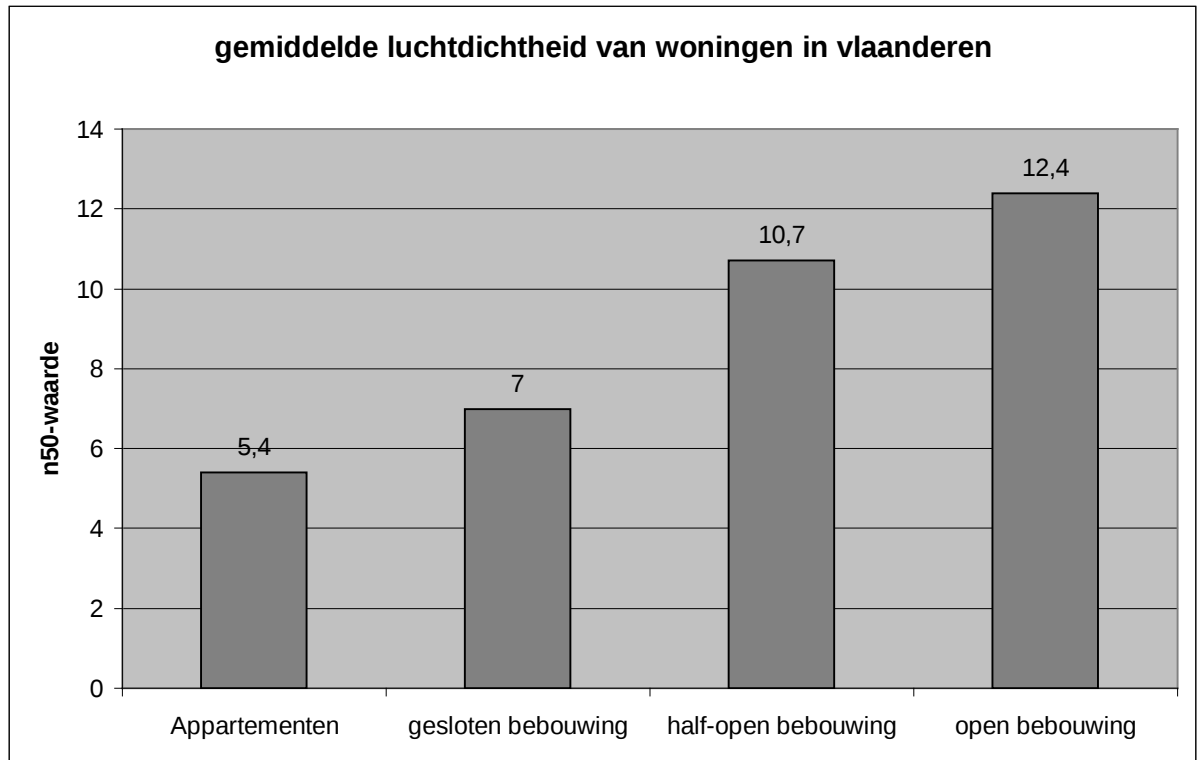
de metingen bij overdruk vergelijken. Bovendien is er geen correctie toegepast op de resultaten, en is 33% van alle metingen gebeurd met open roosters of onafgewerkte zolders.

We moeten dus stellen dat de resultaten van de SENVIVV-studie niet geldig zijn binnen een internationale context. Ook binnen een Vlaamse context kunnen we ons vragen stellen over de geldigheid van de studie op het gebied van luchtdichtheid: is dit nog wel een referentie?

8.3) Analyse

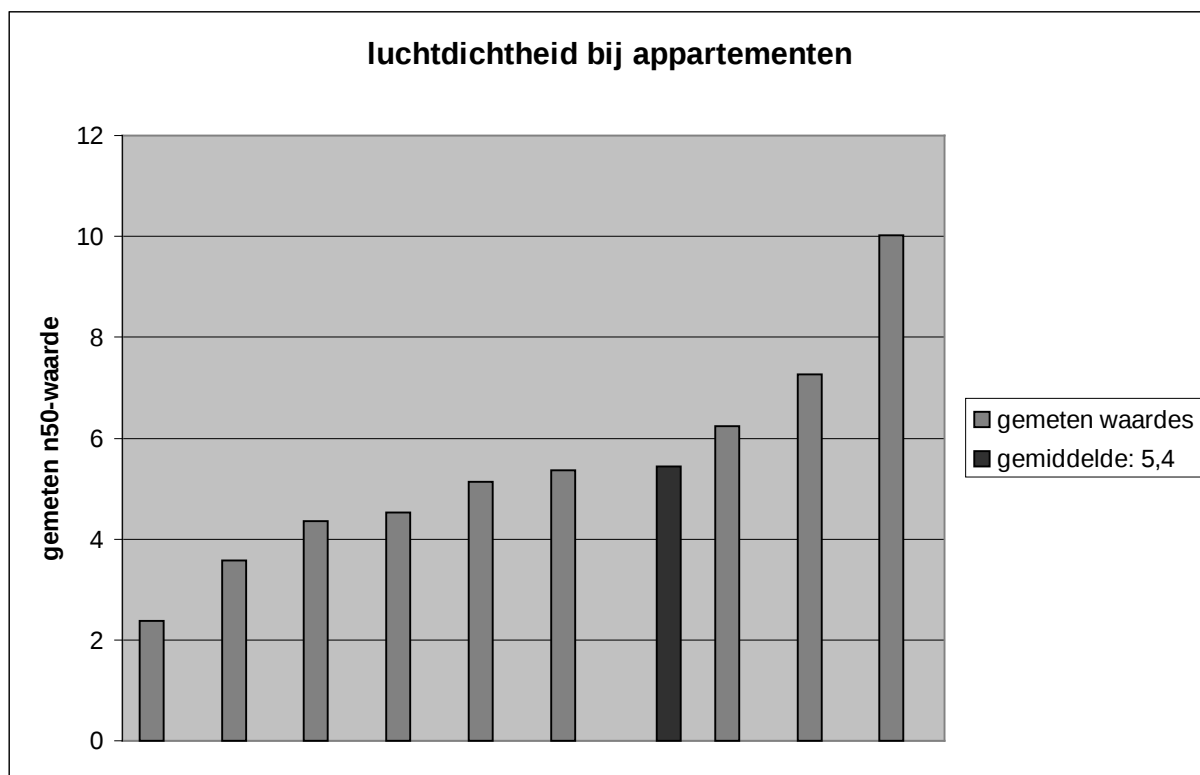
8.3.1) berekeningsmethode n_{50}

In de studie zijn 9 appartementen, 6 woningen in gesloten bebouwing, 9 woningen in halfopen bebouwing en 27 woningen in open bebouwing beproefd. Van de 51 woningen zijn er 48 volgens de traditionele methodes gebouwd, en 3 in houtskeletbouw. Houtskeletbouw is een vrij ongewone constructiemethode en wordt vaak aangewend bij lage-energiewoningen. Dit is hier niet het geval. De resultaten mét en zonder deze woningen in houtskeletbouw zijn onderling vergeleken, en de verschillen zijn niet significant. Daarom zullen we geen onderscheid maken tussen de verschillende constructiemethodes.

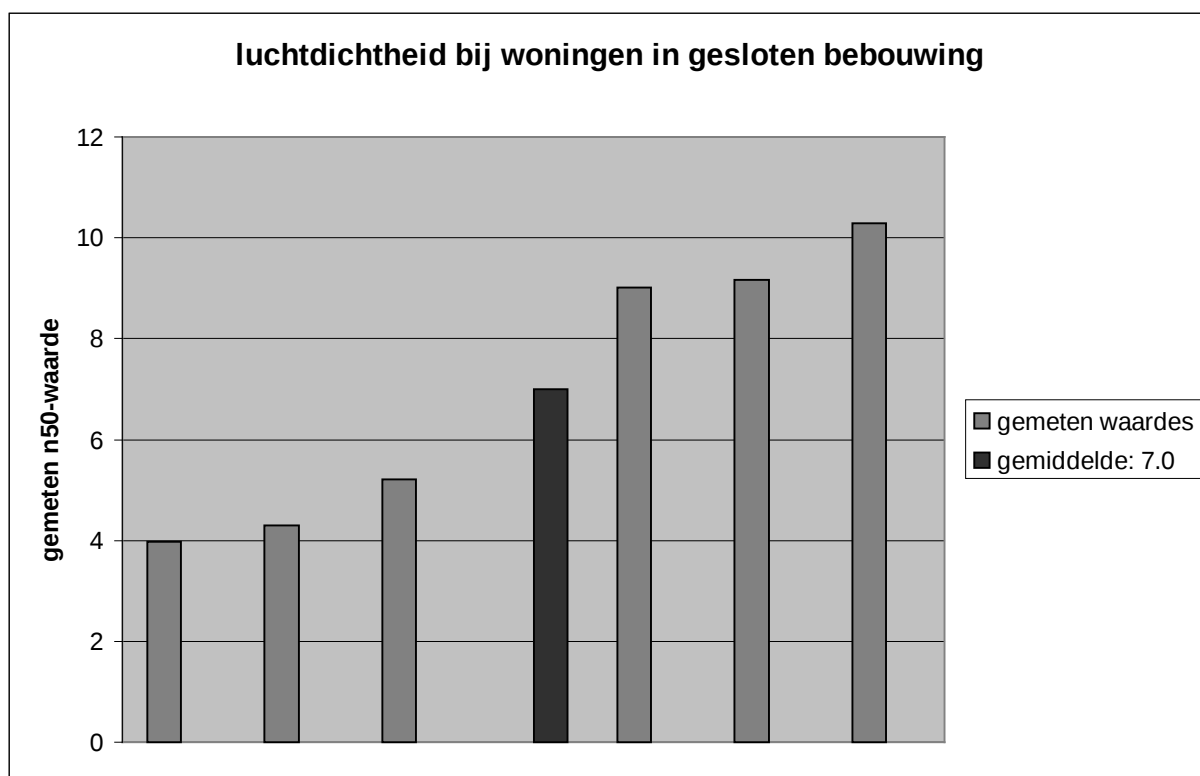


Figuur 91. “gemiddelde n_{50} -waardes naar bouwtypologie”

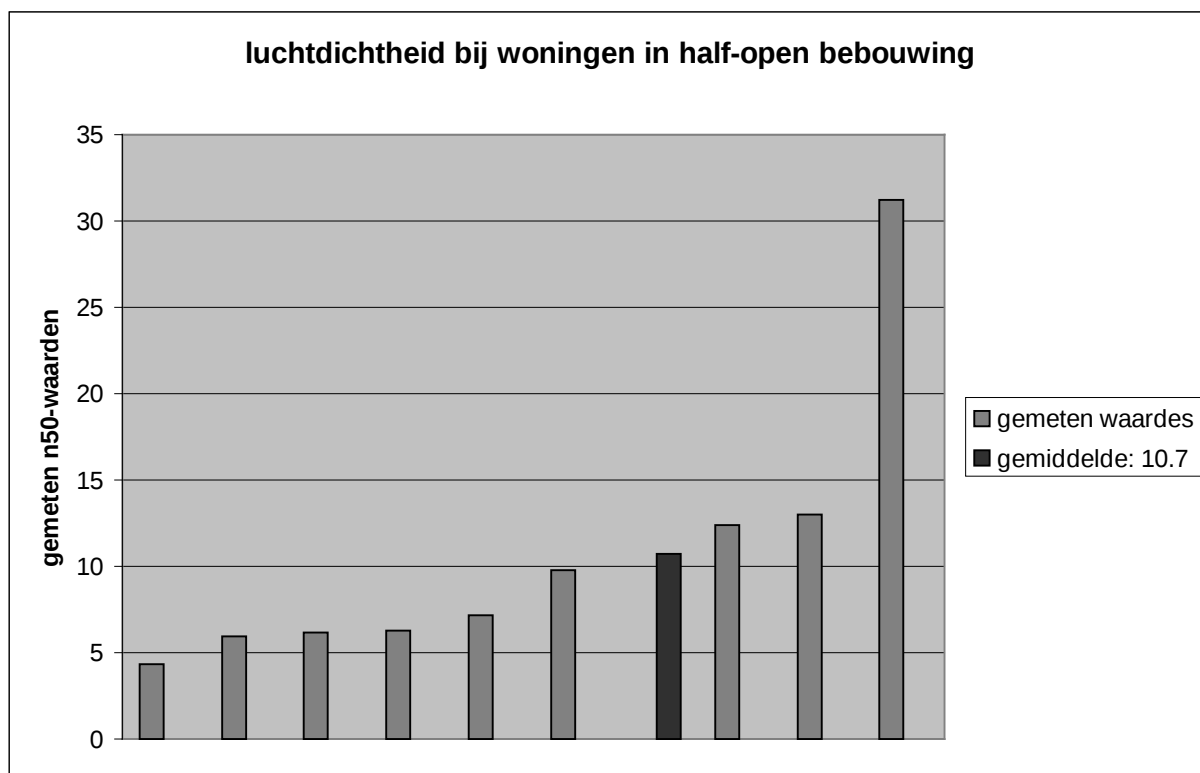
In de publicatie “SENVIVV eindrapport 13/03/1998” [20] heeft men andere gemiddelde waardes gevonden. Voor appartementen 4.1, gesloten bebouwing 5.3, halfopen bebouwing 8.3 en open bebouwing 9.5. We bekomen dus waarden die een stuk hoger zijn dan die uit de studie. Dit kan enkel te maken hebben met de bepaling van het beschermd volume. Wij zijn uitgegaan van het netto binnenvolume, zij hebben berekeningen gemaakt ‘op basis van de buitenafmetingen’. Gemakshalve stelt men al eens dat het netto binnenvolume gelijk is aan 0.8 maal het buitenvolume (vb in Duitsland: WSV 95). Bij onze metingen schommelt dit tussen de 0.64 en 0.77 maal het buitenvolume. Het is mogelijk dat bepaalde zones niet opgenomen zijn in het netto binnenvolume, maar wel in binnen het beschermd volume: voorbeeld de diktes van muren en vloeren. In het access-bestand is bij de selectiequery ‘pressurisatie’ wel het ‘brutovolume’ opgenomen. Na berekeningen hebben we kunnen afleiden dat ze de luchtvolumestroom gedeeld hebben door het brutovolume om een n_{50} -waarde te bekomen. Hoe men tot dit brutovolume gekomen is weten we niet. Het brutovolume is gemiddeld 34% groter dan het nettovolume. Volgens het ‘histogram van de verhouding van het luchtvolume tot beschermd volume’ is de gemiddelde verhouding 0.75, hetgeen overeenkomt met de berekende 34% ($0.75 \times 34\% = 1$). In het Thermisch reglement voor het Waals Gewest stelt men: luchtvolume is gelijk aan 0.8 maal het beschermd volume. Als we nu de gemiddelde waardes van SENVIVV-studie vermenigvuldigen met 1.34, vinden we inderdaad de gemiddeldes die wij berekend hebben. Hoe het beschermd volume dan gerelateerd is aan het buitenvolume kunnen we in de studie niet terugvinden.



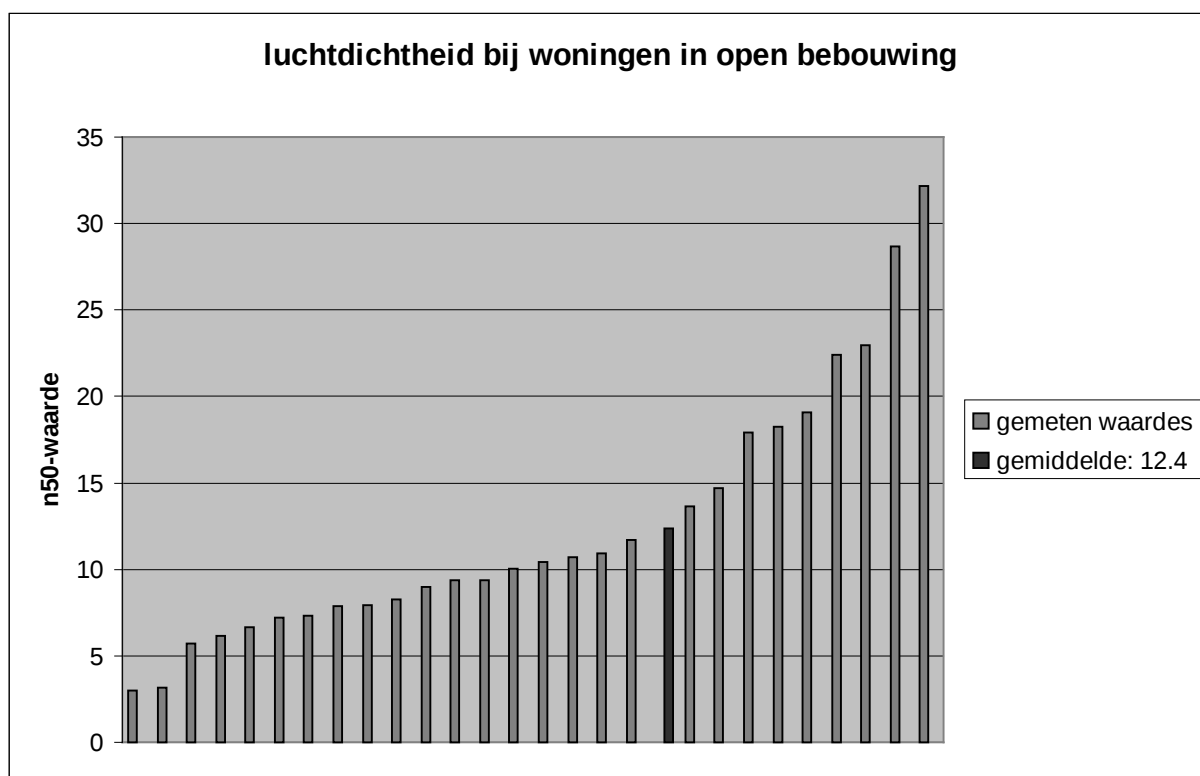
Figuur 92. “gemeten n_{50} -waardes bij appartementen”



Figuur 93. “gemeten n_{50} -waardes bij woningen in gesloten bebouwing”



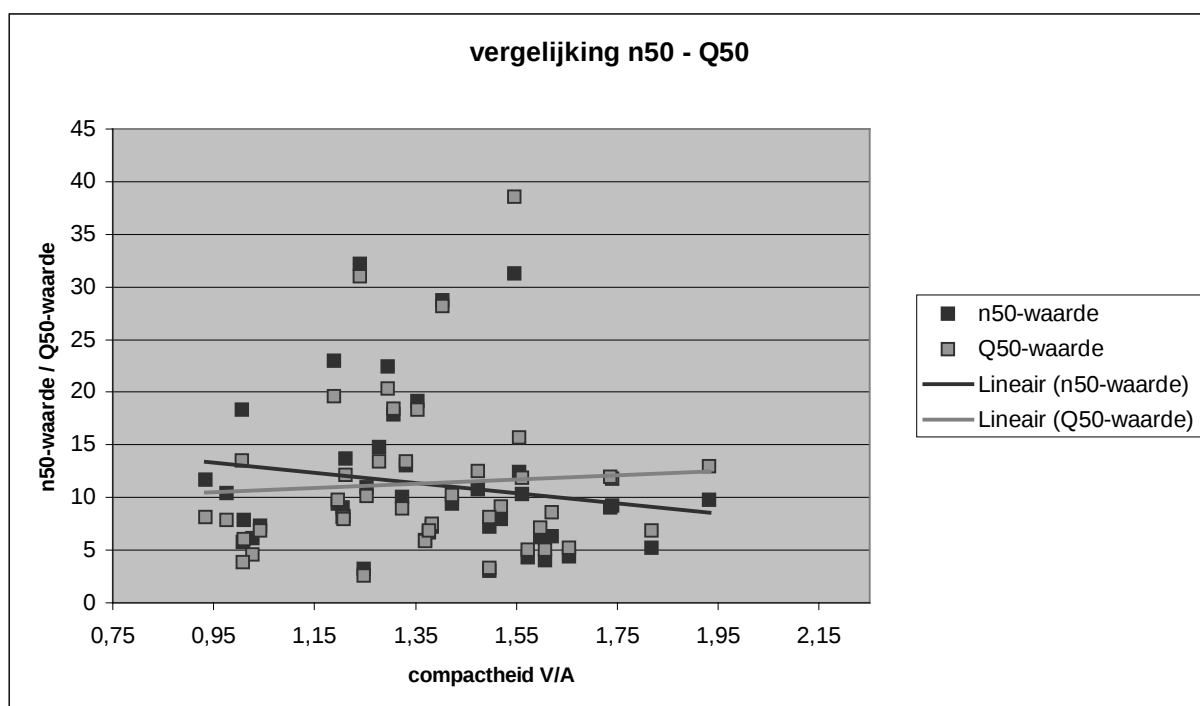
Figuur 94. “gemeten n_{50} -waarden bij woningen in halfopen bebouwing”



Figuur 95. “gemeten n_{50} -waarden bij woningen in open bebouwing”

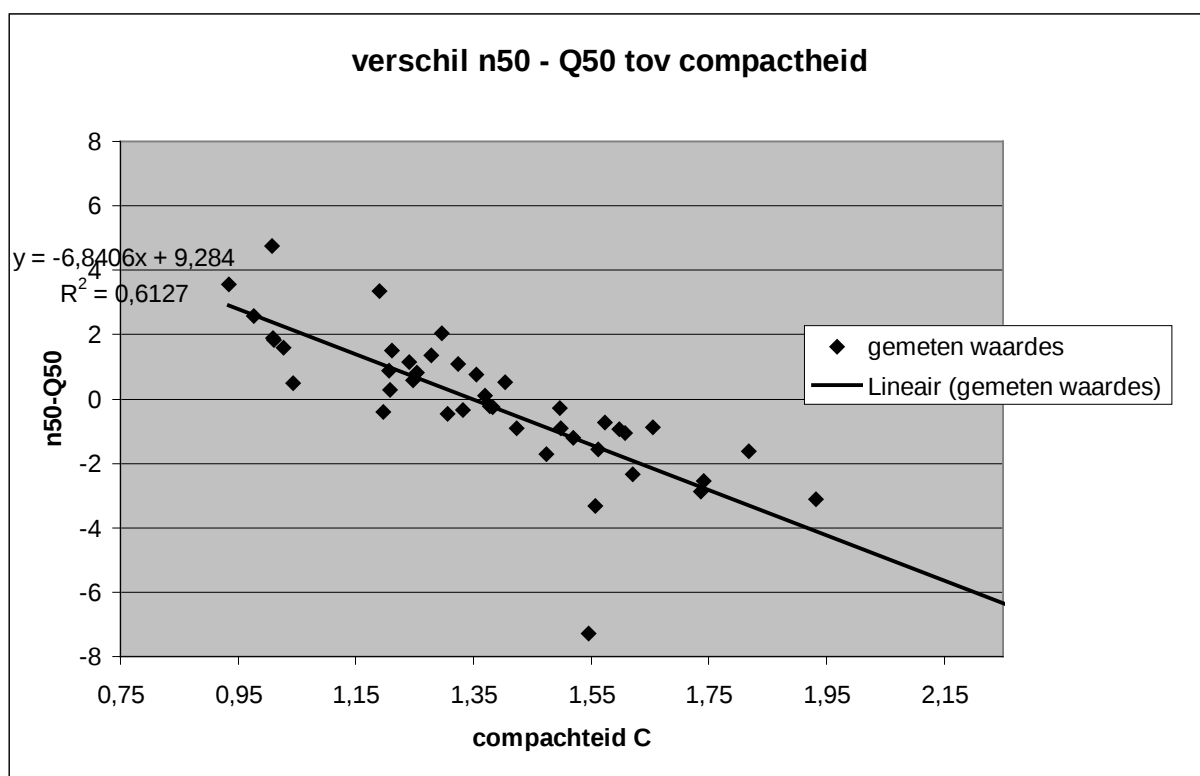
8.3.2) Grootheden

In hoofdstuk 1 in het algemeen en paragraaf 1.2.1.10 in het bijzonder hebben we het belang van grootheden besproken, en de specifieke problemen die er mee gepaard gaan. Is de ‘n₅₀-waarde’ de beste manier om luchtdichtheid te duiden? Moeten we luchtdichtheid relateren aan het binnenvolume of aan de gebouwschiloppervlakte? In de volgende grafiek hebben we zowel de n₅₀-waarde als de Q₅₀-waarde in functie gesteld van de compactheid van een woning.



Figuur 96. “n₅₀ en q₅₀ waarden in functie van compactheid van de woning”

De n₅₀-waarde is omgekeerd evenredig met de compactheid, de q₅₀-waarde is evenredig met de compactheid. Er bestaat geen twijfel over dat compact bouwen een kwaliteit is: voor dezelfde hoeveelheid ‘gebouw’ heeft men minder verliesoppervlakte, dus minder warmteverliezen, en zal men minder fossiele brandstoffen moeten verbranden. Het is dan ook logisch dat bij de bepaling van de K-waarde, een hogere compactheid leidt tot een lager K-peil. Zodoende stimuleert men mensen compacter te bouwen. Als men nu voor luchtdichtheid de n₅₀-waarde hanteert heeft dit het zelfde effect. In onder andere de Nederlandse norm maakt men echter gebruik van q_{v10}-waarde: dit is niet afhankelijk van het binnenvolume, men zal enkel een correctie toepassen als het binnenvolume groter is dan 500m³.



Figuur 97. “verschil n_{50} - q_{50} in functie van compactheid van de woning”

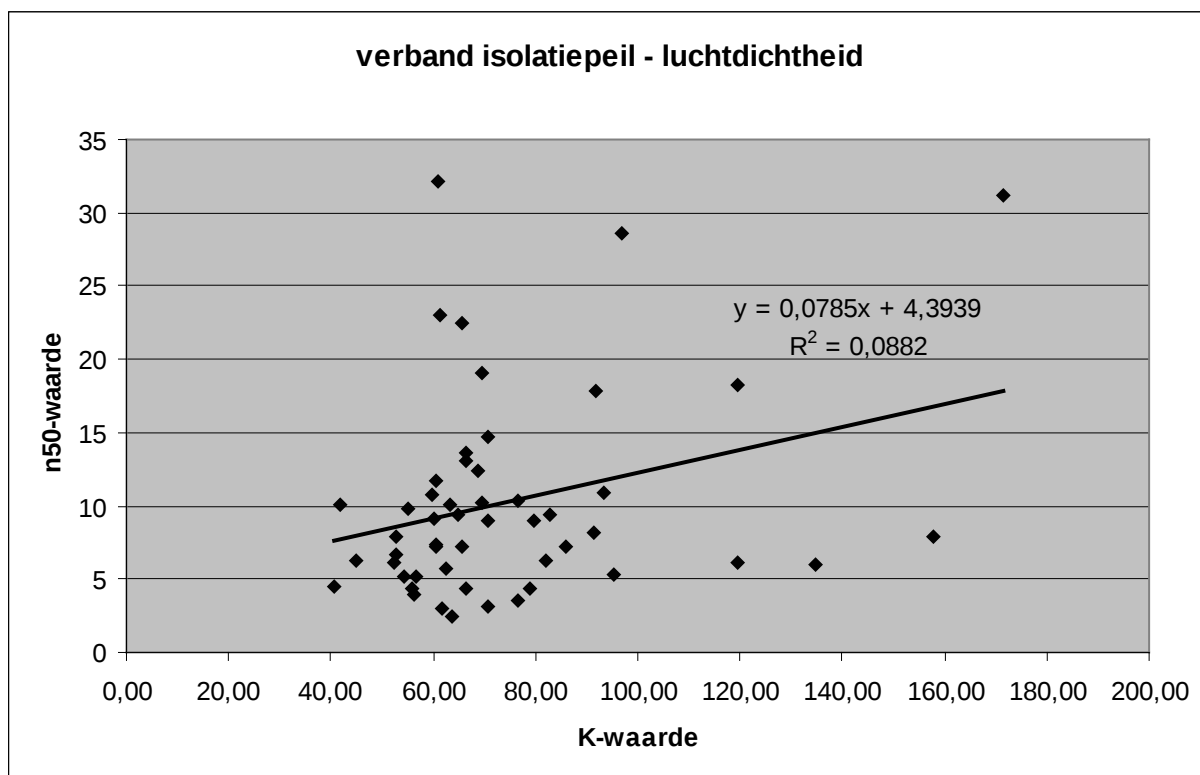
8.3.3) Parameters

8.3.3.1 K-peil

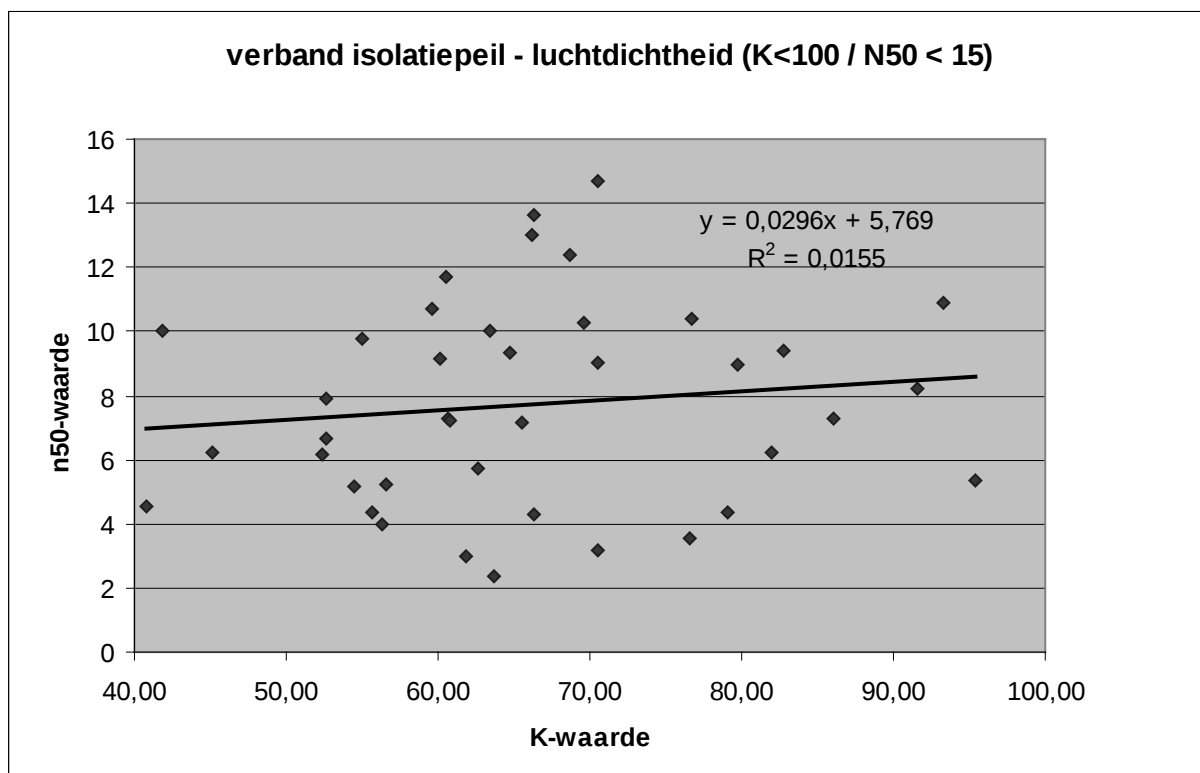
Het K-peil van een woning geeft een indicatie hoe isolerend muren, wanden, ramen, vloeren en daken zijn. Hoe lager het K-peil, hoe beter de woning geïsoleerd is. We kunnen verwachten dat het K-peil gerelateerd is aan de luchtdichtheid van een woning. Hoe beter een woning geïsoleerd is, des te hoger is het relatieve aandeel van ventilatieverliezen, infiltratie en exfiltratie. Een goed geïsoleerd gebouw zal vaak een hogere afwerkingkwaliteit hebben, en zodoende een hogere luchtdichtheid.

Volgens figuur 98 wordt n_{50} ongeveer 0.8 h^{-1} groter per 10 punten dat het K-peil stijgt. Als we de meest extreme waarden er nu uitlaten, en enkel de gegevens toelaten waarvoor de luchtdichtheid beter is dan 15 h^{-1} en het K-peil lager dan 100, dan is de correlatie al een stuk minder duidelijk (figuur 99). Bovendien is de standaard afwijking veel te groot om over significante trends te kunnen spreken.

Hieruit kunnen we besluiten dat het isolatiepeil van een woning geen enkele indicatie geeft over de luchtdichtheid er van. Een laag K-peil is geen garantie voor een hogere afwerkingkwaliteit op het gebied van luchtdichtheid.



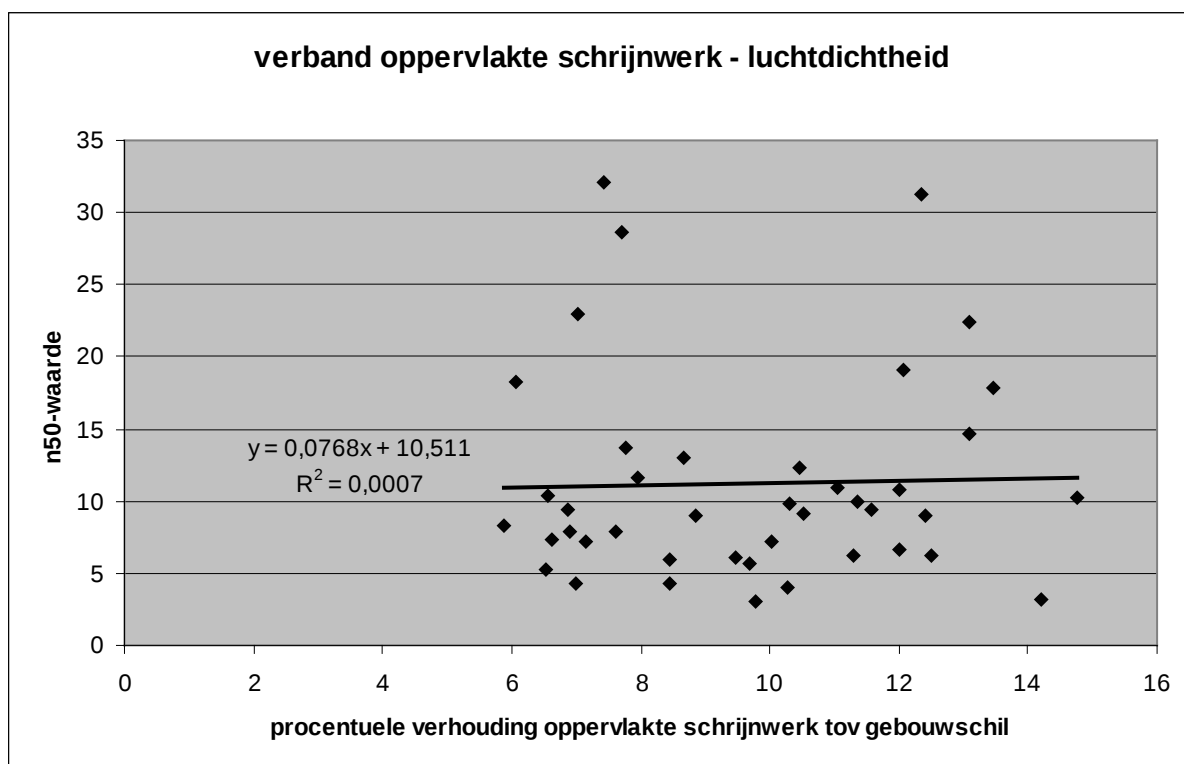
Figuur 98. “verband tussen luchtdichtheid en globaal isolatiepeil”



Figuur 99. “verband tussen luchtdichtheid en globaal isolatiepeil - beperkte selectie”

8.3.3.2 Oppervlakte schrijnwerk

Luchtdichtheid wordt nogal bepaald door de aanwezigheid van kieren en spleten. De aansluiting van ramen of deuren met de wand is meestal een kritieke plaats. Ook opengaande delen zorgen voor extra voegen die de luchtdichtheid kunnen verminderen. Als we nu de luchtdichtheid in grafiek uitzetten ten opzichte van de procentuele verhouding van oppervlakte schrijnwerk tot oppervlakte gebouwschil zal er misschien een correlatie naar voor komen.

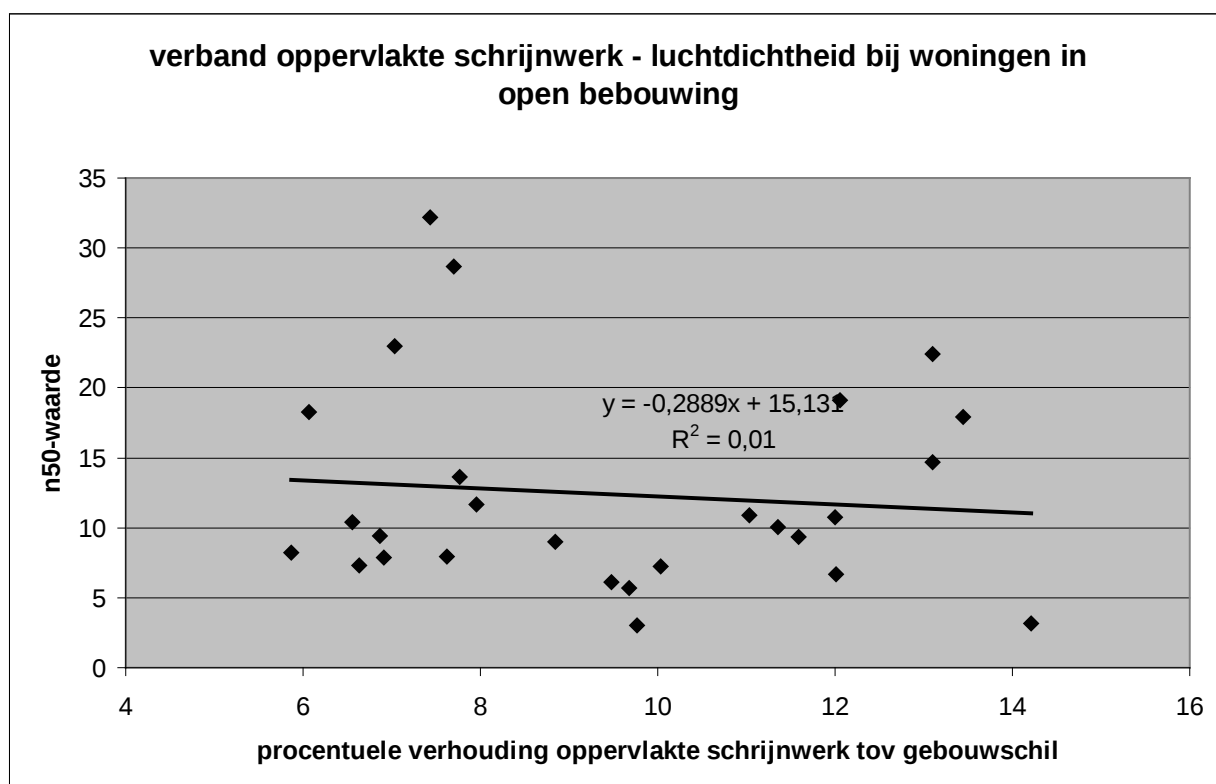


Figuur 100. “verband tussen luchtdichtheid en verhouding oppervlakte glas tot wand”

Uit deze grafiek kunnen we niet opmaken dat de luchtdichtheid gerelateerd is aan de oppervlakte van ramen en deuren. De lichte helling van de rechte is niet significant genoeg om te kunnen stellen dat er een verband bestaat. Bovendien is de gebruikte waarde voor de gebouwschil bepaald om warmtetransmissies te berekenen, en zijn gemene muren ook opgenomen. Dit zal de glaspercentages van bepaalde typologieën kunstmatig laag houden en de resultaten verstoren.

Omdat dit resultaat niet bevredigend is maken we nu een onderscheid naar bouwtypologie. Voor appartementen is het niet mogelijk deze grafiek op te stellen, omdat we niet over

voldoende gegevens beschikken. Voor gesloten en halfopen bebouwing weten we niet welk percentage van de gebouwschil gemene muren zijn, en daarom is de procentuele verhouding schrijnwerk tot gebouwschil waarschijnlijk niet correct. (Als we de gegevens toch verwerken blijkt er voor die categorieën toch een evenredigheid te zijn. Toch willen we deze niet publiceren omdat de betrouwbaarheid niet kan ingeschat worden en ook het aantal woningen waarover we beschikken in de afzonderlijke typologieën te klein is.) We kunnen dus enkel een zinvolle grafiek opstellen voor woningen in open bebouwing.



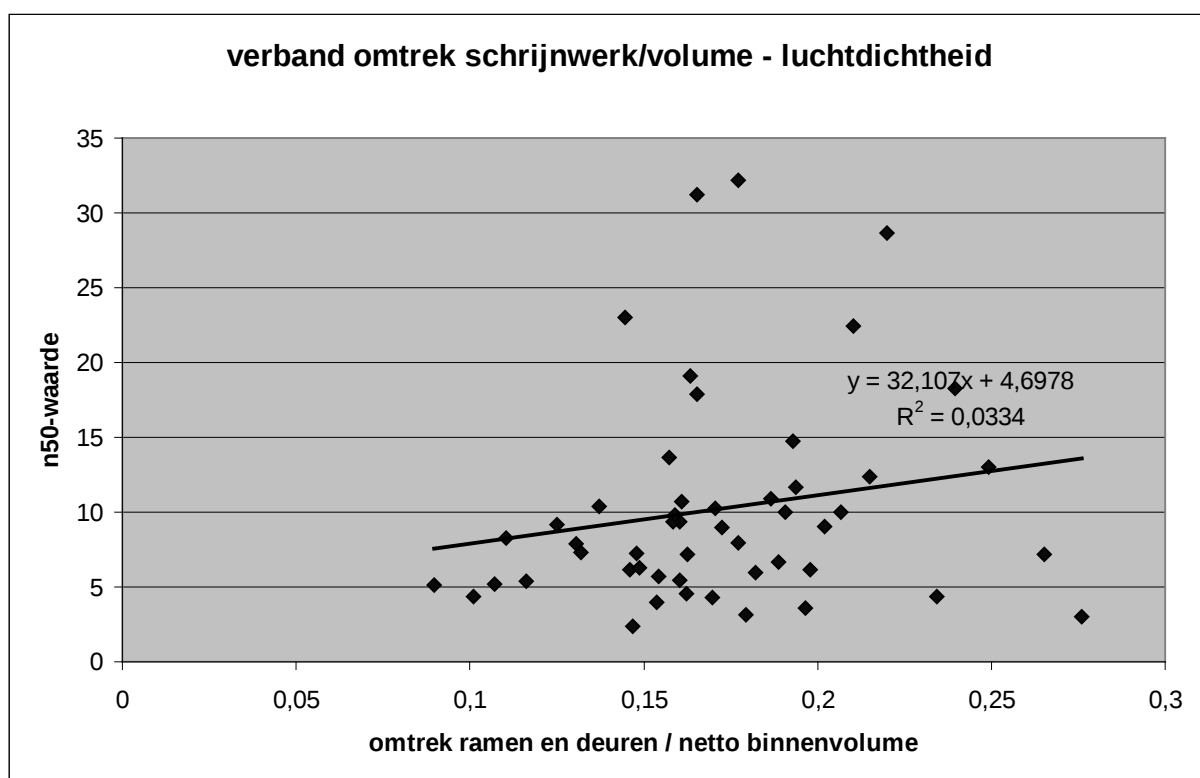
Figuur 101. “verband tussen luchtdichtheid en verhouding oppervlakte glas tot wand – voor woningen in open bebouwing”

Nu blijkt dat de luchtdichtheid daalt naarmate er een relatief grotere oppervlakte glas is, in tegenstelling tot hetgeen we zouden verwachten. Blijkbaar is de oppervlakte van ramen en deuren geen goede parameter om de invloed op luchtdichtheid in te schatten.

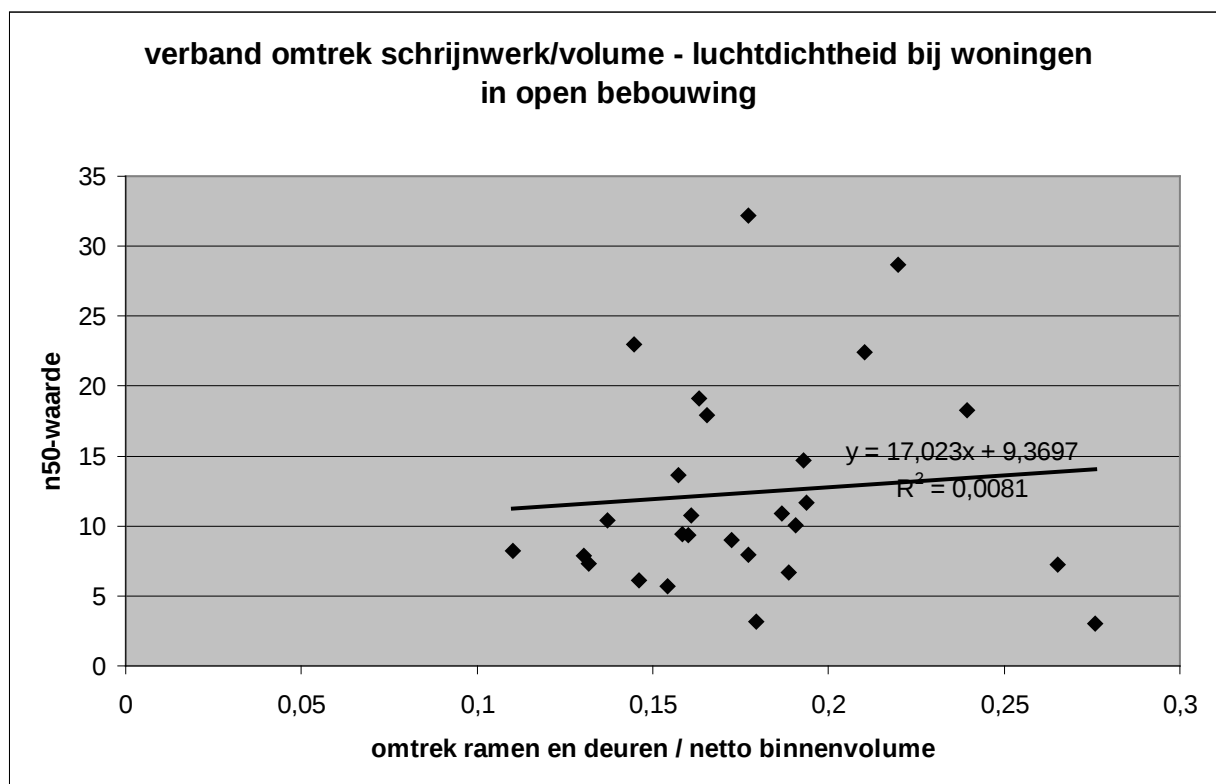
8.3.3.3 Omtrek schrijnwerk

In principe is het niet de oppervlakte maar de omtrek van schrijnwerk die bepalend is voor het aantal voegen en spleten. Nu zouden we de luchtdichtheid kunnen uitzetten ten opzichte van de omtrek van ramen en deuren, maar het is vooral het relatieve aandeel van de ramen dat belangrijk is. (grote woningen hebben meer ramen)

Hier kunnen we duidelijk een verband zien: de luchtdichtheid daalt naarmate er meer schrijnwerk per volume aanwezig is. We dienen wel op te merken dat woningen in open bebouwing een relatief grotere hoeveelheid schrijnwerk hebben dan bvb gesloten bebouwing. Zetten we enkel die gegevens uit, dan is de correlatie al een stuk minder. Het is dus zeer belangrijk om elke externe invloed op de grafiek bij de interpretatie zo goed mogelijk in rekening te brengen. Als de omtrek van het schrijnwerk / volume verdubbelt van 0.1 naar 0.2, dan zal de n_{50} -waarde toenemen met 1.7 h^{-1} bij woningen in open bebouwing. De correlatie is echter bijzonder laag, $R^2=0.008$ is bijzonder weinig. Het verband is dus niet bewezen.



Figuur 102. “verband tussen luchtdichtheid en omtrek schrijnwerk”

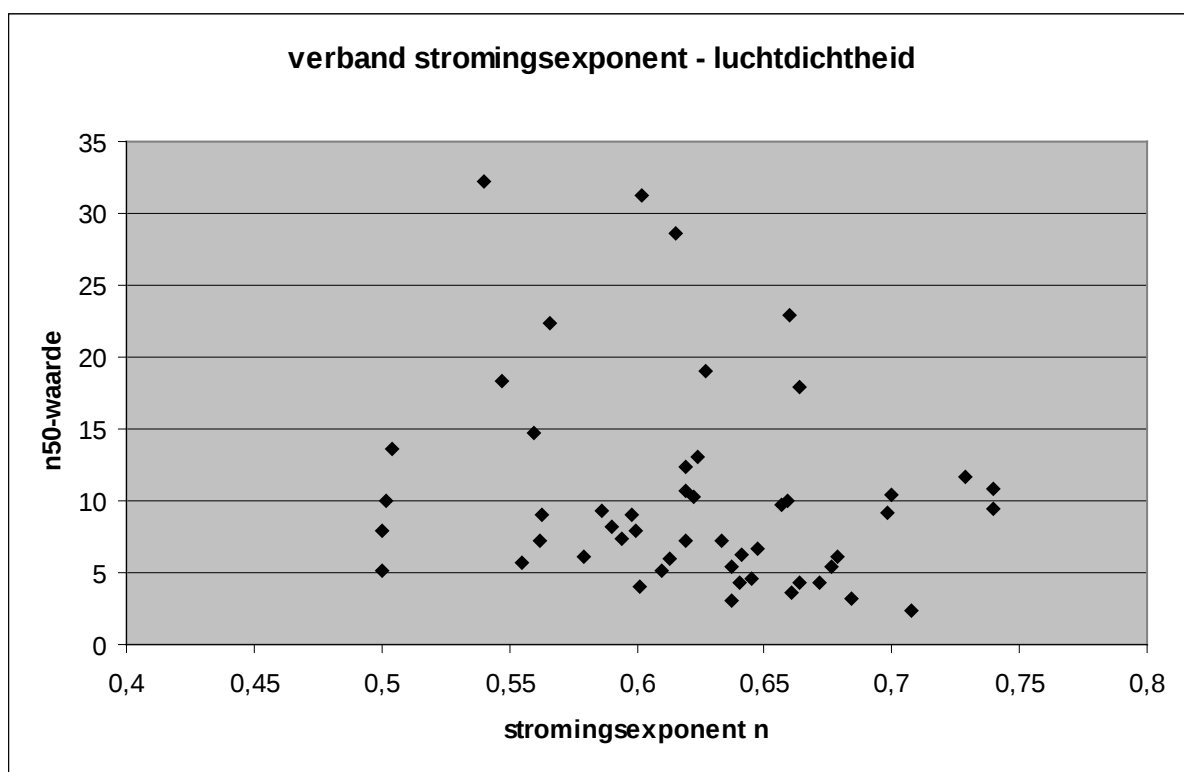


Figuur 103. “verband tussen luchtdichtheid en verhouding omtrek schrijnwerk / netto binnenvolume”

8.3.3.4 Stromingskarakteristieken

Bij het meten van de luchtdichtheid van een woning maken we dus gebruik van een blowerdoor. We meten de lucht volumestroom onder stationair drukverschil: we doen ongeveer een vijftal metingen die telkens 10 Pa verschillen binnen het interval [+10 Pa : +60 Pa]. Aan de hand van die punten kunnen we de stromingsvergelijking bekomen door middel van de best passende machtsfunctie door die punten met Δp als argument. Die functie kunnen we beschrijven aan de hand van de stromingscoëfficiënt en de stromingsexponent n . n is een waarde die afhankelijk is van het stromingsregime in de doorgang. Als hier een laminair regime heerst, zal n gelijk zijn aan 1, als er een turbulent regime is, zal n gelijk zijn aan 0.5. Fijne lange doorgangen zullen pas bij zeer hoge drukverschillen turbulente regimes vertonen. Bij brede, grote openingen, zal er al bij lage drukverschillen sprake zijn van turbulente regimes. Dus bij een constante druk zullen grote openingen een lage n -waarde hebben, en fijne openingen een grote n -waarde. Uit een meting over de totale gebouwschil, verkrijgen we een gemiddelde n waarde over alle openingen. In de literatuur vinden we dat deze meestal tussen 0.6 en 0.7 ligt.

We dienen er nogmaals op te wijzen dat er in de SENVIVV-studie enkel proeven zijn uitgevoerd in overdruk.

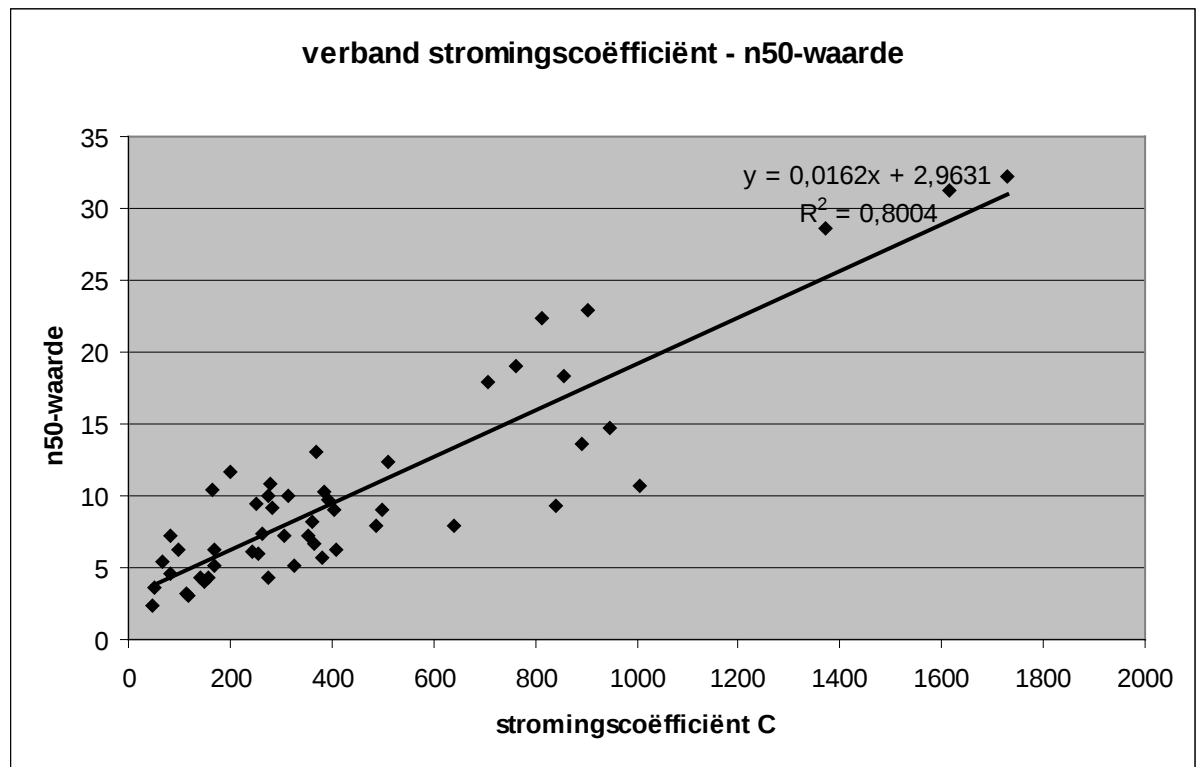


Figuur 104. “verband tussen luchtdichtheid en stromingsexponent”

Op figuur 104 zien we dat er geen duidelijk verband te vinden is tussen de twee (noch lineair, noch in een machtsfunctie). Een hogere stromingsexponent wijst op een meer laminair regime, en dus zullen de openingen en kieren gemiddeld fijner zijn. We verwachten dus eigenlijk dat luchtdichte woningen veel fijnere kieren en spleten hebben, omdat de ‘grotere’ problemen opgelost zouden zijn. Dit valt wel gedeeltelijk af te leiden voor heel luchtdichte woningen, maar het is niet een algemene trend. Dit wil dus zeggen dat andere factoren zoals de geometrie van de opening een grotere invloed hebben om het stromingsregime. Door de geometrie kunnen ook kleine openingen turbulente stromingsregimes voortbrengen, dit is dus zeker geen referentie om uitspraken te doen over de gemiddelde grootte van de gemiddelde opening. De gemiddelde stromingsexponent is hier gelijk aan 0.62.

Stromingscoëfficiënt C is een constante die afhankelijk is van de geometrie van de opening en doorgang, het is ook het debiet bij een drukverschil van 1 Pa. Aangezien de luchtvolumestroom recht evenredig is met C , moet dit natuurlijk tot uiting komen in figuur

105. De spreiding wordt veroorzaakt door de variatie in het netto binnenvolume en de variatie in de stromingsexponent.



Figuur 105. “verband tussen luchtdichtheid en stromingscoëfficiënt”

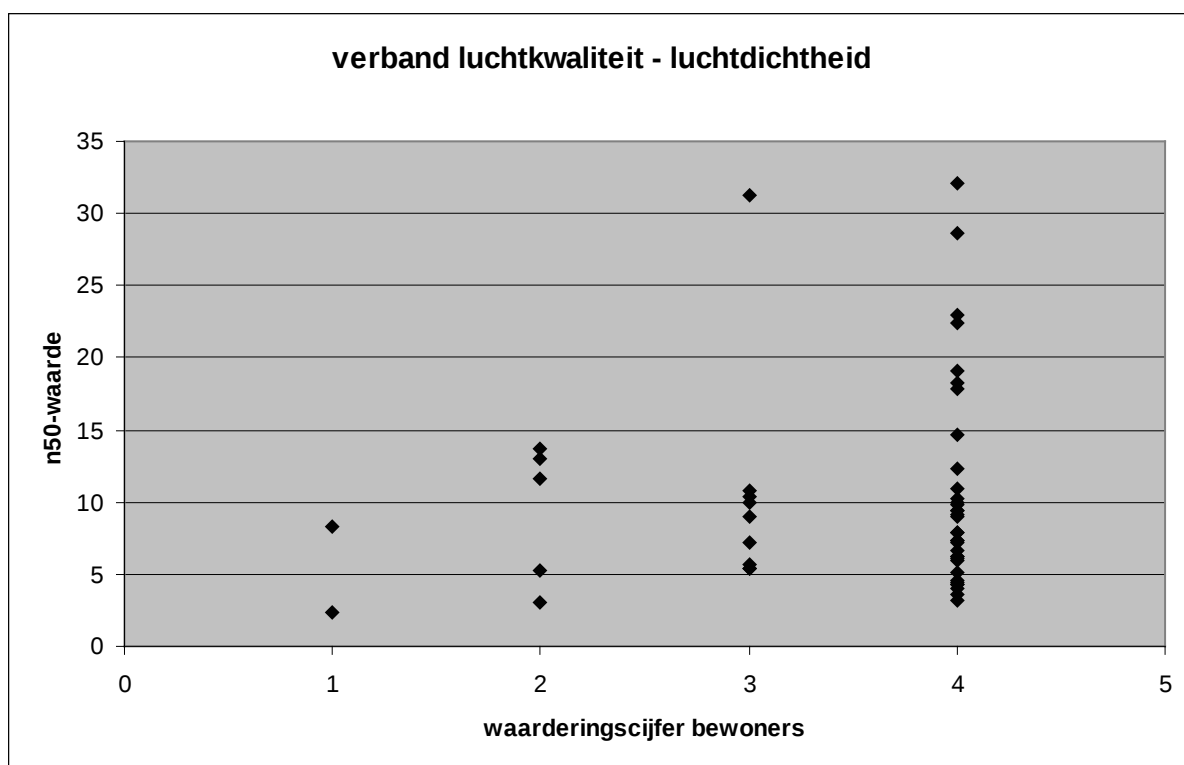
8.3.3.5 Luchtkwaliteit en geluidsccomfort

In de SENVIVV-studie heeft men de bewoners gevraagd de luchtkwaliteit te beoordelen: “we zijn erg tevreden over de luchtkwaliteit in de woning”

- 1: helemaal niet akkoord
- 2: eerder niet akkoord
- 3: eerder wel akkoord
- 4: helemaal akkoord

De appreciatie van luchtkwaliteit is vooral afhankelijk van de ventilatie, maar luchtdichtheid kan wel degelijk invloed hebben. Zo is het mogelijk dat een gebrek aan luchtdichtheid tochtverschijnselen veroorzaakt in bepaalde ruimtes. Anderzijds kan een gebrek aan luchtdichtheid zorgen voor voldoende verse lucht die de woning op die manier binnentreedt. In

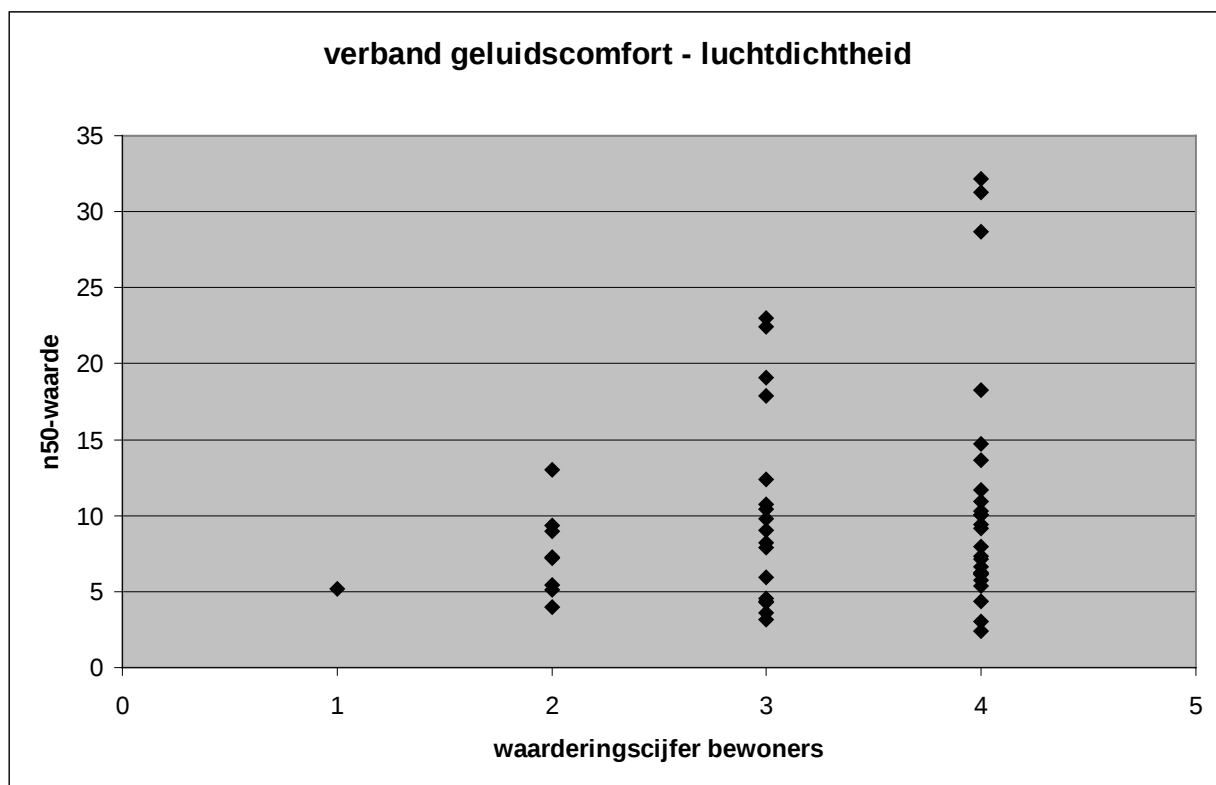
de grafieken vinden we geen opmerkelijke trends terug. De woningen met een slechte luchtdichtheid worden meestal positief beoordeeld. We kunnen niet zeggen dat een goede luchtdichtheid storend is, maar blijkbaar wordt een gebrek aan luchtdichtheid niet direct als negatief ervaren naar luchtkwaliteit toe. Anderzijds zou men kunnen zeggen dat een gebrek aan luchtdichtheid blijkbaar een betere luchtkwaliteit veroorzaakt, omdat de minst luchtdichte woningen goed beoordeeld worden. Uit nader onderzoek blijkt dat dit vooral te wijten is aan de statistische verdeling, en er geen significante trend kan teruggevonden worden. Toch zal een slechte luchtdichtheid tot gevolg hebben dat er meer dan voldoende verse lucht door infiltratie de woning binnenkomt. We zien dat de meest luchtdichte woning een slechte beoordeling krijgt, in casu: door een gebrek aan ventilatie ontstaan er vochtproblemen. Het is dus belangrijk dat luchtdichtheid bekeken wordt binnen de algemene ventilatiestrategie. [76]



Figuur 106. “verband luchtdichtheid - bewonersappreciatie luchtkwaliteit”

Een soortgelijke vraagstelling is gebeurd in verband met het geluidsccomfort. Uit de opmerkingen blijkt dat vooral de overdracht van interne contactgeluiden voor overlast zorgen. Ook hier is er geen enkel verband te vinden en geeft een slechte luchtdichtheid geen aanleiding tot een daling van de appreciatie van het geluidsccomfort. Het feit dat de minst luchtdichte woningen een goede beoordeling krijgen wil niet zeggen dat dit een intrinsieke

kwaliteit is. Er zijn gewoon veel meer woningen die een goede beoordeling krijgen, en statistisch gezien is er dus meer kans dat de weinig luchtdichte woningen in die klasse zitten. Ook hier wordt een gebrek aan luchtdichtheid blijkbaar niet als storend ervaren naar akoestisch comfort toe.



Figuur 107. “verband luchtdichtheid - bewonersappreciatie geluidscomfort”

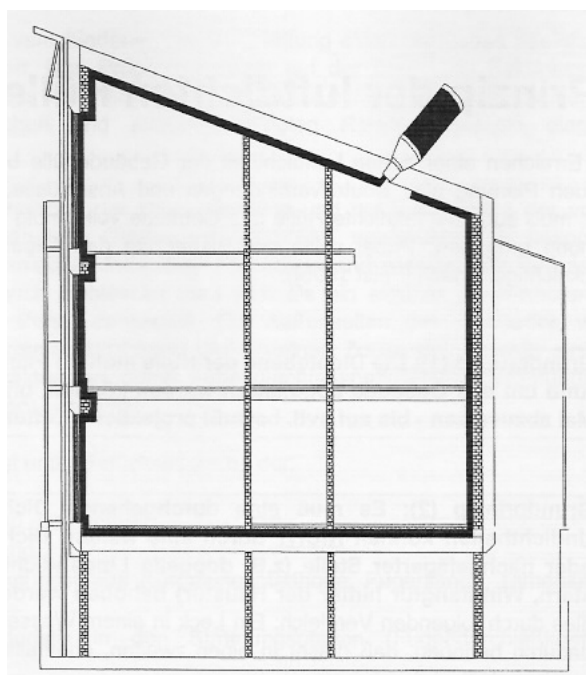
9) Uitvoering

9.1) Inleiding

Luchtdicht bouwen start op de tekentafel, er zijn een aantal ontwerpregels die men moet respecteren om tot een goed luchtdichtheidsconcept te komen. Luchtdichtheid is een alles of niets situatie: je kunt niet een aantal fouten compenseren door elders een beetje beter te doen. Net zoals een isolatielaag moet men ook een luchtdichtheidslaag rondom het gebouw leggen zonder onderbrekingen. Om een luchtdicht gebouw te bekomen moet men volgende 5 geboden in acht nemen:

Basisregel 1.

De luchtdichte laag rond een woning moet men op elk plan en op elke doorsnede kunnen aanduiden met een stift zonder deze van het papier op te lichten, behalve bij eventuele verluchtingsopeningen die doelbewust aangebracht zijn.(zie figuur 108)



Figuur 108. “aanduiding luchtdichtheidsscherm – regel 1”

Basisregel 2.

Het is duidelijk dat er slechts één luchtdichte laag aanwezig moet zijn, maar dan wel een goede. Ondichtheden kunnen niet opgevangen worden door op bepaalde plaatsen

een extra veiligheid te plaatsen. Dit is zoals je water in een emmer wilt doen: je kunt beter één emmer hebben die dicht is, dan twee emmers in elkaar zetten waar er in elke bodem een gat is.

Basisregel 3.

De luchtdichte laag wordt best aan de binnenzijde van de isolerende laag aangebracht. Over het algemeen hebben luchtdichte lagen een hogere diffusieweerstand, zodat deze altijd aan de warme kant van de isolatie geplaatst moeten worden om schade door condensatie te vermijden. De luchtdichte laag moet niet noodzakelijk in hetzelfde vlak liggen als de isolatie. In bepaalde gevallen is het te verantwoorden ze te scheiden.

Basisregel 4.

Alle uitvoeringsdetails moeten zo eenvoudig mogelijk zijn om zo veel mogelijk fouten te vermijden bij uitvoering door werklieden. Grote aaneengesloten vlakken uit een enkel materiaal zijn ook beter luchtdicht te maken dan verschillende materialen die in een gevel verspringen. Doorboringen moeten in de mate van het mogelijke vermeden worden. Bij de constructie moet men consequent de detaillering doorvoeren, waarbij men zoveel mogelijk gebruik dient te maken van beproefde technieken.

Basisregel 5.

Men moet een duidelijke planning en strategie voor ogen hebben om tot een luchtdicht gebouw te komen: in ontwerpfase kan men reeds problemen vermijden. Daarna moet er bij het uittekenen van aansluitingen voldoende aandacht gaan naar luchtdichtheid. Tijdens de constructie van het gebouw moet er op gezette tijden specifieke controle zijn op een aantal zaken in verband met luchtdichtheid. En na de voltooiing van de luchtdichte schil kan er eventueel een blowerdoor proef gedaan worden om lekken op te sporen en te verhelpen. Eens het gebouw volledig klaar is kan er een definitieve blowerdoor test gedaan worden om zekerheid te bieden omtrent de behaalde luchtdichtheid. Dit kan dan ook in rekening gebracht worden in de software van de EnergiePrestatieRegelgeving die op 1 januari 2006 van kracht wordt.

Verder in dit hoofdstuk bespreken we de praktische kant van luchtdichtheid: welke materialen komen in aanmerking, hoe moet je verschillende aansluitingen detailleren, wanneer moet er controle zijn op de werf, hoe realiseer je de luchtdichtheid bij passiefwoningen...

We kunnen niet vooropstellen dat het naleven van alle regels hieronder beschreven automatisch leidt tot een bepaalde n_{50} -waarde. Het mag duidelijk zijn dat zowel de geometrie als de praktische uitvoering een grote invloed hebben op de uiteindelijke luchtdichtheid. Aan de hand van de UGENT schattingsmethode kan men kijken welke maatregelen nodig zijn om een specifieke luchtdichtheid te bekomen. Er is voor verschillende onderdelen in de schattingsmethode een differentiatie gebeurd naar structurele opbouw en uitvoeringskwaliteit, en elke beschreven uitvoeringskwaliteit wordt hier nu besproken. Op die manier kan men ondubbelzinnig de praktische uitvoeringsmodaliteiten bepalen die gevolgd moeten worden.

Ook voor passiefwoningen zijn de voorwaarden opgesteld waarmee het mogelijk moet zijn om een luchtdichtheid te bereiken waarvoor $n_{50} \leq 0.6 \text{ h}^{-1}$.

9.2) Wanden, vloeren, daken

Uit onze studie is gebleken dat 40% van alle luchtlekkage door de wanden gaat, wat toch wel heel veel is (zowel bij massiefbouw als houtskeletbouw in open bebouwing). Voor open bebouwing bestaat die 40% uit 13% wanden, 21% daken en 6% vloeren. We moeten dus voor elk onderdeel een materiaal kiezen dat voldoende luchtdicht is in functie van zijn toepassing. Vaak worden criteria gehanteerd op basis van materiaaleigenschappen, maar daar houdt men geen rekening met de verwerking en plaatsing. We baseren ons dan ook enkel op testen die uitgevoerd zijn op volledige wanden.

De meeste woningen hebben zo'n 150 tot 300 m² muur, wat dus een belangrijk aandeel is in de totale gebouwschiloppervlakte. Een verkeerde keuze in muurafwerking hypothekeert dus al snel de globale luchtdichtheid. Bovendien moeten alle andere vlakken aangesloten worden op de muur, dus moet het afwerkingmateriaal geschikt zijn voor de verschillende aansluitingen. In de Zweedse norm moet $q_{50} \leq 3.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, maar dit mogen we niet interpreteren als een materiaaleigenschap: de verliezen door aansluitingen, doorvoeren en schrijnwerk zijn hier ook in verrekend. Aangezien de wanden in totaal 40% van de luchtlekkage vertegenwoordigen kunnen we wel stellen dat een n_{50} -waarde gelijk aan 3.0h^{-1} haalbaar moet zijn als de gemiddelde luchtlekkage door de wanden $q_{50} = 1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

9.2.1) Bepleisterde muren

In de UGENT schattingsmethode hebben we voor de bepleisterde muur $q_{50} = 1.8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ gesteld, dit is dus slechter dan $q_{50} = 1.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Mits de nodige voorzorgen kan de bepleistering in werkelijkheid veel luchtdichter zijn, tot $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$: er mag niet te veel water gebruikt worden om de krimpscheuren te beperken en de droging van de wand mag niet versneld worden. Ook de samenstelling is van groot belang: kalk zal bvb sneller microscheuren hebben dan een gipspleister. In de meeste gevallen is het pleisterwerk echter niet zo uitgevoerd en dient men te rekenen met de standaardwaarde. Pleisterwerk heeft het bijkomende voordeel dat het relatief dampopen is en zodoende de vochthuishouding in het gebouw niet verstoort.

Er zijn ook passiefwoningen die enkel bepleistering als luchtdichtheidsscherm hebben voor de wanden en die toch aan alle criteria voldoen. Pleisterwerk kan in passiefwoningen enkel gebruikt worden als luchtdichtheidsscherm indien er een zeer goede uitvoering gegarandeerd kan worden en aan alle bovenstaande eisen voldaan is. Daarvoor kan men enkel beroep doen op aannemers met ervaring op dit gebied, want louter een ‘verzorgde uitvoering’ is totaal ontoereikend. Zie ook 9.2.6.

9.2.2) Onbepleisterde muren

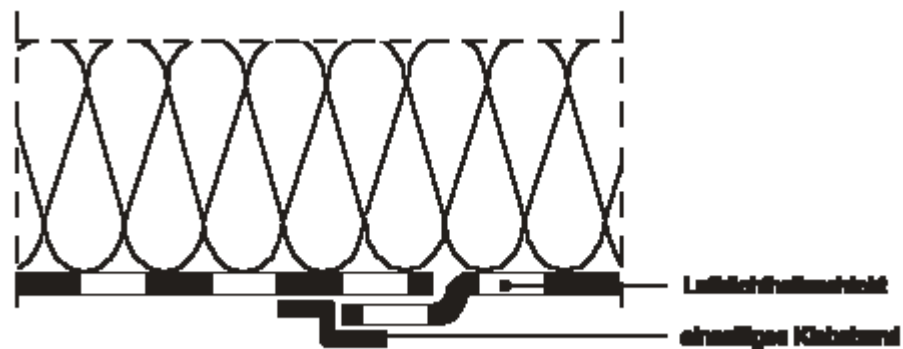
Muren in snelbouwsteen of gevelstenen die niet voorzien zijn van een binnenbepleistering zijn veel te luchtopen en moeten absoluut vermeden worden. De gemeten luchtdoorlatendheid varieert van $q_{50} = 2.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ tot $q_{50} = 20.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Er zijn een aantal typische plaatsen waar het pleisterwerk vaak vergeten wordt: bergingen, technische ruimtes, de wand achter de tellers en meters van de nutsvoorzieningen, de ruimte onder een trap, plaatsen waar een ingemaakte kast komt... Bovendien is de luchtdoorlatendheid vaak zo groot dat er tochtverschijnselen kunnen optreden als het oppervlak groot genoeg is. Dit zijn typische fouten die zondigen tegen basisregel 1 zoals beschreven in 9.1.

9.2.3) Polyethyleenfolie

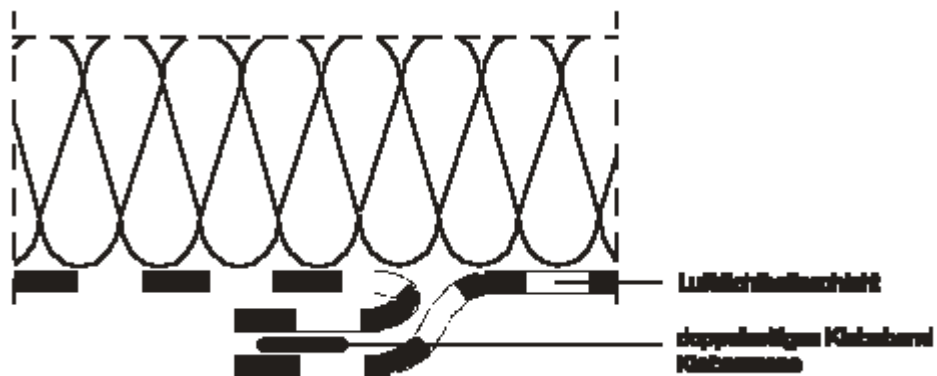
Vaak worden houtskeletstructuren aan de binnenzijde afgewerkt met een dampscherm om condensatieproblemen te vermijden. Dit dampscherm doet dan ook dienst als luchtscherm. De plaatsingscriteria zijn voor beiden dezelfde, maar in praktijk wordt er maar al te vaak

gezondigd tegen deze principes. Als men een zeer dichte folie (bvb $q_{50} = 0.0015 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$) aan een keperstructuur (40cm tussen kepers) bevestigt door deze om de 5 cm te nieten stijgt de doorlatendheid van het geheel naar $q_{50} = 4.0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Dit verklaart het grote aandeel (21%) van het dak in de totale luchtlekkage, en kan in sommige gevallen zelfs oplopen tot bijna 40%. Als de verschillende stukken aan elkaar gekleefd worden is $q_{50} = 0.80 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, dit geldt zowel voor keperwanden als voor keperdaken. Men neemt best een PE-folie met een dikte $\geq 0.2\text{mm}$: door de elasticiteit worden de bewegingen en zettingen van het gebouw opgenomen zonder te scheuren. De folie is ook soepel genoeg om rond elementen te plooien, en polyethyleen kan zonder problemen verkleefd worden en is compatibel met pleisterwerk. Voor de technische voorwaarden voor een correcte verkleving van de verschillende stukken folie, zie ook 9.3.1.1. Men doet best een controle van de aansluiting door een blowerdoor test, als alle folies nog zichtbaar zijn, zodat de fouten snel hersteld kunnen worden.

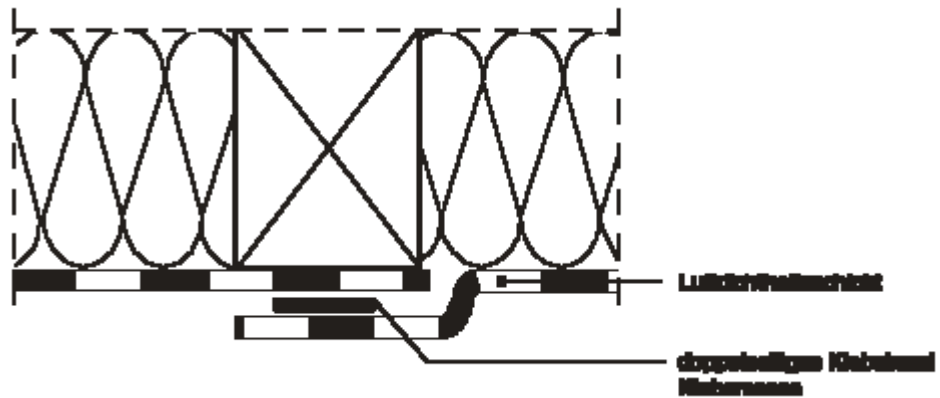
In onderstaande figuren zijn de verschillende methodes weergegeven om twee stroken PE-folie aan elkaar te verbinden: met enkelzijdig plakband (figuur 109), met dubbelzijdig plakband (figuur 110), en dubbelzijdig plakband op een structuur (figuur 111).



Figuur 109. “verkleving PE-folie: enkelzijdig plakband” [96] [104]

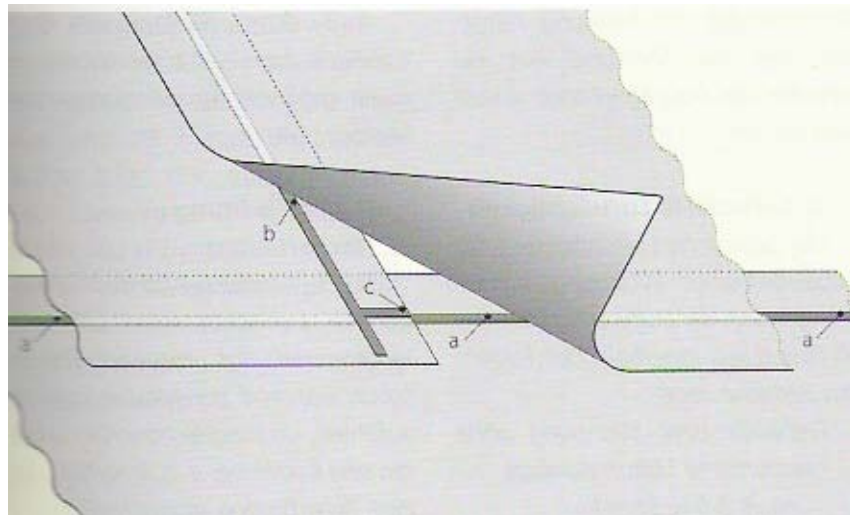


Figuur 110. “verkleving PE-folie: dubbelzijdig plakband” [96] [104]



Figuur 111. “verkleaving PE-folie: dubbelzijdig plakband op een structuur” [96] [104]

Als men verschillende banden PE-folie aan elkaar kleeft met dubbelzijdig plakband vergeet men vaak strip c zoals getoond in figuur 112 aan te brengen. [10]



Figuur 112. “verkleaving PE-folie met dubbelzijdig plakband: frequente fout”

9.2.4) Papier

In de handel is ook speciaal bouwpapier te verkrijgen dat dienst kan doen als luchtscherm. We raden echter af deze te gebruiken, want de minste zetting of beweging van het gebouw is genoeg om het papier te doen scheuren. Bovendien is de kans groot dat er al scheuren of perforaties in komen tijdens de werffase door onoplettendheden. Er bestaan ook versterkte materialen, die minder snel scheuren en veel steviger zijn: deze komen wel in aanmerking als luchtdichtheidsscherm. Door het verhoogde risico wordt dit materiaal echter afgeraden voor passiefwoningen. [92]

9.2.5) Aluminiumscherm

Er bestaan ook gewapende folies met een aluminiumlaag als afwerking, deze zijn volledig lucht- en dampdicht. Vaak zijn deze materialen niet elastisch en is er op termijn een grote kans op scheuren. De verkleving van verschillende lagen aluminiumschermen moeten met speciale plakband verkleefd worden. Het scherm mag niet in contact komen met de bepleistering, want de aluminiumlaag zal zeer snel doorroesten. Dit materiaal kan ook toegepast worden onder de vorm van een soort plakband (zie 9.3.1.1). [9] [92]

9.2.6) Platen

Naast alle soepele materialen maakt men soms ook gebruik van stijve platen om de luchtdichtheid te verzekeren. Vooral in houtskeletbouw wordt dit al eens toegepast, omdat de platen dan ook onmiddellijk zorgen voor de laterale stijfheid van de wanden. De naden tussen de verschillende platen moeten dan wel afgeplakt worden met speciale tape. Bovendien moet men na plaatsing een grondige controle doen op doorboringen, zaagsnedes die iets te ver lopen, kieren en spleten. Als men dan op alle nodige plaatsen tape aanbrengt dient men er op te letten dat de oppervlakken voldoende schoon zijn gemaakt. Niet alle soorten tape zijn geschikt om te gebruiken op houtderivaten, en soms moet men een primer gebruiken voor een goede aanhechting (zie figuur 113). Het heeft weinig zin enkele weken lang luchtdichtingstape aan te brengen als deze na verloop van tijd zijn aanhechting verliest. Zowel spaanplaten, houtvezelplaten, OSB-platen als multiplexplaten zijn luchtdicht genoeg om zelfs in passiefwoningen te gebruiken (figuur 114). Vaak is het zinvol in die gevallen een elektrospouw te voorzien, want al te veel doorboringen hypothekeert de globale luchtdichtheid.

Holzwerkstoffplatten					
Holz, roh	*	*	*	*	* mit Primer
Holz, gehobelt					
Mauerwerk		*		*	* mit Primer
Beton, rauh		*		*	* mit Primer
Sichtbeton		*	*	*	* mit Primer
		*	*	*	*

Figuur 113. “toepasbaarheid PAVATEX-tape in functie van materialen” [99] [101]



Figuur 114. “OSB-platen als luchtdichte afwerking in passiefwoningen”

9.2.7) Prefab elementen

In sommige types gebouwen maakt men vaak gebruik van prefabelementen om de gevel te construeren. De luchtdichtheid van de elementen zelf kan meestal gegarandeerd worden, maar de aansluitingen tussen de verschillende onderdelen laat meestal te wensen over. Ook sandwichpanelen kunnen perfect luchtdicht zijn, maar voegen tussen de panelen zijn moeilijk luchtdicht te krijgen. Er bestaan wel al enkele systemen met dubbele dichtingen die ook een goede luchtdichtheid garanderen, maar er is nog niet voldoende onafhankelijk onderzoek gedaan om dit te bevestigen. Men bekomt de beste resultaten als de aansluitingen voor luchtdichtheid reeds bij de productie in de elementen verwerkt worden. Op die manier hoeft men per voeg slechts één aanhechting te maken. [91] [92]

9.3) Lineaire aansluitingen

Aansluitingen zijn volgens de UGENT schattingsmethode verantwoordelijk voor 15% van alle lekkageverliezen bij massiefbouw in open bebouwing, en 30% bij houtskeletbouw in open bebouwing. Elke aansluiting moet echter bekeken worden in functie van de breedte, de materialen, de bereikbaarheid, de vervormingen die kunnen optreden... Het is niet altijd eenvoudig bepaalde details te controleren. Vooral de aansluiting muur – dak en muur – schrijnwerk moeten gecontroleerd worden.

9.3.1) Materialen

9.3.1.1 Plakband

Tape wordt heel veel gebruikt bij PE-folie en platen op basis van hout om de naden tussen de verschillende delen luchtdicht af te kleven. Om een langdurige verbinding te garanderen is het van belang dat er geen spanningen op de tape worden overgebracht door bewegingen van het gebouw. Natuurlijk moeten spanningen ten gevolge van winddrukken en bvb blowerdoor meting wel opgenomen kunnen worden. [93] [94]

Hoe lang de verkleving met tape stand houdt is een moeilijke vraag: verschillende onderzoeken spreken elkaar tegen met betrekking tot de levensduur van de aanhechting. In ieder geval moet men steeds de juiste tape kiezen in functie van het oppervlaktemateriaal (zie figuur 113) Producenten geven bijna levenslange garantie op de verkleving indien deze gebeurt volgens de instructies van de fabrikant. De oppervlakken die verkleefd moeten worden dienen steeds vet- en stofvrij te zijn, maar in de praktijk wordt dit zelden consequent gedaan. Sommige fabrikanten raden aan op samengestelde houten platen eerst een primer aan te brengen vooraleer de plakband te bevestigen. Dit zijn natuurlijk voorwaarden voor een goede verkleving, en indien deze niet gevolgd worden, geeft de fabrikant geen garantie. [105]

Plakband voor alledaags gebruik heeft meestal 20g lijm per vierkante meter, een hele dunne laag, want de verkleving werkt vooral op adhesie van de bovenste moleculen[93]. In het bouwgebeuren werkt men vooral met een tape die 200g lijm per vierkante meter heeft: zo kan men de tape iets beter aandrukken, en kan bij een iets ruwer oppervlak de lijm beter de vorm van het basismateriaal omhullen en daardoor het contactvlak vergroten. Een tweede voordeel is dat er een iets grotere ‘plastische vervorming’ mogelijk is: bij spanningen kan de tape als het ware een stuk glijden over de dikte van de lijm. Bij temperaturen lager dan 5°C valt het af te raden nog tape aan te brengen omdat de lijm niet viskeus genoeg meer is, en openingen breder dan 35mm worden best niet meer met tape afgedicht. De maximaal toelaatbare vervorming van tape is afhankelijk van het type, gemiddeld 24%, en de overlapping van verschillende stukken tape moet minimum 50mm zijn.[92] Tape wordt heel veel gebruikt bij het luchtdicht maken van passiefwoningen. Men dient er dan wel op te letten dat aan alle voorwaarden voldaan is om een ideale verkleving te krijgen.

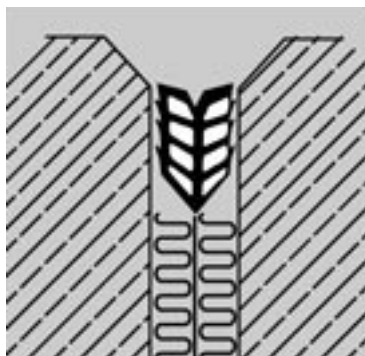
Er bestaan ook speciale soorten tape met bvb een bitumineuze pasta en perfect dichte toplaag van aluminium. Deze kunnen nog meer plastische vervormingen opnemen maar zijn een stuk duurder.



Figuur 115. “tape met aluminium coating”

9.3.1.2 kunstrubber profiel

Profielen uit EPDM-rubber worden vaak gebruikt bij raamdichtingen: door de verschillende lippen of holtes hebben de profielen een grote indrukbaarheid. Die profielen kunnen ook gebruikt worden op andere plaatsen om aansluitingen luchtdicht te maken, bvb bij betonnen prefabconstructies. De spleten moeten minimum 6mm breed zijn om een profiel in te krijgen, en de maximale breedte is 30mm. Bovendien moet de voeg vlak zijn en evenwijdig. Deze profielen worden snel geplaatst en zijn gemakkelijk in verwerking. Anderzijds zijn de profielen relatief duur in vergelijking met andere materialen om voegen te dichten. Bij onderhoud wrijft men de profielen best in met kalk om de levensduur te verlengen. Na verloop van tijd zal door relaxatie de druk op de oppervlakken iets verminderen, een goede dimensionering is dan ook noodzakelijk. Daarom is deze methode minder geschikt bij passiefwoningen. [64] [92]



Figuur 116. “profiel in prefabgevel”



Figuur 117. “verschillende types EPDM-profielen

9.3.1.3 cellenband

Gesloten en semi-gesloten cellenbanden hebben één of twee kleefzijden, en worden samengedrukt in een voeg geplaatst. Na verloop van tijd zal door relaxatie de band echter minder hard tegen de materialen drukken, zodat de luchtdichtheid iets afneemt. Deze methode is dan ook minder geschikt voor voegen die vaak onderhevig zijn aan tijdelijke vervormingen. De hechtvlakken om de band op aan te brengen dienen schoon en droog te zijn, en de voeg mag niet smaller zijn dan 3mm. De maximaal toelaatbare vervorming van dit materiaal is 7.5%. Bij passiefwoningen dient men bovendien nog een kit aan te brengen op de cellenband om een absolute dichtheid te bekomen. [17] [91]



Figuur 118. “cellenband op rol”

9.3.1.4 compressieband

Compressieband is een schuimband met een open celstructuur en is vervaardigd van polyether-, polyester-, of polyurethaancombinaties. Deze types schuimband zijn zacht en zeer elastisch. Alleen geïmpregneerde types kunnen gebruikt worden als regendichting (en zijn tevens UV-bestendig). Deze methode kan ook gebruikt worden bij voegen die niet vlak en evenwijdig zijn. Aangezien de banden opgerold zijn en pas na plaatsing uitzetten is een nauwkeurige maatvoering noodzakelijk: onbelemmerd moet de band uitzetten tot 1.5 maal de

voegbreedte. De voeg mag niet smaller zijn dan 2mm en niet breder dan 40mm, de oppervlakken moeten schoon en droog zijn. Voor passiefwoningen moet de compressieband bovendien aan de binnenzijde afgekit worden om elke lekkage te vermijden. [17] [91]



Figuur 119. “compressieband op rol”

9.3.1.5 (droge) specie

Met specie bedoelen we alle vulsels, pasta's en voegmiddelen die in de handel verkrijgbaar zijn, alsook cement- en kalkmortels. Te vochtige materialen kunnen kleine scheurtjes krijgen door te drogen, te droge materialen zijn vaak niet viskeus genoeg om een goede hechting te bekomen met de oppervlakken. Als het een aansluiting tussen twee verschillende materialen is komen deze middelen meestal niet in aanmerking. Bovendien mogen er geen bewegingen of zettingen zijn, want deze materialen zijn na verloop van tijd nogal bros. In sommige gevallen, waar er twee gelijke materialen verbonden moeten worden en er geen kans is op te grote vervormingen zijn bepaalde species toelaatbaar, mits de juiste keuze en het volgen van de specificaties van de fabrikant. Voor passiefwoningen valt deze methode echter af te raden omdat de absolute luchtdichtheid moeilijk te garanderen is. [17] [91]

9.3.1.6 kit

We kunnen onderscheid maken tussen acrylaatkit en elastische kit. Acrylaatkit is milieuvriendelijker, maar is niet geschikt voor buitentoepassingen omdat het maar een heel beperkte vervorming kan opnemen. Daarom kiest men in het algemeen beter voor een elastische kit, die meestal ongeveer 25% vervorming kan opnemen. De voeg moet tussen de 2 en 20mm breed zijn, en men dient bijzondere aandacht te besteden aan de relatie voegdiepte – voegbreedte (zie hiervoor Technische Voorlichting 124 van het WTCB). De oppervlakken dienen absoluut schoon, droog, vet- en stofvrij te zijn.



Figuur 120. “afkitten prefabelementen”

9.3.1.7 PUR-schuim

Polyurethaanschuim wordt in de Vlaamse bouwpraktijk heel veel gebruikt als dichting voor kieren en spleten, bvb bij de plaatsing van ramen. De huidige producten op de markt zijn veel minder schadelijk dan vorige generaties schuimen (sinds wetgeving op CFK's). Dit product wordt in spuitbussen verkocht, en bij aanraking met lucht verdertigvoudigd het volume. 1 liter PUR levert dus 30 liter schuim, dit verklaart ook het isolerend vermogen ervan. Ook na verloop van tijd blijft de aanhechting aan de oppervlaktes goed, op voorwaarde dat die schoon en droog zijn bij het aanbrengen van het schuim. Erg grote vervormingen kan het materiaal echter niet opnemen, waardoor het op die plaatsen loskrimpt en scheurt. De voeg mag niet smaller zijn dan 15mm. Door het risico op losscheuren is dit materiaal niet onmiddellijk geschikt voor gebruik bij de constructie van passiefwoningen.



Figuur 121. “PUR-schuim”

9.3.2) Muur - vloer

De lekkage langs deze aansluiting is relatief beperkt ten opzicht van andere voegen. Daar staat dan wel tegenover dat ze in vrij grote afmetingen aanwezig is. Volgens de UGENT

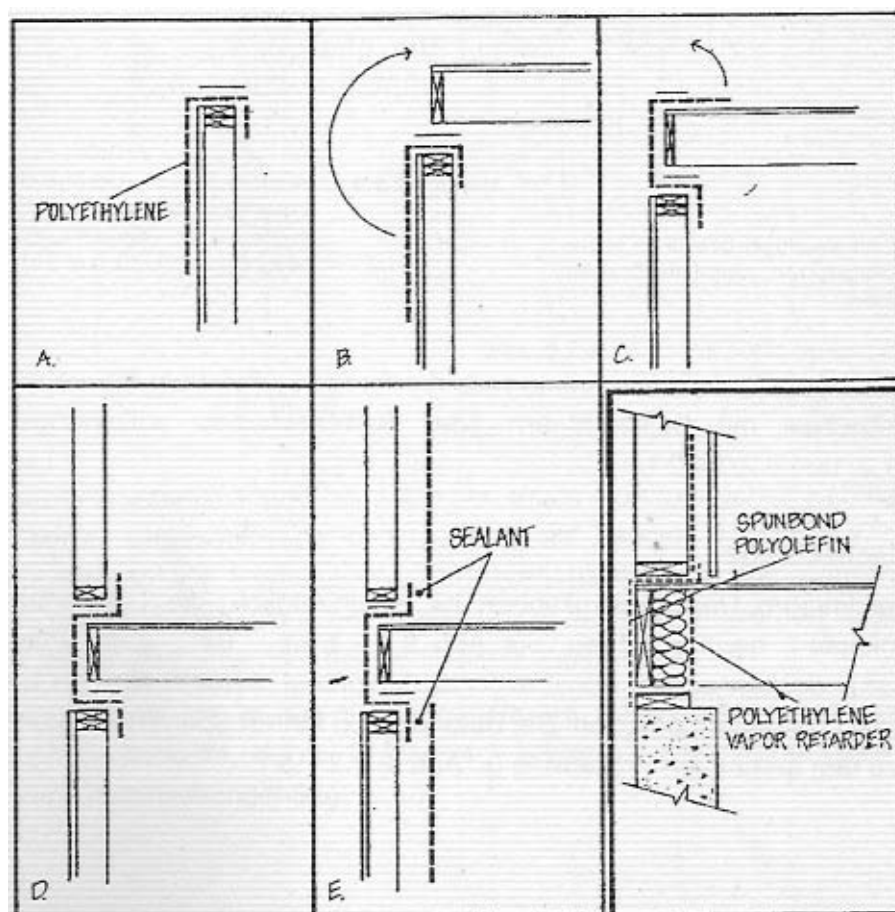
schattingmethode is deze lekkage bij de 5 woningen in open bebouwing (massiefbouw) verantwoordelijk voor 2.7% van de lekverliezen. Meestal betreft het een binnenspouwblad dat gemetst wordt op een betonplaat. Het pleisterwerk is de werkelijke luchtdichting, maar wordt meestal niet doorgetrokken tot op de vloer. Men zorgt ervoor dat er achter de plint een opening blijft, zodanig dat er geen vocht van op de vloer in het pleisterwerk kan dringen. In diverse bronnen hebben we echter aanbevelingen gevonden om het pleisterwerk door te trekken tot aan het chape. In de praktijk is dit al te vaak een bron van schadefenomenen. De spleet die open blijft zorgt echter voor luchtinfiltratie. Het luchtdichter maken van deze aansluiting is minder belangrijk door de beperkte invloed op de globale luchtdichtheid..

Voor passiefwoningen dient men wel degelijk alle voegen aan te pakken om tot een n_{50} -waarde kleiner dan $0.6h^{-1}$ te komen. Dit kan op verschillende manieren opgelost worden afhankelijk van het type wand en vloer.

9.3.2.1 Houten wand – betonnen vloer

Op de betonvloer kan een PE-folie aangebracht worden die later bedekt wordt met de chape. Aan de wand kan deze dan met tape bevestigd worden aan het luchtdichtheidsscherm aan de binnenzijde (PE-folie, platen...). Eventueel kan er nog een aandruklat gebruikt worden om de twee schermen ook mechanisch te verankeren: dan moet men er wel een compressieband of cellenband tussen plaatsen om een blijvende aandrukking te garanderen. De betonvloer en de chape zorgen dan voor de vervolmaking van het luchtdichtheidsscherm ter plaatse van de vloer. Een kleine infiltratie blijft echter mogelijk langs de vloer, daarom is volgende oplossing te prefereren.

Een andere mogelijkheid is dat er een PE-folie klaargelegd wordt op de plaats waar de betonplaat zal gestort worden. Als dit gebeurd is plooit men de flap van de folie aan de buitenzijde omhoog rond de betonvloer. Eens de wand dan geplaatst is kan die folie aan de binnenzijde aangesloten worden op het luchtdichtheidsscherm van de wand met tape of aandruklat. Dit principe wordt getoond in figuur 122. [9]



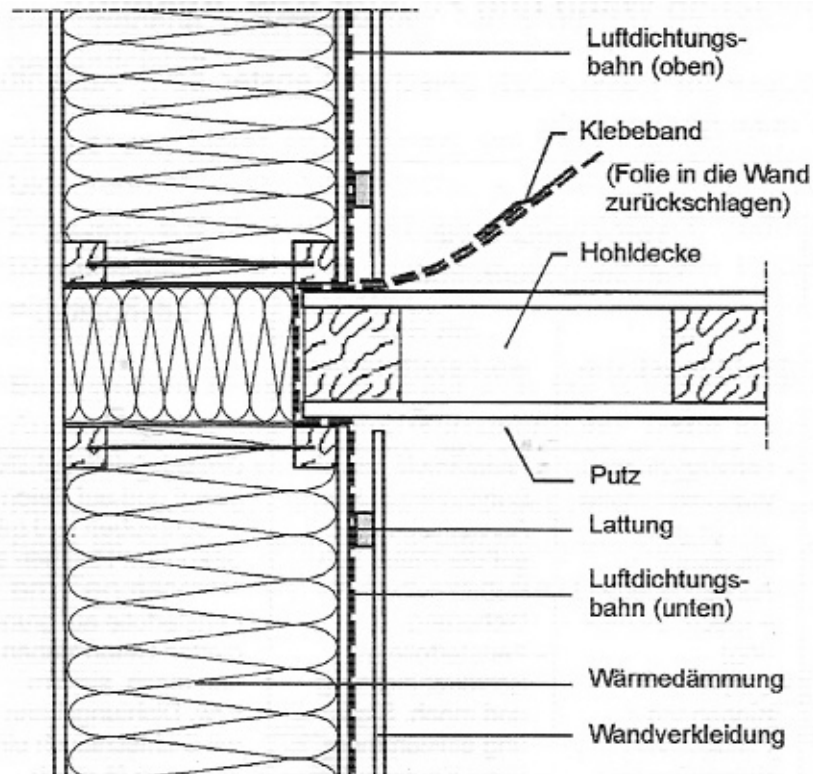
Figuur 122. “aansluiting PE-folie bij vloerconstructie 1” [9]

Als de vloer aan de rand volledig vet- en stofvrij gemaakt wordt kan men eventueel met tape het luchtdichtheidsscherm aan de vloer verkleven. De tape moet dan wel voldoende breed zijn, en de voeg mag niet breder zijn dan 35mm. [92] Deze verbinding wordt nadien aangedrukt door de chape die er nog bovenop komt. Hier bestaat evenwel de kans dat de tape scheurt of loskomt door het gewicht of het water van de chape.

9.3.2.2 Houten wand – houten vloer

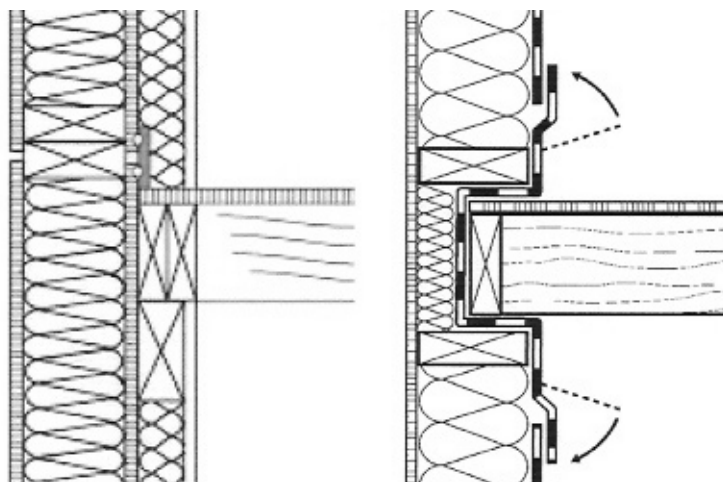
Bij de aansluiting op een houten vloer moet de luchtdichtheid gegarandeerd worden door een folie die rond de dragende balken van de vloer gaat, want de vloer zelf is dus niet luchtdicht. Voor de vloer geplaatst wordt moet er een PE-folie bevestigd worden aan de wand eronder. Na de plaatsing van de vloer wordt de folie dan over de vloer geplooid om later aan te sluiten aan het luchtdichtheidsscherm van de wand, zie figuur 123 en figuur 124 rechts. Indien het een renovatie betreft en er is geen scherm aangebracht rond de vloer kan men deze techniek niet meer toepassen. In dat geval moet men het scherm van de wand aan de binnenzijde doortrekken tussen de balken van de vloer. Elke balk moet dan volledig rondom afgekleefd

worden om aan het scherm luchtdicht te kunnen aansluiten. Al die doorboringen van het scherm brengen natuurlijk grote risico's met zich mee om de luchtdichtheid van het geheel te garanderen. Indien het de onderste verdieping betreft kan de folie aan de onderzijde eventueel aangesloten worden op de folie onder de vloer die de luchtdichtheid daar verzorgt. [10]



Figuur 123. “aansluiting PE-folie bij vloerconstructie 2”

Het is evenwel ook mogelijk het luchtdichtheidsscherm te laten doorlopen, en daarop een steun te plaatsen die het balkenrooster zal dragen, zoals getoond in figuur 124 links. Deze techniek wordt echter zelden toegepast.



Figuur 124. “aansluiting PE-folie bij vloerconstructies 3” [95]

9.3.2.3 Stenen muur – betonnen vloer

Dit is in Vlaanderen in nieuwbouw duidelijk de meest voorkomende situatie. De beste oplossing bestaat erin een folie te voorzien onder de opleg van de betonvloer, en deze om te plooien aan de bovenzijde (zie hoger). Dan wordt de muur daarop gemetst, en moet men de folie aansluiten op het pleisterwerk. Men plooit de folie op tegen de muur, en verankert deze door er een pleisterdrager op te schroeven. Zo kan men pleisteren tot over de PE-folie om een perfect luchtdichte aansluiting te bekomen. Het grote nadeel is de folie die in ruwbouwfase moet geplaatst worden onder de betonvloer, waarmee men rekening dient te houden bij het plaatsen van de bekisting (indien het in situ bouw betreft).

Een tweede mogelijkheid is het plaatsen van een folie bovenop de betonvloer en deze omhoog te plooien tegen de muur, daar wordt deze dan bevestigd met een pleisterdrager. De aansluiting wordt dan dicht gemaakt eens de chape bovenop de folie wordt geplaatst. Deze methode is de enige mogelijkheid bij renovatie, maar biedt minder zekerheid dan de voorgaande.

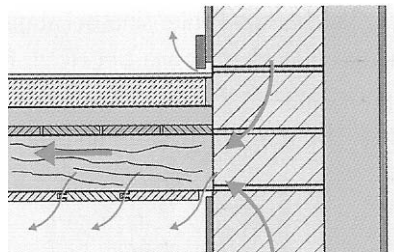
9.3.2.3 Stenen muur – houten vloer

De enige mogelijkheid om deze aansluiting luchtdicht te maken is een PE-folie die rond de vloer ligt. Het scherm wordt dan gelegd op de binnenmuur van de verdieping eronder, dan plaatst men de balkenvloer, en daarna plooit met het scherm omhoog om later aan te sluiten aan de binnenzijde van de wand die er bovenop gezet wordt (zie hoger). Ook hier maakt men gebruik van een pleisterdrager om de PE-folie te bevestigen aan de muur.

Bij renovatie is dit natuurlijk niet mogelijk, en moet men de luchtdichtheid garanderen door het scherm te laten doorlopen tussen de balken van de vloer. Elke balk moet dan rondom volledig afgekleefd worden om aan het scherm luchtdicht te kunnen aansluiten. Al die doorboringen van het scherm brengen natuurlijk grote risico's met zich mee om de luchtdichtheid van het geheel te garanderen. Het is evenwel ook mogelijk het luchtdichtheidsscherm te laten doorlopen, en daarop een steun te plaatsen die het balkenrooster zal dragen, deze techniek wordt echter zelden toegepast (zie figuur 124 links).

9.3.3) Muur - plafond

De aansluiting tussen muur en plafond is in zekere mate vergelijkbaar met de aansluiting van de muur op de vloer. Deze aansluiting is bij de 5 woningen in open bebouwing uit onze testen (massiefbouw) verantwoordelijk voor 2.2% van de totale luchtlekkage. Bij deze aansluiting is het wel mogelijk om het pleisterwerk door te trekken over de hoek, je zou dus kunnen denken dat dit eigenlijk geen probleem vormt naar luchtlekkage. Pleisterwerk is echter nogal bros, en een hoekaansluiting is altijd de eerste plaats waar problemen zich manifesteren. Door de uitdroging ontstaat er krimp in het pleisterwerk van zowel de muur als het plafond. In de hoek worden de materialen dus uit elkaar getrokken en ontstaat er een barst. Bovendien is de vloer altijd onderhevig aan kleine vervormingen door belasting waardoor de scheuren nog sneller ontstaan. Men moet er dus voor zorgen dat er ofwel geen spanningen optreden in het pleisterwerk op die plaats, of de luchtdichtheid moet verzekerd worden naast het pleisterwerk.



Figuur 125. “lekkage bij vloeraansluiting” [10]

Deze aansluiting is minder relevant voor de globale luchtdichtheid dan een aantal andere elementen. Een specifieke luchtdichte detaillering is hier dus enkel nodig als men een zeer goede luchtdichtheid wil nastreven, zoals bij passiefwoningen.

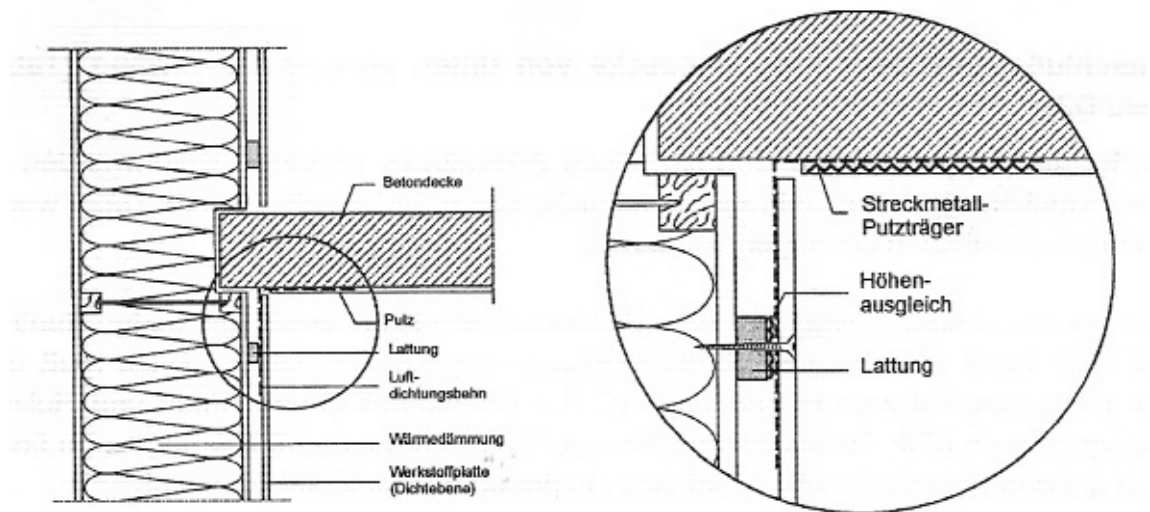
9.3.3.1 Houten vloer

Bij een houten vloer moet men zeker bij passiefwoningen vermijden dat het luchtdichtheidsscherm doorboord wordt door alle balken van de vloer. Men moet dus een PE-folie voorzien op de plaats waar de balken op de muur gelegd worden. Na de plaatsing van de vloer wordt die folie dan aan de buitenzijde omgeplooid naar boven, zodat het daar kan aansluiten op het luchtdichtheidsscherm aan de binnenzijde van de wand die er op komt.

Als het houten muren betreft kan de folie gewoon met tape bevestigd worden aan het scherm van de wand. Bij een stenen muur dient men de folie in te pleisteren met behulp van een pleisterdrager.

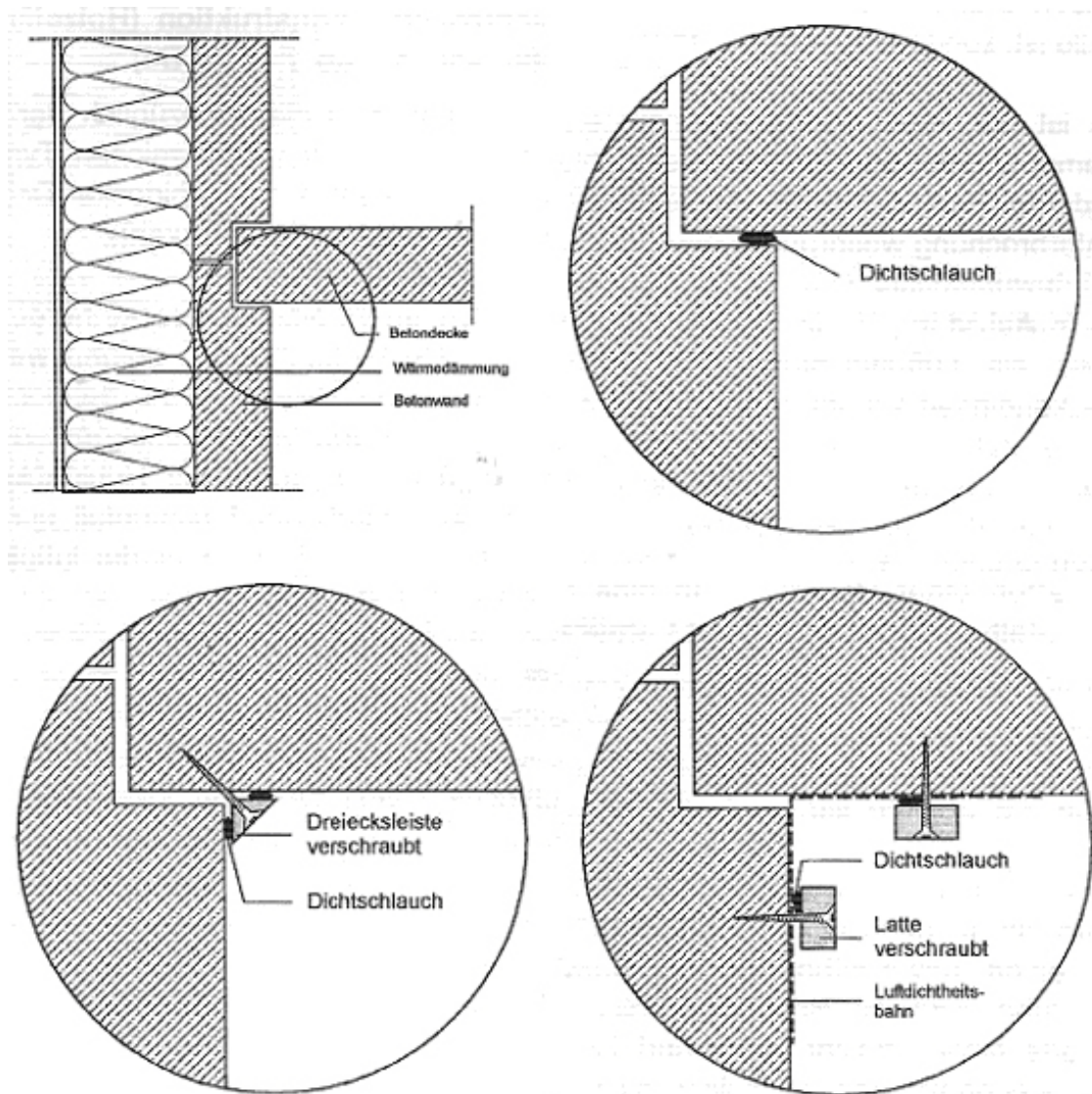
9.3.3.2 Betonnen vloer

Ook bij een betonnen vloer is de beste oplossing een PE-folie die rond de vloer geplooid wordt, zoals getoond in figuren 122, 123 en 124. Men kan ook enkel een PE-folie in de hoek aanbrengen, en deze met een pleisterdrager bevestigen aan de wand en aan het plafond, zoals in figuur 126. Dit is gemakkelijker uit te voeren maar geeft iets minder zekerheid met betrekking tot luchtdichtheid. [92]



Figuur 126. “aansluiting betonnen vloer op houten wand”

Bij de aansluiting van een vloer op een betonnen prefabwand kan men de luchtdichtheid op drie manieren garanderen (figuur 127). De beste manier is om tijdens de plaatsing de vloer op een indrukbare oplegging te leggen, zodat deze zich kan aanpassen aan de vorm van de muur en vloerplaat. Het gewicht van de plaat zal alle voegen dan dichtdrukken, en indien mogelijk wordt de voeg dan afgewerkt met een elastische kit. In uitvoering is dit vaak niet zo handig, en worden de elementen zonder speciaal oplegmateriaal op elkaar geplaatst. De voeg tussen de elementen is vaak niet breed genoeg om de lekkage in de voeg zelf op te vangen, dus moet er aan de binnenzijde van de hoek een luchtdichting aangebracht worden. Dit kan door middel van een profiel in de hoek te klemmen met aan weerszijden een dichtingsband, of door een folie die aan weerszijden bevestigd wordt.



Figuur 127. “aansluiting betonnen vloer op prefabwand” [92]

Bij een staalplaatbetonvloer kan men ook best een PE-folie voorzien bij de oplegging om deze dan rond het vloerpakket te plooien. Indien die niet mogelijk is dient men de ruimte onder de uitspattingen in de platen op te vullen met PUR-schuim, en best aan de binnenzijde nog een afdichting voorzien met PE-folie die in de wand ingewerkt wordt en aan de vloerplaat bevestigd, vergelijkbaar met de laatste oplossing bij prefabwanden.

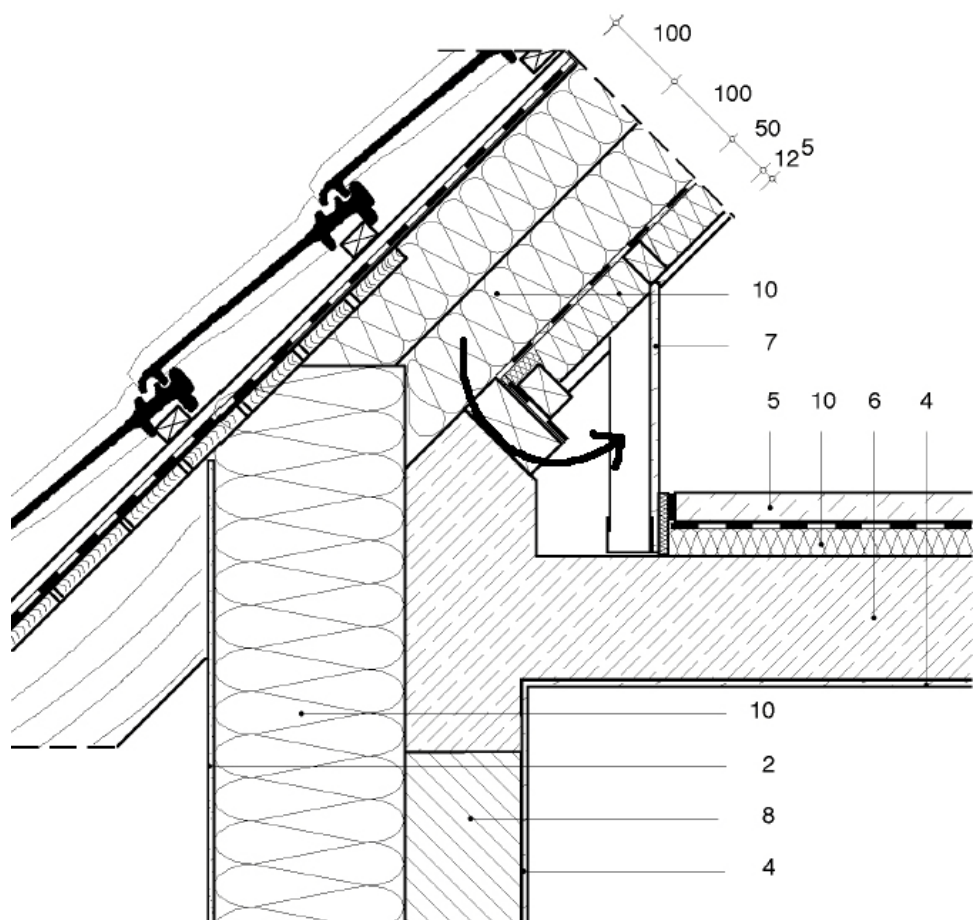
9.3.4) Muur -dak

Dit is een belangrijke aansluiting die bij de 5 massiefbouwwoonungen in open bebouwing uit de test gemiddeld verantwoordelijk is voor 8.1% van de totale luchtlekkage, en loopt in sommige gevallen op tot 12.7%. Daarom is er in de UGENT schattingsmethode ook een onderscheid gemaakt tussen een normale afwerking, $q_{50} = 6.0 \text{ m}^3/(\text{h.m})$, of een luchtdichte

aansluiting zoals beschreven hieronder, $q_{50} = 2.0 \text{ m}^3/(\text{h.m})$. Deze aansluiting wordt best altijd luchtdicht gemaakt, omdat de invloed op de globale luchtdichtheid vrij groot is, en omdat luchtlekkage op de plaats een verhoogd risico inhoudt op condensatie.

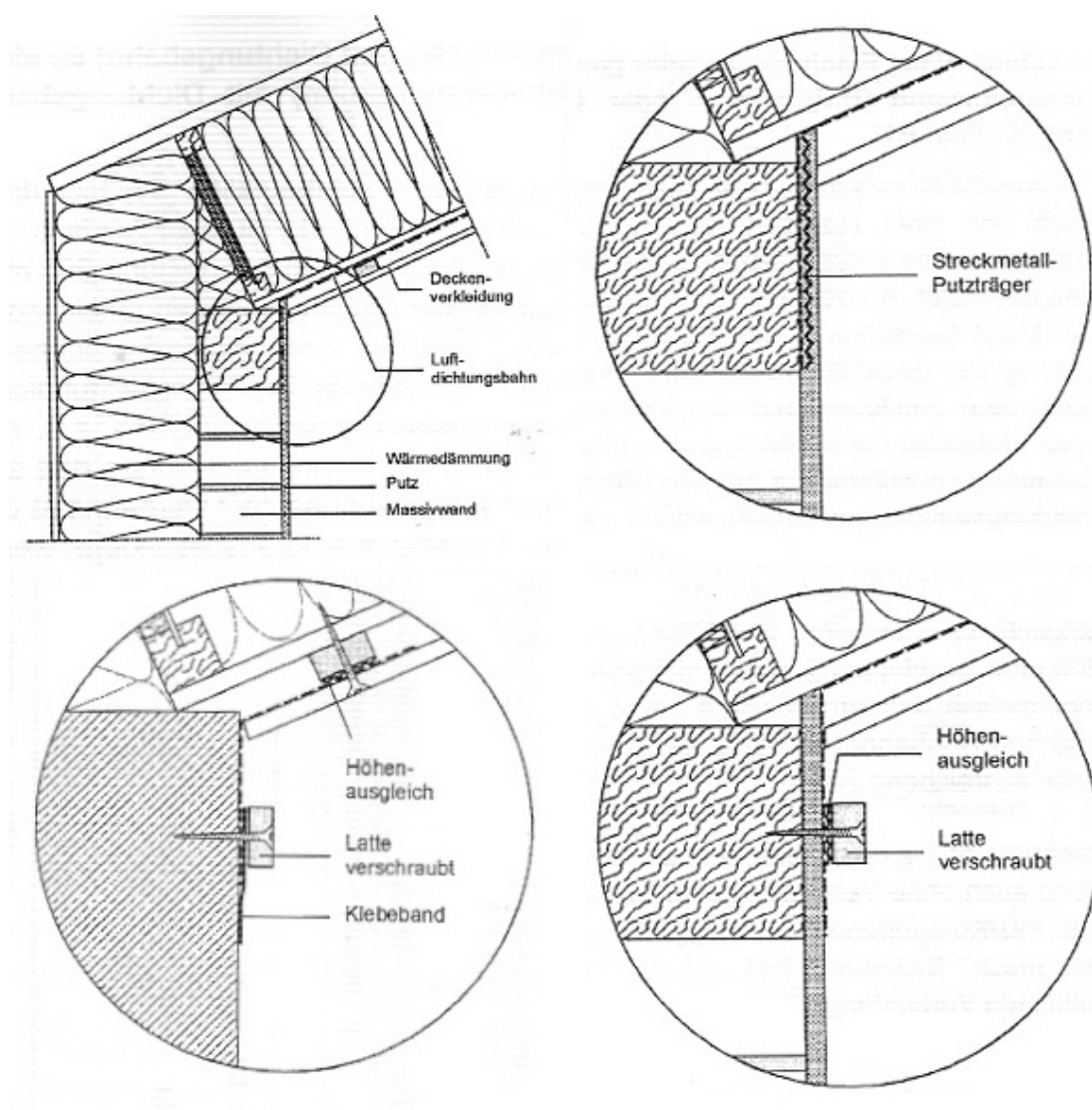
9.3.4.1 Hellend dak

We gaan er steeds van uit dat het een keperdak of gordingendak betreft, en aan de binnenzijde van het houtwerk een dampscherm is aangebracht. De specifieke aansluitingen met de structuur van het dak worden besproken in 9.2.7. Het dampscherm moet dus aangesloten worden aan het luchtdichtheidsscherm van de wand (PE-folie, platen, pleisterwerk). Om de spatkrachten van het dak op te vangen is er bij massiefbouw meestal een betonbalk ter plaatse van de aansluiting tussen wand en dak. In figuur 128 lijkt de luchtdichtheid op het eerste zicht wel in orde, maar op de plaats waar de houten balk (muurplaat) aansluit op de betonnen vloer kan deze voeg onmogelijk luchtdicht zijn. Men kan hout nooit luchtdicht aansluiten op beton.

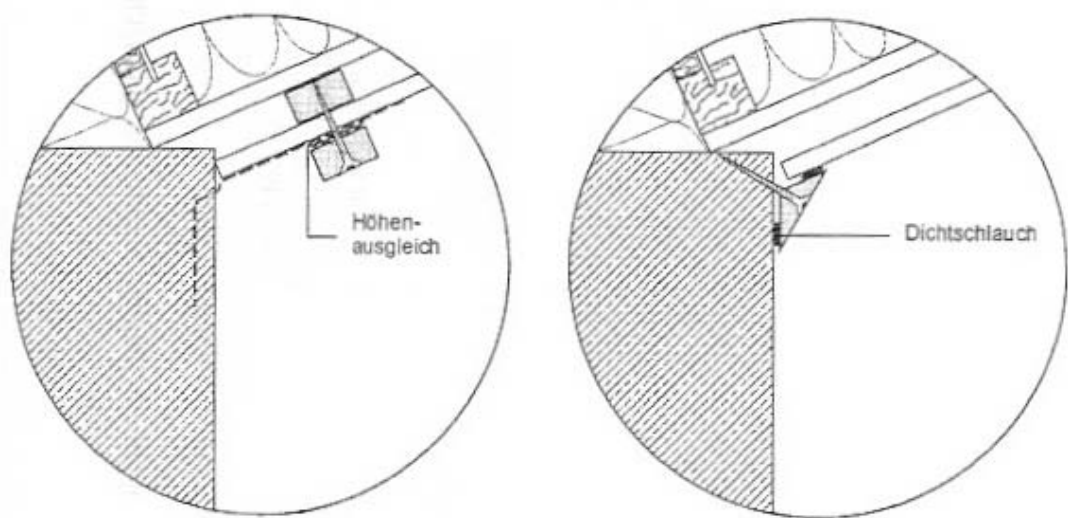


Figuur 128. “aansluiting muur – dak: hoe het niet moet” [100]

Het dampscherm moet doorgetrokken worden over de hoek van de aansluiting, en dan aan de wand bevestigd worden. Bij een houten wand met scherm of platen kan dit door middel van tape of aandruklat, bij pleisterwerk dient met de folie te bevestigen met een pleisterdrager. Indien er geen pleisterwerk aanwezig is op een gemetste muur heeft het geen nut deze aansluiting goed te verzorgen, want het stuk muur is op zich dan al veel te luchtopen. Indien men moet aansluiten op een betonnen muur kan gewerkt worden met aandruklatten of met speciale tape (mits gebruik van de juiste primer indien nodig). Het is bijzonder moeilijk om een folie in te betonneren om later aan te sluiten op het dampscherm.(zie figuur 129 en 130)



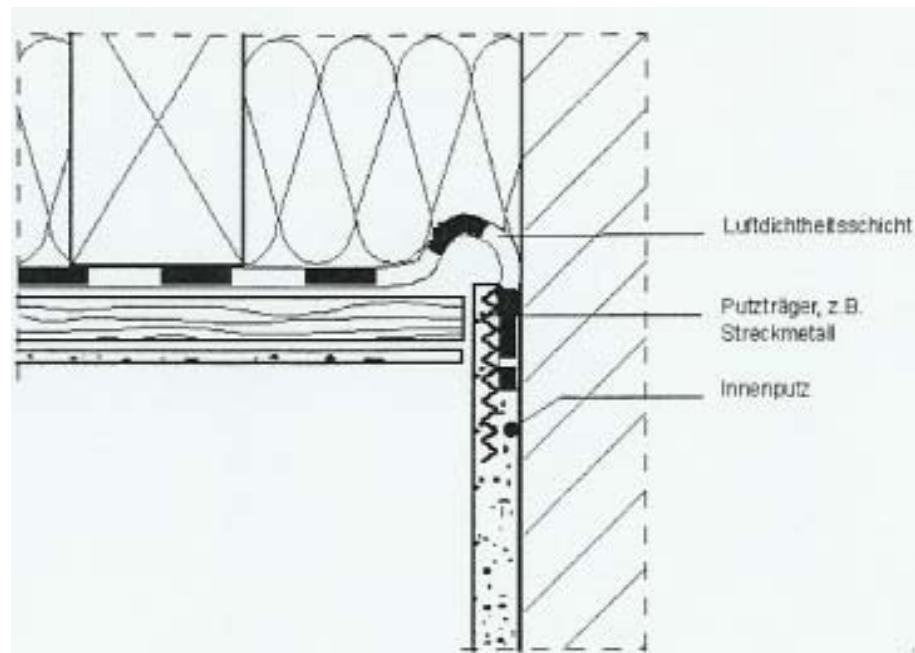
Figuur 129. “aansluiting wand op houten dak 1” [92]



Figuur 130. “aansluiting wand op houten dak 2” [92]

9.3.4.2 Plat dak

Bij een plat dak moet er steeds een dampscherm aangebracht worden onder de isolatie, omdat de dakhuid meestal zeer dampdicht is. In een ideale uitvoering wordt dit dampscherm verbonden zowel met het luchtdichtheidsscherm van de wand als met de dakdichting. Een aansluiting met de dakdichting zorgt er voor dat het pakket isolatie volledig ingesloten is en er geen lucht kan infiltreren. Bij een houten dakconstructie kan men dezelfde techniek toepassen zoals bij de aansluiting vloeren (zie 9.3.3.1). Een folie wordt dan ook op voorhand op de muur gelegd om nadien op te plooiën en aan te sluiten met het dampscherm. Bij betonnen daken is dit ook het ideale geval, maar helaas niet altijd mogelijk. Dan moet men het scherm van de wand aan de binnenzijde luchtdicht bevestigen aan het plafond met een pleisterdrager (figuur 131) of met een aandruklat.



Figuur 131. “aansluiting wand – plat dak: PE-folie met pleisterdrager” [9]

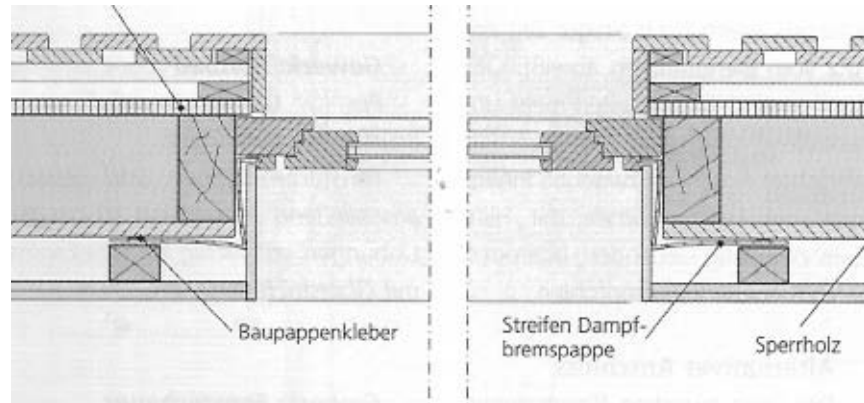
9.3.5) Muur - schrijnwerk

Volgens onze schattingsmethode is de aansluiting tussen schrijnwerk en wanden voor de 5 massiefbouwwoningen in open bebouwing verantwoordelijk voor 10.6% van de totale luchtlekkage, met maxima tot 14.3%. Dit is dus één van de plaatsen die primordiaal moet aangepakt worden indien men de luchtdichtheid van een gebouw wil verbeteren. In de schattingsmethode is er onderscheid gemaakt tussen een zorgvuldige afwerking, $q_{50} = 1.0 \text{ m}^3/(\text{h.m})$, en een onzorgvuldige afwerking, $q_{50} = 5.0 \text{ m}^3/(\text{h.m})$. Het schrijnwerk zelf en de opengaande delen worden besproken in 9.5. Voor passiefwoning moet ook hier een feilloos luchtdichte aansluiting gerealiseerd worden.

9.3.5.1 Houten wand

In een houten wand met platen of PE-folie moet dit scherm best met tape verkleefd worden aan het schrijnwerk, zoals in figuur 132. Andere mogelijkheden zijn PUR-schuim (dat minder goed hecht op sommige houtderivaten), of een cellendband met kit, maar beide alternatieven zijn moeilijk te controleren op een juiste uitvoering. Omdat het raamkader grotendeels zichtbaar blijft moet het scherm in sommige gevallen aan de zijkant van het kader bevestigd worden. Eens de ramen geplaatst zijn is dit praktisch niet doenbaar omdat die kant niet toegankelijk genoeg meer is. De enige manier om dit op een esthetisch verantwoorde manier te doen is door een afzonderlijk scherm reeds aan te brengen op de zijkant van de ramen nog

voor deze geplaatst worden. Dan wordt indien nodig de resterende ruimte opgevuld met isolerend materiaal, en de beugels ter bevestiging van de ramen worden dan door het scherm in de structuur vast gezet. Er zijn een aantal producenten die deze folie reeds bij fabricage voorzien.(zie figuur 133)



Figuur 132. “aansluiting houten wand – schrijnwerk: PE-folie” [10]

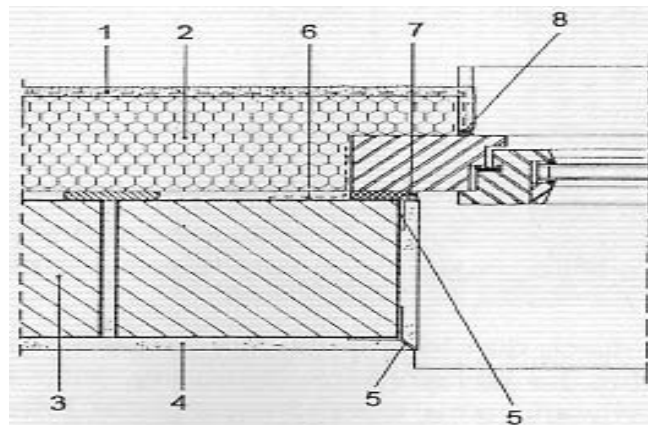


Figuur 133. “raam met luchtscherm bevestigd tijdens fabricage”

Onderaan, bij de vensterbank, kan men hetzelfde principe toepassen. In sommige gevallen is het mogelijk de folie aan de voorzijde vast te maken met tape, omdat de vensterbank er later zal voor geplaatst worden. De aansluiting met de andere folies wordt dan echter minder evident als deze aan de zijkant zitten, omdat ze niet langer in hetzelfde vlak liggen.

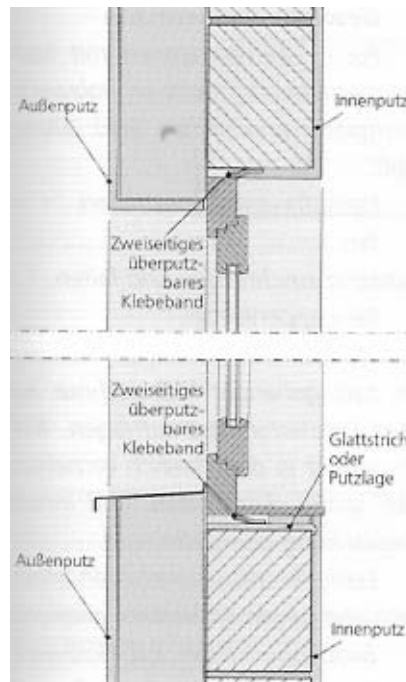
9.3.5.2 Bepleisterde muur

In massiefbouw heeft men het probleem dat de voeg tussen het kader en de muur vaak onregelmatig, ruw en stoffig is. Men moet dan ook proberen deze voeg niet gewoon vol te spuiten met PUR, want meestal is er dan nog een opening tussen het pleisterwerk en het PUR-schuim (deze afwerking behoort dus bij de onzorgvuldige afwerking en $q_{50} = 5.0 \text{ m}^3/(\text{h.m})$). Er zijn twee mogelijkheden voor een goede aansluiting. De eerste mogelijkheid is zoals bij een houten wand, waar men een scherm aanbrengt, in sommige gevallen reeds vooraleer de ramen te plaatsen. Met behulp van een pleisterdrager wordt de folie dan aangesloten op de bepleistering. De tweede methode bestaat er in het pleisterwerk rechtstreeks te laten aansluiten op het raamkader. Dan blijft er echter een kans op geringe lekkage omdat de winddrukken op het raam de aansluiting te veel doet bewegen waardoor er een brosse breuk ontstaat. Voor een ideale afwerking (zoals bij passiefwoningen) moet men ter plaatse van de aansluiting een elastische kitvoeg aanbrengen die de beweging van het schrijnwerk kan opnemen.(figuur 134)



Figuur 134. “aansluiting raamkader: kitvoeg” [9]

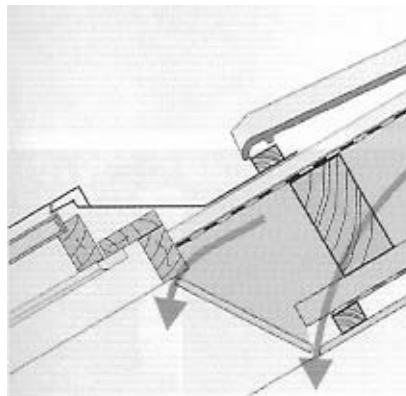
Ter plaatse van de vensterbank kan men dezelfde methode toepassen: een scherm bevestigen aan de onderzijde van het raamkader, en dit over de bovenkant van de muur laten doorlopen, naar beneden plooien en bevestigen met een pleisterdrager. Een andere methode is bovenop de muur een cementlaag aan te brengen zodat deze al luchtdicht is. Door de vensterbank is een deel van het kader van het raam niet zichtbaar, en op die plaats kan men dan met tape een folie bevestigen (figuur 135). Deze folie kan dan worden vastgezet in het cement. In de hoeken moeten de verschillende folies met tape aan elkaar gezet worden om plaatselijke lekken te vermijden.



Figuur 135. “aansluiting vensterbank: folie of tape op cementlaag” [10]

9.3.5.3 Keperdak

De lekkage bij ramen in keperdaken wordt op dezelfde manier berekend als alle andere raamaansluitingen. Al te vaak wordt geen aandacht besteed aan deze aansluiting; bij slechte uitvoering verhoogt dit het risico op condensatieproblemen.



Figuur 136. “luchtstromen van en naar dakisolatie bij dakraam” [10]

De meeste fabrikanten van dakramen bieden nu ook speciale luchtdichtheidsschermen aan die gemakkelijk te installeren zijn, zelfs door doe-het-zelvers (figuur 137). In principe zou dit dus geen problemen mogen leveren. [106]



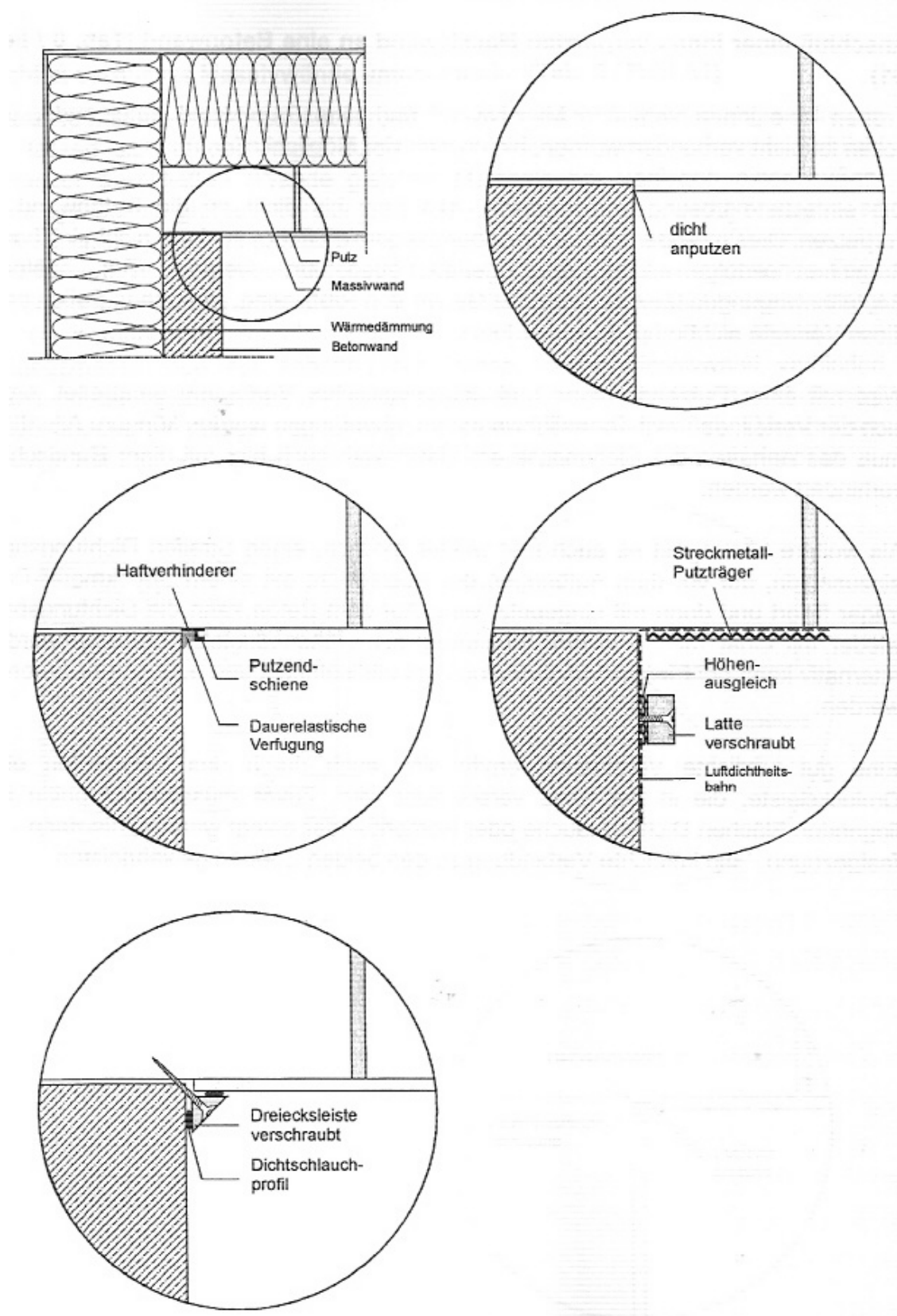
Figuur 137. “aansluitingsscherm dakraam VELUX” [106]

9.3.6) Muur - muur

Geen enkele bestaande schattingsmethode houdt rekening met lekkage bij de aansluiting van verschillende wanden. Bij de meeste woningen is de lekkage langs deze aansluitingen te verwaarlozen, maar bij passiefwoningen dienen ook deze aansluitingen correct te gebeuren. Indien de muren dezelfde afwerking hebben zal de aansluiting van dezelfde aard zijn als de verwerking in het vlak: platen worden verkleefd, folies overlappen en worden verkleefd. Pleisterwerk wordt soms gebruikt als luchtdichtheidsscherm in passiefwoningen, maar de aansluitingen dienen dan ook naar behoren uitgevoerd te worden. Elke hoekaansluiting van pleisterwerk waar er kans is op zettingen of dilatatie moet dan met een kitvoeg afgewerkt worden.

Indien de muren niet hetzelfde luchtdichtheidsscherm hebben moet men aandacht besteden aan een correcte aansluiting. Verschillende materialen hebben verschillende uitzettingscoëfficiënten, reageren anders op vocht en verouderen op een andere manier... Als men bvb pleisterwerk wil aansluiten op een betonnen muur moet men een aansluiting voorzien die niet star is (figuur 138). Mogelijkheden zijn een kitvoeg of een folie die ingepleisterd wordt of bevestigd met een aandruklat. Een folie wordt een stukje doorgetrokken over de betonnen muur en daar bevestigd met een aandruklat of pleisterdrager (als de muur bepleisterd wordt). Platen worden ook aan een betonmuur aangesloten met een

folie, of direct met een tape (mits de nodige speling om geen spanningen door beweging over te dragen op de verkleving).



Figuur 138. “aansluiting stenen muur op betonmuur” [92]

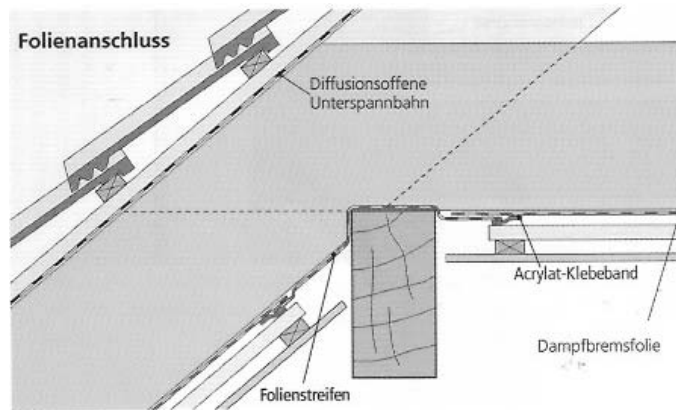
9.3.7) Nok , kil, noordboom...

In de UGENT schattingsmethode wordt voor deze aansluiting steeds gerekend met $0.50\text{m}^3/(\text{h.m})$, ongeacht de uitvoeringskwaliteit. Deze aansluiting is dan ook slechts verantwoordelijk voor 0.7% van de totale luchtlekkage. Toch zijn we er van overtuigd dat de lekkage door aansluitingen aan het dak veel groter kan zijn. Ook de structuur van het dak kan aanleiding geven tot verschillende perforaties van het dampscherm. Het was door een gebrek aan gegevens niet mogelijk de schattingsmethode zo gedetailleerd te maken. De som van de lengtes van nok, kil en noordboom is dus veeleer een indicatie voor de complexiteit van het dak. Bovendien is de luchtdichtheid heel sterk afhankelijk van de afwerkingkwaliteit van de aansluitingen. Men dient dus wel degelijk voldoende aandacht te besteden aan deze plaatsen, omdat lekkage daar bovendien een verhoogd condensatierisico met zich meebrengt.

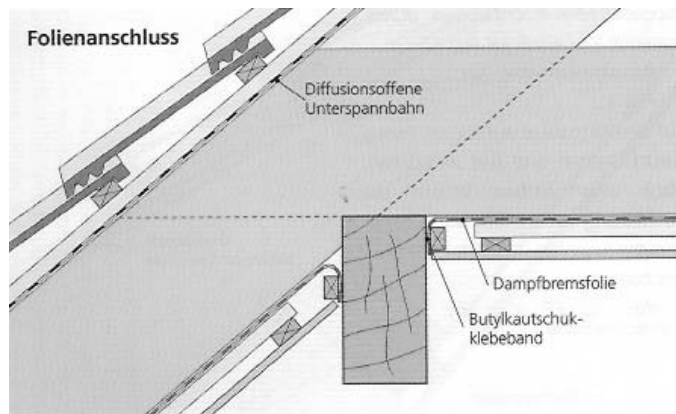
Meestal wordt het luchtdichtheidsscherm geplaatst als de dakstructuur volledig is. Daardoor is het op sommige plaatsen niet altijd mogelijk een continu scherm te voorzien. Ofwel dient men deze perforaties op de juiste manier af te dichten, of men kan proberen de folies reeds klaar te steken tijdens de constructie van de dragende structuur. Dit is echter niet evident omdat het meestal verschillende aannemers betreft die dan tegelijk aan hetzelfde onderdeel moeten werken.

9.3.7.1 Gordingen

In een gordingendak liggen er meestal kepers bovenop de gordingen. De isolatie wordt dan tussen de kepers, en soms ook tussen de gordingen gestoken. De kepers steunen op de gordingen en de gordingen steunen op de spanten. Het dampscherm zit normaalgezien juist onder de isolatie. Ofwel perforeren de gordingen dus het dampscherm, of zitten de spanten in de weg. Er bestaan drie mogelijke oplossingen om de luchtdichtheid bij die aansluiting te garanderen. Ofwel wordt tijdens het zetten van de houten draagconstructie op bepaalde plaatsen folies tussen de elementen ingewerkt, die later kunnen aangesloten worden op het dampscherm aan de binnenzijde (figuur 139). Of met maakt rondom elke doorboring een luchtdichte aansluiting op de perforerende balk (figuur 140). Deze laatste oplossing is niet zo evident omdat die aansluiting nogal bewerkelijk is.

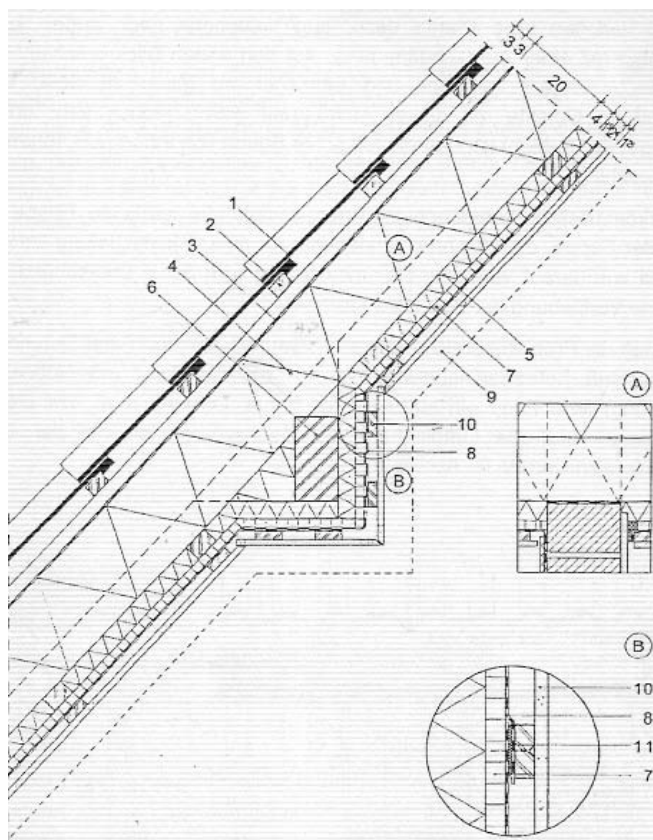


Figuur 139. “gordingen: plaatsing folie tijdens opbouw dak” [10]



Figuur 140. “gordingen: folie luchtdicht aansluiten op balk” [10]

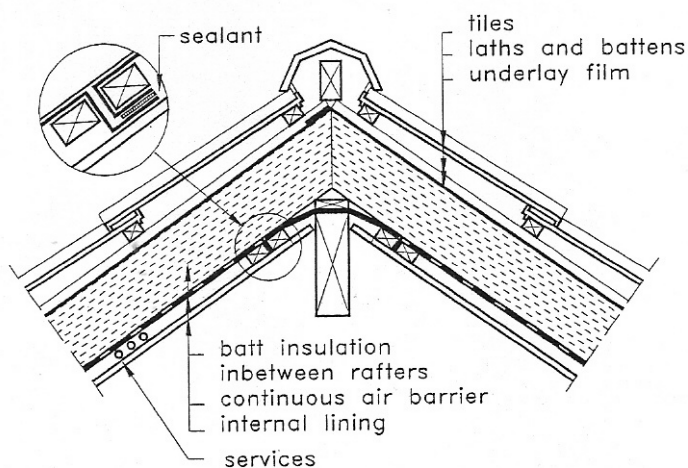
Een laatste mogelijkheid is dat de balk volledig wordt ingepakt, en het dampscherm zo over de balk verder door loopt.(figuur 141) Deze oplossing is echter zeer bewerkelijk en wordt zelden of nooit toegepast. Bovendien sluit de gording op zich dan weer aan op een spant, dus ergens moet het luchtdichtheidsscherm onderbroken worden.



Figuur 141. “gordingen: omhullen van balk met isolatie en folie” [9]

9.3.7.2 Nok, noordboom

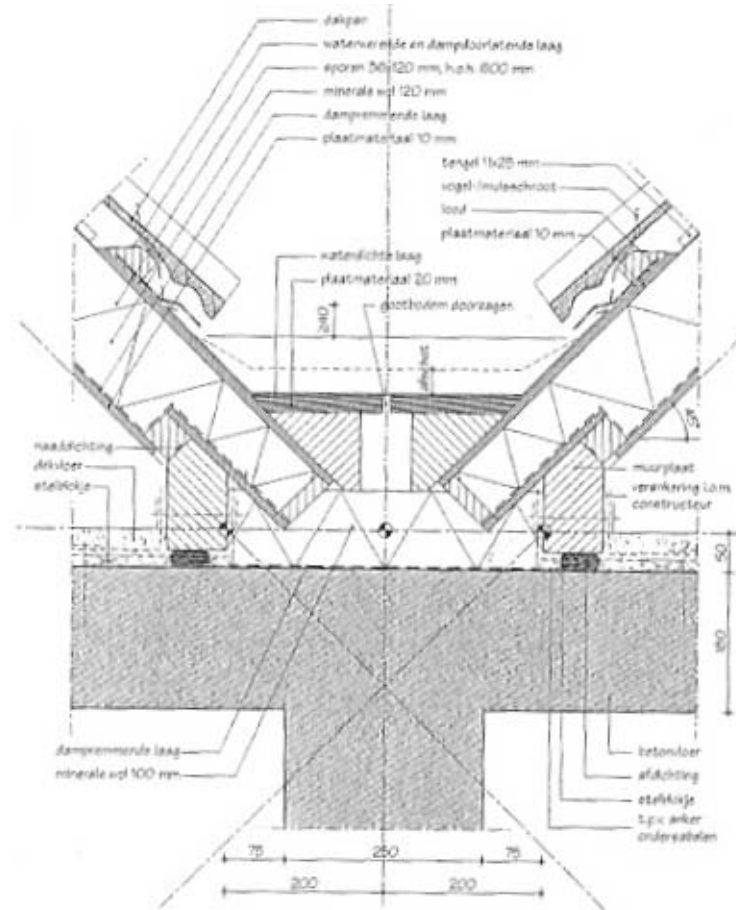
Deze aansluiting is nogal vergelijkbaar met die van de gordingen. Men heeft dezelfde twee mogelijkheden, ofwel brengt men het dampscherm aan tijdens de constructie van de dakstructuur (figuur 142), anderzijds is het iets eenvoudiger een plaat aan te brengen onder de nokbalk waarop het dampscherm bevestigd kan worden.



Figuur 142. “aansluiting dampscherm bij nok” [48]

9.3.7.3 Kil

Ook een kilgoot is vergelijkbaar met de vorige aansluitingen. De aansluiting is in vele gevallen nog bewerkelijker dan gordingen. In figuur 143 is een voorbeeld gegeven van een kil op een prefabmuur ondersteuning. [93]

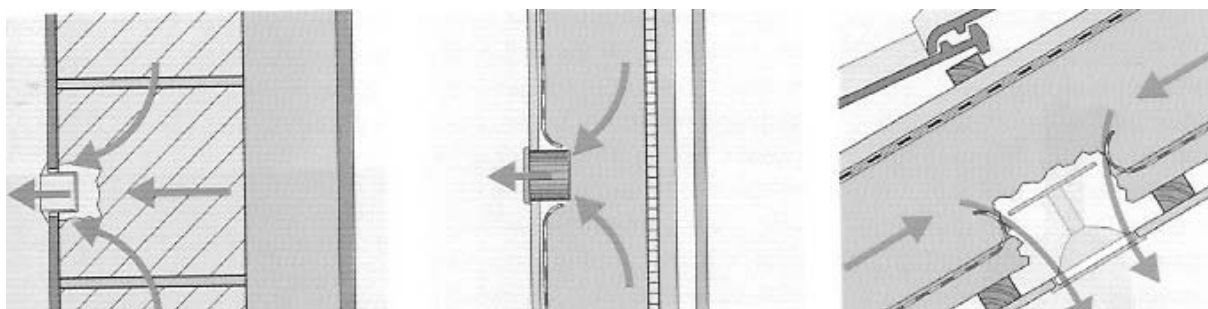


Figuur 143. “aansluiting dampscherm bij kilgoot op prefabconstructie”

9.4) Puntvormige doorboringen

Het is moeilijk in te schatten wat het absolute aandeel van perforaties in de totale lekkage is. Bij de metingen zijn perforaties en doorvoeren niet systematisch gezocht en berekend op hun doorlatendheid. Het is ook heel moeilijk om in planningsfase alle kabels en doorvoeren te kunnen voorzien. Toch kunnen individuele lekken een heel grote invloed hebben op de globale luchtdichtheid. Bovendien bleek uit een Duitse studie dat in ongeveer alle woningen onvoldoende luchtdicht afgewerkte doorvoeren van leidingen te vinden zijn. Een aantal types doorboringen kunnen we dulden in gewone woningbouw, bij passiefhuizen moet elk lek vermeden worden.

De meest voorkomende oorzaak zijn doorboringen van het luchtdichtheidsscherm voor leidingen, contactdozen en ingebouwde spots. In basisregel 4 staat dat doorboringen in de eerste plaats in de mate van het mogelijke vermeden moeten worden. Hier moet dus een degelijke planning zijn om het aantal doorboringen te beperken, en bovendien moet er op regelmatige basis controle zijn ter plaatse om een goede uitvoering te garanderen.



Figuur 144. “perforaties luchtdichtheidsscherm voor contactdozen en inbouwspots” [10]

9.4.1) Bepleisterde wand

Men moet het pleisterwerk zo goed mogelijk laten aansluiten op de kabel of het element dat de muur perforiert. Als het gat te groot is kan dit in de muur zelf opgespoten worden met PUR-schuim, en aan het oppervlak met pleister afgewerkt worden. Bij passiefwoningen is dit meestal niet voldoende: daar moet men proberen elke perforatie te weren en indien mogelijk met een speciale electropouw werken. Als er toch perforaties zouden zijn moeten deze met bijzondere aandacht afgewerkt worden: de aansluiting met het pleisterwerk kan gedeeltelijk met gewone pleister, maar rond het element moet een flexibele aansluiting gemaakt worden, bvb met een elastische kit. In de handel zijn een aantal elementen te verkrijgen om luchtdichte aansluitingen te garanderen voor stopcontacten, schakelaars...[98]



Figuur 145. “inbouwdoos stopcontacten 1”

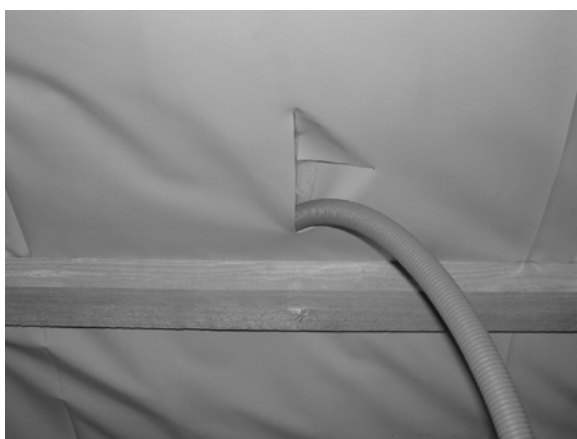


Figuur 146. “inbouwdoos stopcontacten 2”

Leidingen die met thermische isolatie omgeven zijn, worden best ter plaatse van de doorvoer dichtgeknoopt. Op die manier is men zeker dat er geen luchtstroom mogelijk is in de ruimte tussen de leiding en de isolatie.

9.4.2) PE-folie, platen

Bij doorboringen van deze materialen is het vaak nog eenvoudiger een goede aansluiting te maken. Ofwel gebruikt men tape om de doorvoer volledig luchtdicht af te sluiten, of men gebruikt geprefabriceerde aansluitingsmanchetten. Bij een doorvoer moet er bovendien over waken dat de scheur in de toekomst niet verder kan opengaan door spanningen die op het scherm komen. De tape of de manchet rondom de scheur kan een extra versterking zijn om dit te vermijden. Ook bij deze wanden worden geïsoleerde leidingen best afgesnoerd ter plaatse van de doorvoer. [97] [105]

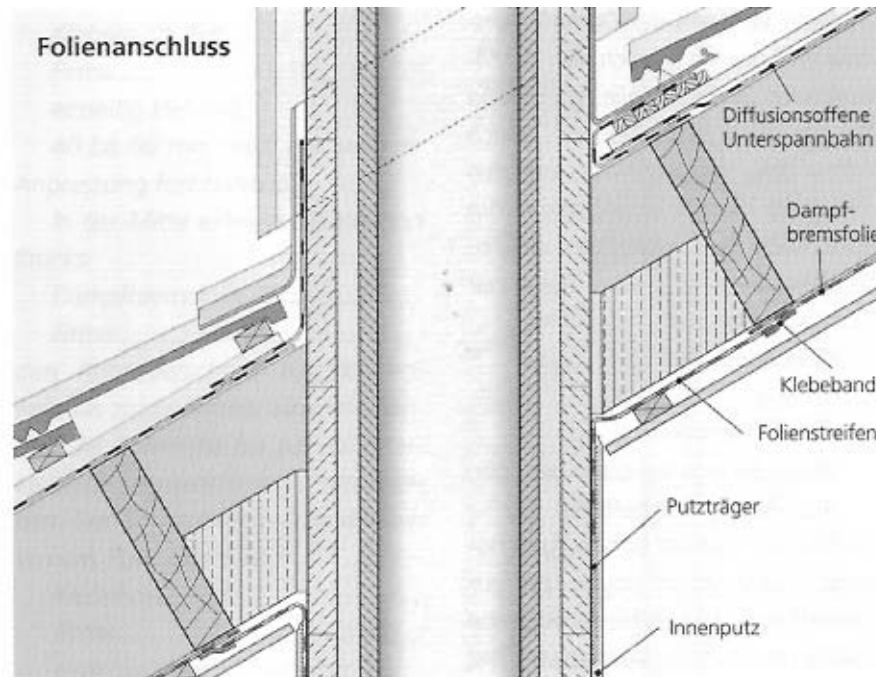


Figuur 147. “doorvoer leiding PE-folie”

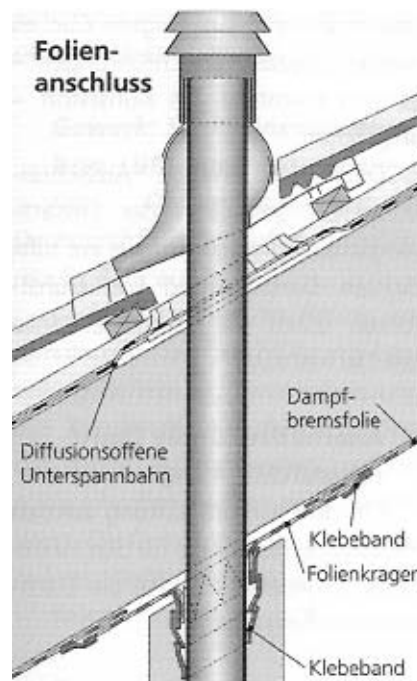


Figuur 148. “manchet PE-folie”

Ook schouwen vormen vaak moeilijke punten die vaak zeer slecht afgedicht worden. In de UGENT-schattingmethode hebben we een schouwdoorvoer dan ook sterk laten doorwegen. Nochtans zijn geen exotische details nodig om een goede aansluiting te verzekeren. In de eerste plaats dient natuurlijk de schouw zelf zo luchtdicht mogelijk afgewerkt te zijn. De aansluiting van de schouw met het dak is vergelijkbaar met de normale aansluiting van het dak met een wand. Indien de schouw zelf bepleisterd is kan het dampscherm van het dak met een pleisterdrager bevestigd worden op de schouw. Nadat de schouw dan volledig geplamuurd is zal de aansluiting perfect luchtdicht zijn (figuur 149). Indien er geen pleisterwerk op de schouw komt kan men de aansluiting realiseren met tape of een speciaal manchet.(figuur 150)



Figuur 149. “aansluiting bepleisterde schouw – dampscherm” [10]



Figuur 150. “aansluiting schouw – dampscherm met plakband en manchiet” [10]

9.5) Inbouwelementen

Verschillende elementen worden geprefabriceerd in atelier of fabriek en worden zo aangeleverd op de werf. De belangrijkste zijn natuurlijk ramen en deuren, maar ook dampkappen, open haarden en rolluiken kunnen van belang zijn. De resultaten van de metingen op dit gebied zijn terug te vinden in 2.4.3.7.

9.5.1) Dampkap

Elke dampkap die geplaatst wordt vandaag moet absoluut een afsluiting bezitten. De meeste producten op de markt voldoen hier ook aan vandaag. Een dampkap zonder afsluiting geeft bij een drukverschil van 50 Pa een lekkagedebiet van 300 tot 600 m³/h, met afsluiting is dit slechts 20 tot 50 m³/h. Voor passiefwoningen zijn geen specifieke eisen van toepassing: enkel de keuze voor een degelijk toestel van goede kwaliteit kan een betere luchtdichtheid met zich meebrengen.

9.5.2) Open haard

Een open haard wordt altijd geplaatst met een klep die sluitbaar is. Het lekkagedebiet als de klep niet gesloten is wordt bijzonder groot, afhankelijk van de geometrie van de haard en de schouw. Bij gesloten stand varieert het debiet bij een drukverschil van 50 Pa tussen 20 m³/h en 448m³/h in de literatuur. In de UGENT schattingsmethode hebben we het lekkagedebiet vastgelegd op 30 m³/h, maar kan in praktijk soms een stuk hoger zijn. Op dat moment is de luchtdichtheid vooral afhankelijk van de correcte plaatsing van de haard en een verzorgde afwerking. In passiefwoningen is het niet evident een open haard te plaatsen. De controle op goede uitvoering is bijzonder moeilijk, en kan in principe enkel met een blowerdoor meting.

9.5.3) Rolluiken

Er is relatief weinig onderzoek verricht naar de lekkage bij rolluiken. Niet alle landen hebben dezelfde bouwtraditie, en rolluiken komen dan ook niet overal even frequent voor als in Vlaanderen. In de UGENT schattingsmethode zijn we uitgegaan van een lekkage gelijk aan 1m³ per uur bij een drukverschil van 50 Pa. Dit zal in vele gevallen echter veel te laag ingeschat zijn. De werkelijke lekkage zal vooral afhangen van de aansluiting van het deksel aan de binnenzijde. Dit moet aangesloten zijn met een rubberen dichtingprofiel of met een cellenband. Ook de rolluikgordel is in veel gevallen een luchtlek, in het buitenland zijn reeds inbouwelementen te vinden die de lekkage hierlangs verminderen. Ook de aansluiting van het luchtdichtheidsscherm van de wand op de rolluikkast is niet evident. Bij pleisterwerk kan dit het best met een elastische kit, bij houtskeletbouw kan men werken met tape of een aandruklat. Bij passiefhuizen kan men interne rolluiken beter vermijden.

9.5.4) Schrijnwerk

Het schrijnwerk is voor de 5 massiefbouwwoningen in open bebouwing verantwoordelijk voor 30% van de totale lekverliezen, bij houtskeletbouw 25%. Opengaande delen horen nu altijd een tochtstrip te hebben, onafhankelijk van de materiaalkeuze. In tweede instantie is dan vooral het type sluiting belangrijk. Zeker bij deuren en grotere ramen zal er een groot verschil zijn tussen types met 1-puntssluitingen en meerpuntssluitingen. In België bestaan twee systemen om de luchtdichtheid van ramen aan te duiden: één volgens EN 12207, en één volgens STS 52.

In EN 12207:1999 [103] (in 2000 omgezet in nationale wetgeving) is een classificatie opgesteld om de luchtdichtheid van schrijnwerk weer te geven. Aan de hand van de luchtdoorlatendheid bij een drukverschil van 50 Pa is men tot de volgende klassen gekomen:

Klasse 1	$4 \text{ m}^3/\text{h.m} < q_{50} < 7.5 \text{ m}^3/\text{h.m}$
Klasse 2	$1.5 \text{ m}^3/\text{h.m} < q_{50} < 4 \text{ m}^3/\text{h.m}$
Klasse 3	$0.4 \text{ m}^3/\text{h.m} < q_{50} < 1.5 \text{ m}^3/\text{h.m}$
Klasse 4	$q_{50} < 0.4 \text{ m}^3/\text{h.m}$

Men moet dus steeds kiezen voor ramen die minsten tot klasse 1 behoren, beter nog tot klasse 2, afhankelijk van de prijs die men hiervoor betaalt. Aan de hand van de berekeningen in 7.5.2 kan men dan bepalen welke ramen economisch verantwoord zijn. Aan de hand van de schattingsmethode kan gekeken worden welke inspanningen het meest renderen, zo moet men ook bekijken welke klasse ramen men het best neemt. Voor passiefwoningen moet men minstens klasse 3 kiezen: stel dat je 50 lopende meter opengaande voegen van ramen en deuren hebt, dan kan dit voor klasse 2 al zorgen voor een lucht volumestroom van $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Indien mogelijk kiest men beter nog voor klasse 4.

In STS 52 is ook een classificatie opgenomen in verband met luchtdichtheid: hier maakt men onderscheid tussen 3 klassen. Aan de hand van de luchtdoorlatendheid bij een drukverschil van 50 Pa is men tot de volgende klassen gekomen:

Klasse PA2:	$2 \text{ m}^3/\text{h.m} < q_{50} < 3.5 \text{ m}^3/\text{h.m}$
Klasse PA2 B:	$1.3 \text{ m}^3/\text{h.m} < q_{50} < 2 \text{ m}^3/\text{h.m}$
Klasse PA3:	$q_{50} < 1.3 \text{ m}^3/\text{h.m}$

Men kan dus eventueel voor ramen klasse PA2 kiezen voor normale woningen, voor passiefwoningen moet men zonder twijfel klasse PA3 kiezen.

Uit verschillende studies is gebleken dat er grote lekverliezen zijn naar onverwarmde ruimtes. Vaak zijn het binnendeuren die deze ruimtes afschermen van de rest van het gebouw. Men moet proberen dit te vermijden en ook goed sluitende deuren voorzien naar ruimtes die niet verwarmd worden, zoals ook zolderluiken goed moeten sluiten.

9.6) Besluit

Indien men in een gebouw een goede luchtdichtheid wil bereiken moet men beroep doen op werklieden die weten waarom een aantal maatregelen nodig zijn. Zolang de mensen die het werk praktisch uitvoeren de noodzaak niet inzien van een aantal veranderingen ten opzichte van vroeger zal het moeilijk zijn op een efficiënte manier luchtdichtheid te implementeren in het bouwconcept. Men is toch niet in staat alles te controleren op fouten, dus de werklieden moeten maximaal bewust zijn van de impact van luchtdichtheid.

Een consequente toepassing van de principes uitgelegd in dit hoofdstuk vormt de basis om tot een goede luchtdichtheid te komen. Het belang van een goede planning en coördinatie mag echter niet onderschat worden: er dienen gepaste instructies gegeven te worden aan alle partijen die op de werf komen, inclusief zij die op het eerste gezicht niets te maken hebben met luchtdichtheid.

10) Besluit

De opzet van deze thesis is een samenhangend beeld te geven van alle elementen die met luchtdichtheid te maken hebben, en bovendien een methode aan te reiken om in projecten op een oordeelkundige manier een bepaalde luchtdichtheid te realiseren.

Uit een onderzoek naar de verschillende grootheden hebben we besloten dat de n_{50} -waarde veruit de beste manier is om de luchtdichtheid van een gebouw te karakteriseren, en hebben we een procedure opgesteld om deze te meten en om te rekenen naar normomstandigheden voor een goede vergelijkbaarheid. Aan de hand van de verschillende schattingsmethodes die bestaan zijn we tot een geïntegreerde methode gekomen die correcter en gebruiksvriendelijker is, en de werkelijke lekkageverdeling zo goed mogelijk weergeeft. Aan de hand van deze methode kan men in ontwerpfase kijken welke facetten prioritair aandacht moeten krijgen met betrekking tot luchtdichtheid, en hoe deze moet verwezenlijkt worden. Er is dan ook aandacht besteed aan de praktische realisatie in functie van de luchtdichtheid die men wil bereiken. Verder hebben we de gevolgen van luchtlekken besproken, de invloed op het thermisch gedrag van wanden, invloed op vochthuishouding het verband met akoestiek en alle andere parameters en eigenschappen die van belang zijn. Om luchtdichtheid te kunnen kaderen binnen de totale energiehuishouding van een gebouw en de invloed er op zijn de verschillende bestaande modellen besproken die de infiltratie afleiden uit de gemeten luchtdichtheid.

BIBLIOGRAFIE

Bibliografie

De bibliografische gegevens zonder verwijzingsnummer hebben bijgedragen tot de achtergrondinformatie voor bepaalde onderdelen, maar worden niet op een directe manier gebruikt als referentie voor de tekst.

Boeken

- [2] - J. Wieme-Lenaerts; R. Bouciqué, “Algemene Natuurkunde: Thermodynamica – Fluida”, faculteit toegepaste wetenschappen, Universiteit Gent, 1999
- [9] - J. Zeller; S. Dorschky; R. Borsch-Laaks; W. Feist, “Luftdichtigkeit von gebäuden: luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden“, uitgeverij Institut Wohnen und Umwelt, 1995
- [10] - J. Zeller; K. Biasin, “Luftdichtigkeit von Wohngebäuden“, derde uitgave, uitgeverij VWEW Energieverlag GmbH, 2002
- [14] - American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, “1993 ASHRAE Handbook FUNDAMENTALS”, ASHRAE, 1993
- [15] - Stichting BouwResearch, “Energie-efficiënt ventileren”, Stichting Bouwresearch, 1999
- [16] - Stichting BouwResearch, “Handboek vocht en ventilatie – Basis van ontwerp, uitvoering en beheer”, Stichting Bouwresearch, 2000
- [17] - Stichting BouwResearch, “Luchtdicht bouwen – Deel A: Ontwerpaanbevelingen”, Stichting Bouwresearch, 2001
- [18] - Air Infiltration and Ventilation Centre, „Technical Note 44 – An Analysis and Data Summary of the AIVC’s Numerical Database“, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1994
- [23] - J. Kronvall, “Airtightness – measurement and measurement methods“, Swedish Council for Building Research, 1980
- [26] - The Energy Conservatory, “Minneapolis Blower Door – Operation manual Model 3”, The Energy Conservatory, 1993
- [32] - M. Orme, “Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations”, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1999
- [33] - M. Hall; A. Geißler; G. Hauser, “Quantifizierung einzelner Leckagen und Leckagewege bei Gebäuden in Holzbauart. Abschlußbericht“, Fraunhofer IRB Verlag, 2000
- [34] - T. Bolender; W. Eicke-Hennig, “Luftdichtheit der Gebäudehülle. Probleme und Lösungen. Seminar-Dokumentation“, uitgeverij Institut Wohnen und Umwelt, 1998
- [37] - A. De Naeyer, „Handboek Onderhoud, Restauratie, Renovatie“, Kluwer, 1999

- [49] - A. Janssens, “Bouwfysica 1”, Universiteit Gent, 2002
- [50] - H. Hens, “Warmte- en massatransport – Bouwfysica 1”, acco / Amersfoort, 2000
- [55] - G. Vermeir, “Bouwakoestiek”, tweede herziene uitgave, uitgeverij acco, 1999
- [56] - A. Janssens, “Bouwfysica 2: Bouwakoestiek”, Universiteit Gent, 2003
- [57] - J.D. Turner; A.J. Pretlove, “Acoustics for engineers”, Macmillan, 1991
- [64] - Air Infiltration and Ventilation Centre; M. Basset, “Technical Note AIVC 27 – Infiltration and leakage paths in single family houses – a multizone infiltration case study”, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1990
- [65] - Air Infiltration and Ventilation Centre, ”Technical Note 47 – Energy Requirements for Conditioning of Ventilating Air”, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1995
- [66] - A.C. van der Linder; A.M.S. Weersink; A. Zeegers, P. Erdtsieck, F.A.J. Keizer, “
- [67] - D. Clements-Croome, “Naturally Ventilated Buildings – Buildings for the senses, economy and society”, Chapman & Hall, 1997
- [68] - H. Hens, “Gebouw, energie, verwarming, ventilatie – 3/2a Toegepaste bouwfysica en installaties”, acco / Amersfoort, 1996
- [71] - W. Feist, “Das Niedrigenergiehaus”, C.F. Müller Verlag Heidelberg, vijfde nageziene oplage, 1998
- [72] - International Energy Agency, “Condensation and Energy Sourcebook – Report annex XIV”, volume 1, 1991
- [73] - J. Zeller, “Niedrigenergiehäuser planen – Luftundichtheit und Wärmebrücken vermeiden. Seminar-Dokumentation“, uitgeverij Institut Wohnen und Umwelt, 1998
- [74] - Institut Wohnen und Umwelt, “Wind- und Luftdichtigkeit bei geneigten Dächern. Wissenwertes über die Luftdichtigkeit von Dächern“, uitgeverij Institut Wohnen und Umwelt, 1993
- [89] - P. Soren; W. Feist; V. Sariri, “Luftdichte Projektierung von Passivhäusern“, Passivhaus Institut Darmstadt, 1999
- [91] - Stichting BouwResearch, “Luchtdicht bouwen – Deel B: uitvoeringsaanbevelingen”, Stichting Bouwresearch, 2001
- [92] - C. Grobe, “Passivhäuser – planen und bauen”, CALLWEY, 2002

W. Feist; V. Sariri, "Stellungnahme zur Vornorm DIN V 4108 Teil 6:2001 aus Sicht der Passivhausentwicklung", Passivhaus Institut Darmstadt, 2001

NOVEM, "Ventilatiesystemen, stand van de techniek, veelbelovende ontwikkelingen, 2000", NOVEM, 2000

J. Schnieders; M. Such, "Untersuchung der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzenheim. Wissenschaftlicher Abschlußbericht", Passivhaus Institut Darmstadt, 1998

Artikels

[1] - A. Anderson, "The History of the Blower Door", Home Energy Magazine

[3] - A. Geißler; G. Hauser, "Kenngrößen zur Beschreibung der Luftdichtheit von Gebäuden", wksb, uitzonderlijke editie december 1995, p24-28

[4] - M. Hall, "Quantifizierung von Luftdichtheits-Leckagen", bauen mit holz, nummer 8, 2004

[5] - A. Geißler; G. Hauser, "Messung und Kennzeichnung der Luftdichtheit von Gebäuden", bau zeitung, nummer 3, 1997, p79-83

[6] - G. Tsongas, "Building Tightness Guidelines: When Is a House Too Tight?", Home Energy Magazine, nummer 2, 1993

[7] - D. Keefe, "Introduction to Blower Doors", Home Energy Magazine

[8] - A. Geißler, "Auswertung von Meßergebnissen zur Luftdichtheit von Gebäuden", Gesundheits-Ingenieur, nummer 1, 2001, p31-37

[19] - A.C. Äsk, "Ventilation and Air Leakage", ASHRAE Journal, volume 45, nummer 11, 2003, p28-36

[25] - A. Geißler, "Genauigkeit von Luftdichtheitsmessungen", Tagungsband des 4. EUZ BlowerDoor-Symposiums, Hannover, 14 Oktober 1999, p14-20

[27] - A. Geißler; T. Bolender; G. Hauser, „Blower Door-Messungen – erweiterte Meßmethoden“, HLH Bd., nummer 5, 1997, p24-31

[29] - T. Bolender, "Messung der Luftdurchlässigkeit an großen Gebäuden", Bauphysik, nummer 1, 2004, p49-50

[30] - P. Simons, "Luftdichtheitskonzepte für große Gebäude und die Überprüfung mit der Blower Door", ARCONIS, nummer 2, 2000, p31-35

[35] - Canada Mortgage and Housing Corporation, "Air leakage characteristics, test methods and specifications for large buildings",

- [36] - M. Hall; A. Geißler, “Blower Door-Meßtechnik – Der Leakageverteilung auf der Spur“, wksb, nummer 46, 2001, p6-10
- [38] - A. Geißler, “Blower Door und Thermographie – Möglichkeiten und Fallstricke“, zesde BlowerDoor-Symposium, oktober 2001, Reader
- [39] - A. Geißler, „Luftdichtheit“, 4e GRE congres, 10 en 11 oktober 2000 in Kassel, Reader p315-317
- [46] - A. Janssens; W. Depraetere; H. Hens, “invloed van Luchtinfiltratie op de Prestaties van Sterk Geïsoleerde Muren en Daken”, Bouwfysica, nummer 4, 1999, p22-28
- [48] - A. Janssens, “inwendige condensatie: oorzaken, maatregelen, ontwerpregels“, Vocht in de bouw, Antwerpen 18 november 1999, Reader
- [51] - G. Hauser; A. Maas, “Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten“, BDZ, nummer 24, 1992, p97-100
- [52] - T. Brennan; J.B. Cummings; J. Lstiburek, “Unplanned Airflows & Moisture Problems”, ASHRAE Journal, volume 44, nummer 11, 2002, p44-52
- [53] - P. Eberhard, “Gebäude-Undichtigkeiten und Wärmerückgewinnung beim Lüften“, TAB, nummer 4, 2003, p51-56
- [54] - W.A.Y. Anis, “The Impact of Airtightness On System Design“, ASHRAE Journal, volume 43, nummer 12, 2001, p31-35
- [58] - C. Chody, “Lawaaï kan uw gezondheid schaden”, beter bouwen en verbouwen, nummer 189, 2003, p62-80
- [59] - B. Ingelaere, “optimale geluidsisolatie tussen rijwoningen”, WTCB tijdschrift, lente 2002, p32-47
- [60] - M. Van Damme, “Akoestische invloed van de afwerking van muren uit metselwerk”, WTCB-dossiers, katern 7, 2^e semester 2004, p1-4
- [61] - D. Soubrier, “Europese normalisatie inzake bouwakoestiek(2)”, WTCB tijdschrift, zomer 1999, p42-52
- [62] - B. Ingelaere, “Akoestisch comfort binnen woningen – bescherming tegen vliegtuiglawaai”, WTCB tijdschrift, herfst 2000, p25-43
- [63] - G. Vermeir, “Ontwerp voor een nieuwe norm geluidsisolatie in zijn context“, Studiedag -de stille(re) woning- 9 juni 2004, Technologisch Instituut, Reader p4-28
- [64] - L. Evenhuis; J. Groenendijk, “kierterm: de relatie tussen geluidwering en luchtdoorlatendheid”, Bouwfysica, nummer 3, 2000, p24-28

- [75] - G. Nelseon; R. Nevitt; G. Anderson, “Are Your Houses Too Tight?”, Energy Conservatory Articles
- [76] - H. Hens, “passiefwoningen: luchtdichtheid, verbruik en binnenklimaat”, passiefhuissymposium 2004, Reader p233-246
- [77] - E. Mlecnik, “welke weg voor energiecertificatie”, passiefhuissymposium 2004, Reader p147-150
- [79] - L. Vandaele, “Energieprestatie van gebouwen – Combinatie van een goed binnenklimaat met laag energie- en milieugebruik”, WTCB
- [80] - A. Versele, “Toepassing van de energieprestatieberekening op een passiefhuis”, passiefhuissymposium 2004, Reader p101-110
- [81] - H. Hens; G. Verbeeck, “Lage energie gebouwen – Ontwerp en uitvoering”
- [82] - M. Hall; A. Geißler, “Anforderungen an die Gebäudedichtheit und den Dichtheitsnachweis im Rahmen der EnEV“, Bauphysik, nummer 4, p240-242
- [87] - A. Maas; A. Geißler, “Dicht is Pflicht“, sbz, nummer 22, 1997, p54-63
- [88] - A. Geißler; G. Hauser, “Luftdichtheit von Holzhäusern“, bauen mit holz, nummer 7, 1996, p562-568
- [90] - G. Hauser, „Bauphysikalische Grundlagen Feuchtelehre - Vorlesungsskript Bauphysik I und II“ Universiteit Kassel, 2003, cursusdeel bouwfysica
- [93] - A. Geißler, “Zeitbombe Klebeband?”, mikado, nummer 8, 2002, p37-38
- [94] - M. Sherman; I. Walker, “Can Duct Tape Take the Heat?“, Home Energy Magazine, nummer 4, 1998
- [95] - M. Hall, „Schicht für Schicht – rundum dicht“, mikado, nummer 8, 2002, p32-36
- [96] - F. Dobbels, “luchtdichtheid van hellende daken”, passiefhuissymposium 2004, Reader p49-57
- A. Geißler; G. Hauser, “Entwicklung eines Meßsystems zur Bestimmung der Luftdichtigkeit von Bauteilen in situ“, Bauphysik, nummer 4, 1995, p111-114
- M.E. Lux; W.C. Brown, “Air Leakage Control”, IRC
- D. Franzen; O. Henz, “Het Passiefhuis”, Zoom, nummer 104
- T. Lootvoet, “Ecologisch isoleren”, Zoom, nummer 106
- H. Erhorn; J. Reiß; H. Kluttig; R. Hellwig, “Ultrahaus, Passivhaus oder Null-Heizenergiehaus? Eine Statusanalyse anhand praktisch realisierter Energiesparkonzepte“, bauphysik, nummer 22, 2000, p28-36

J. Fitzgerald; R. Nevitt; M. Blasnik, “User-Friendly Pressure Diagnostics“, Home Energy Magazine, nummer 5, 1994

J. Schnieders, “CEPHEUS – measurement results from more than 100 dwelling units in passive houses“, ECEE summer study ‘Time to turn down energy demand’, Reader, p341-351

A. Katz, “What’s BeingBuilt Out There? Performance Tests on 100 New Homes“, Home Energy Magazine, nummer 5, 1997

V. Hayes, “Air Sealing in Low-Rise Buildings“, Home Energy Magazine, nummer 5, 1995

G. Hauser, “Bauschäden und energetische Sanierung - Vorlesungsskript“, Universiteit Kassel, 2003, cursusdeel bouwfysica

A. Janssens, “Ventilatievoorzieningen – Functie en energetische impact“, 5^e isolatiedag, 2004, Reader

I. Pollet, “Ventilatieverliezen: het verband met de minder gekende NBN D50-001 ventilatie- en ontwerpdebieten, minimum ventilatie, in- en exfiltratie” 5^e isolatiedag, 2004, Reader

E. Ubachs, “ontwikkeling van een innovatief bouwsysteem op basis van FJI-liggers“, passiefhuissymposium 2004, Reader p35-48

B. Cobbaert, „Op weg naar het passiefhuis – Luchtdicht bouwen“, de koevoet, lente 2004, p44-48

Adviesgroep Bouwfysica van de Ruiksgebouwendienst, “Dichtheid“, Bouwfysische kwaliteit Rijkshuisvesting, september 1999, p35-40

Internet

[11] - <http://www2.nen.nl>
centrum voor nederlandse normen en reglementen

[12] - <http://www.sbr.nl>
Stichting BouwResearch

[13] - <http://www.novem.nl>
Agentschap voor duurzaamheid en innovatie

[31] - <http://www.energiesparen.be>
EnergiePrestatieRegelgeving, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap

[40] - <http://www.eggensthermografie.nl>
thermografisch adviesbureau

[70] - <http://www.demorgen.be>
belgische krant

[78] - <http://www.r2000.org>
Canadese bouwstandaard

[97] - <http://www.eisedicht.de/eisedicht.htm>
luchtdichte kabeldoorvoeren

[98] - <http://www.kaiser-elektro.de>
producent luchtdichte elektrische inbouwdozen

[99] - <http://www.pavatex.de>
producent bouwmaterialen

[100] - <http://www.kalksandstein.de/>
producent bouwmaterialen

[105] - <http://www.siga.ch/product/all.htm>
producent dampschermen en aanverwanten

<http://www.5gg.nl/index.php>
Intergemeentelijke werkgroep bouwfysica

<http://www.aivc.org/>
Air Infiltration and Ventilation Centre

<http://www.ampack.ch>
producent dampschermen en aanverwanten

<http://www.blowerdoor.de/>
BlowerDoor GmbH meetsystemen voor luchtdichtheid

<http://www.bsria.co.uk/>
Research en consultancy organisatie

<http://www.caplast.de/>
producent dampschermen en aanverwanten

<http://www.doerken.de>
producent dampschermen en aanverwanten

<http://www.provant.be/KampC/>
provinciaal centrum duurzaam bouwen en wonen

<http://www.bpy.uni-kassel.de/en/index.html>
universiteit Kassel

<http://www.biw.fh-deggendorf.de/alumni/1999/schlecht/warmdach.htm>
detaillering platte daken

<http://www.hanno.com/>

producent voegdichting en akoestische panelen

http://www.otto-chemie.de/bauprodukte/anw_trocken/index.htm

producent chemische producten in bouwwereld

<http://www.flib.de/>

vakverband luchtdichtheid in de bouwwereld

<http://www.air-tightness.co.uk/index.html>

Research en consultancy organisatie

<http://www.illbruck.de/building-systems/de/>

producent bouwmaterialen

<http://www.mage-herzberg.de/>

Research en consultancy organisatie

<http://www.passiefhuisplatform.be/>

vakverband passiefwoningen

<http://www.passiv.de/>

Research en consultancy organisatie, passiefhuis institut Darmstadt

<http://www.proclima.de>

producent dampschermen en aanverwanten

<http://www.soudal.com>

producent chemische producten in bouwwereld

<http://www.wohnungs-lueftung-ev.de>

vakverband voor woningventilatie

<http://www.wtcb.be>

wetenschappelijk en technisch centrum voor het bouwbedrijf

<http://www.encyclopedia-wiki.org>

technisch-wetenschappelijke verklarend woordenboek

<http://www.luftdicht.de>

Startpagina luchtdichtheid

<http://141.51.43.66/>

Europees testcentrum voor woningventilatiesystemen

Bedrijfsinformatie

[37] - BSRIA, “Air Tightness Testing – A Guide for Clients and Contractors”

[42] - HRS Services Ltd, “Air Thightness test and report – Compliance check list to ensure the ait thightness report ahs been carried out in accordance with Part L2 and CIBSE TM23”

[43] - HRS Services Ltd, “Part L - Air Thightness Information Pack”

[101] - PAVATEX, “Das Komplettprogram für die luftdichte und enegiesparende Gebäudehülle“

[102] - Caplast, “VALMEX-TOP, Klebe- und Dichtband-System“

[106] - VELUX – montagefolders, produktfolders, technische specificaties

Energieagentur NRW, “Luftdichte Gebäudehülle – Qualitätssicherung durch Blower-Door Messung”

The Energy Conservatory, “Minneapolis Blower Door – Building Airtightness Testing Systems“

Du Pont, “Tyvek Active Membranen – das intelligente Unterdach”

Pro Clima, „luchtdichting conform de normen NBN D50-001, DIN 4108-7 en SIA 180

IG PASSIVHAUS, “Aktiv für mehr Behaglichkeit: Das Passivhaus”

Europe Kunststof Industrie, “technische zelfklevende producten“, documentatiemap

Normen

[22] - NBN B62-301 peil van de globale warmte-isolatie

[24] - NBN D 50-001 Ventilatievoorzieningen in woongebouwen

[28] - prEN 13829:2000 luchtdichtheitsmetingen

[69] - NPR 5128 & NPR 5129

[103] - EN 12207:1999 classificatie van testen op ramen en deuren in overeenstemming met prEN 1026

[104] - DIN 4108-7:2001-08

[107] – STS 52.0 uitgave 1985

Studies

[20] - WTCB, WenK, VLIET, “Studie van de Energieaspecten van Nieuwbouwwoningen in Vlaanderen: Isolatie, Ventilatie, Verwarming - Eindverslag”, 1998

- [21] - WTCB, WenK, VLIET, “Studie van de Energieaspecten van Nieuwbouwwoningen in Vlaanderen: Isolatie, Ventilatie, Verwarming”, Database
- [36] - BSRIA; I.N. Potter, “Technical Note 19/01 - Air Tightness Testing – A Guide for Clients and Contractors”
- [41] - Physibel; Universiteit Gent, “Report 2001-02C Hygrothermal evaluation and optimisation of dry composite construction systems based on steel for residential applications”, 2001
- [44] - A. Janssens; W. Depraetere; S. Roels; A. Morel; H. Hens, “VLIET proefgebouw – juli 1997 – Tweede wetenschappelijk jaarrapport”
- [45] - A. Janssens; W. Depraetere; S. Roels; A. Morel; H. Hens, “VLIET proefgebouw – september 1998 – Derde wetenschappelijk jaarrapport”
- [47] - A. Janssens, “Reliable Control of Interstitial Condensation in Lightweight Roof Systems”, Doctoraatsthesis, Laboratorium Bouwphysica, K.U. Leuven, 1998
- [83] - BSRIA; I.N. Potter, “Air Tightness Specifications”, 1998
- [84] - BSRIA; I.N. Potter, “Technical Note 19/99 – Envelope Integrity Demonstration Study”, 1999
- [85] - W. Feist; S. Peper; M. Görg, “CEPHEUS-Projectinformation No. 36 – Final Technical Report July 2001”
- [86] - T. Lenahan; R. Karg, “Survey of Tightness Limits for Residential Buildings - July 2001”, The Chicago Regional Diagnostics Working Group
- M. Plessers; K. van de Putte, “Secundaire bouwkundige en economische effecten bij zeer lage energie woningen”, afstudeerthesis, K.U.Leuven, 2004

Appendix A

Invulblad luchtdichtheidsmetingen

Gegevens luchtdichtheidsmeting

Naam opdrachtgever.....
 Adres site:.....
 Beschrijving gebouw:.....

Opmerkingen betreffende plaats blower door / vastgesteld volume / onafgewerkte delen / voorlopige afsluitingen ...

.....

Datum van test		Nummer Test	
Tijdstip begin test		Overdruk	
Tijdstip einde test		Onderdruk	
Windsnelheid begin test	m/s	Windsnelheid einde test	m/s
Luchtdruk begin test	Pa	Luchtdruk einde test	Pa
Buitentemperatuur begin test	°C	Buitentemperatuur einde test	°C
Binnentemperatuur begin test	°C	Binnentemperatuur einde test	°C
Vrij drukverschil voor test	Pa	Vrij drukverschil na test	Pa

Snelheid ventilator											
Drukverschil (Pa)											
Volumestroom lucht (m³/s)											

Datum van test		Nummer Test	
Tijdstip begin test		Overdruk	
Tijdstip einde test		Onderdruk	
Windsnelheid begin test	m/s	Windsnelheid einde test	m/s
Luchtdruk begin test	Pa	Luchtdruk einde test	Pa
Buitentemperatuur begin test	°C	Buitentemperatuur einde test	°C
Binnentemperatuur begin test	°C	Binnentemperatuur einde test	°C
Vrij drukverschil voor test	Pa	Vrij drukverschil na test	Pa

Snelheid ventilator											
Drukverschil (Pa)											
Volumestroom lucht (m³/s)											

Appendix B

Checklist luchtdichtheidsmetingen

Checklist luchtdichtheidsmeting

Voor de test

De blowerdoor ventilator is binnen de laatste 12 maand gekalibreerd	
De meetapparatuur is binnen de laatste 12 maand gekalibreerd	
Zet de meettoestellen voor de proef op nul, volgens de instructies van de producent	
De oppervlaktes en volumes die berekend zijn voor de gebouwschil komen overeen met de gebouwschil die effectief getest wordt. Zijn die grenzen onafhankelijk vastgesteld en gecontroleerd door de architect? Ruimtes die bij berekening van de oppervlaktes in- of uitgesloten worden, moeten ook bij de test in- of uitgesloten worden.	
Indien ruimtes worden uitgesloten, moet dit verantwoord worden.	
Alle binnendeuren van het beschermde volume moeten openstaan, zodat een optimale luchtdoorstroming door alle ruimtes gegarandeerd is. In voorkomend geval dienen ook zolderluiken opengezet worden, en panelen van verlaagde plafonds verwijderd, vooral indien men de q_{50} -waarde wil bekomen.	
Alle buitendeuren en ramen worden gesloten	
De openingen van de HVAC installatie moeten dichtgeplakt worden, zo ook de rooster van de droogkast	
De HVAC installatie moet stilgelegd worden	
De klep van de haard moet dicht zijn	
De verwarmingstoestellen op gas worden volledig uitgezet, er mag ook geen waakvlam meer zijn.	
Er is geen verwarmingstoestel op hout of kolen dat nog brandt of nasmeult	
Alle waterafvoeren worden met water gevuld of dichtgeplakt	
Controleer of er geen openingen zijn dichtgeplakt die open moeten blijven, vb brievenbus, ventilatieroosters boven ramen...	
De blowerdoor moet ingebouwd worden ter plaatse van een terrasdeur, indien dit niet mogelijk is, moet dit genoteerd worden.	
De windsnelheid wordt gemeten: bij windsnelheden boven de 5 m/s (18 km/h) wordt afgeraden de proef nog uit te voeren. De gemeten snelheden worden genoteerd bij het begin en bij het einde van de proef.	

Tijdens de test

Controleer of alle deuren openblijven	
Controleer dat alle buitendeuren en ramen gesloten blijven	
Controleer dat tijdelijk dichtgeplakte elementen dicht blijven, dat de afsluiting niet los komt onder invloed van de drukverschillen	
Neem minstens 5 metingen over een interval van 50 Pa	
Controleer dat er een minimaal drukverschil moet gerealiseerd worden van 25 Pa, indien dit niet het geval is moet de test met een toestel gedaan worden met een groter vermogen	
Neem zowel testen af bij onderdruk als bij overdruk, en duidt bij elke meting aan of het om onder- of overdruk gaat.	
Controleer dat de correlatie van de metingen met de stromingsformule hoger is dan 98%	
Controleer dat de stromingsexponent niet lager is dan 0.5 en niet hoger dan 1.0	
De schommeling van de gegevens op de meettoestellen dient beperkt te zijn	

Appendix C

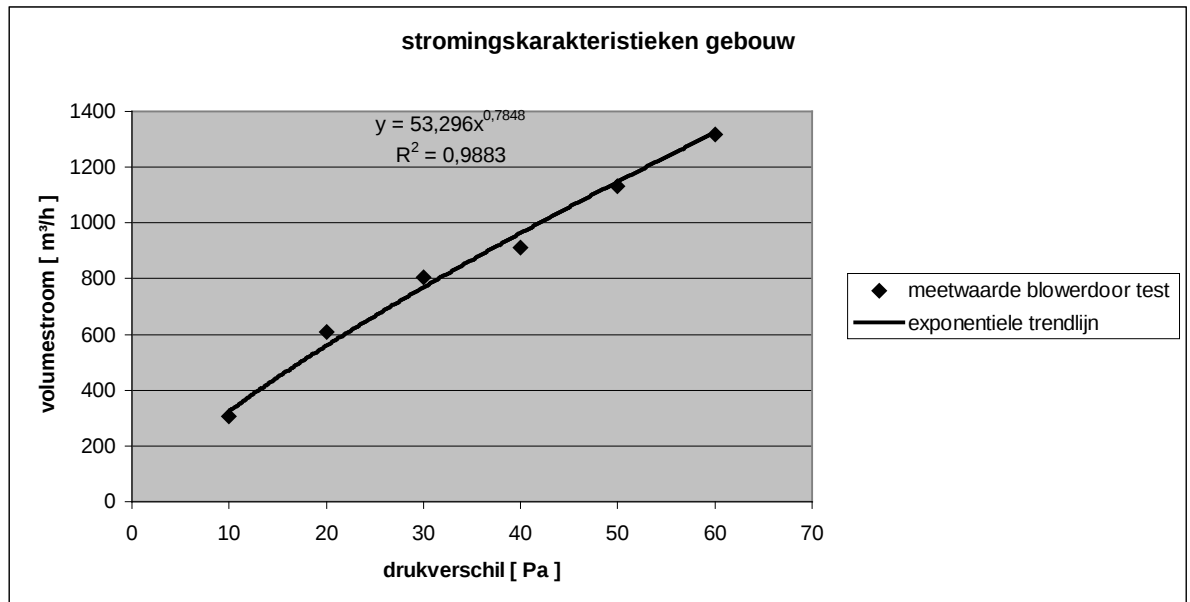
Meetgegevens woningen

In deze bijlage worden de verschillende resultaten per woning gegeven:

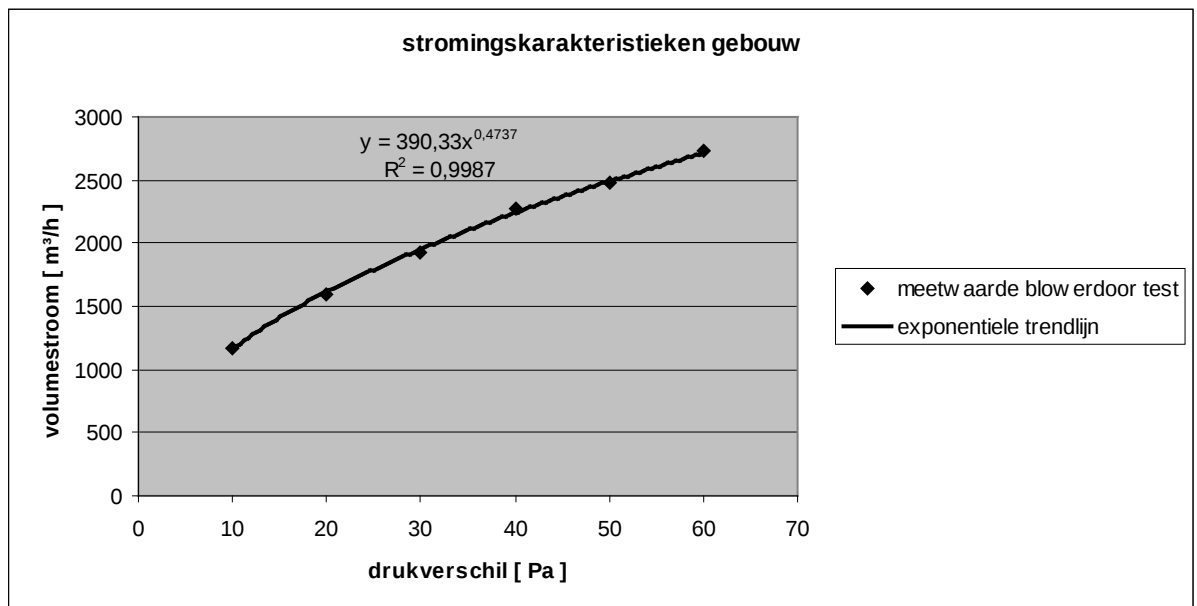
- *Meetgegevens blowerdoor-proef bij onderdruk*
- *Meetgegevens blowerdoor-proef bij overdruk*
- *Toepassing correctieformule*
- *Parameters berekening*
- *Resultaten*
- *Resultaten schattingsmethodes*
- *Afwijking schattingsmethodes*
- *Lekkageverdeling volgens schatting UGENT*

1) Woning Debaets

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

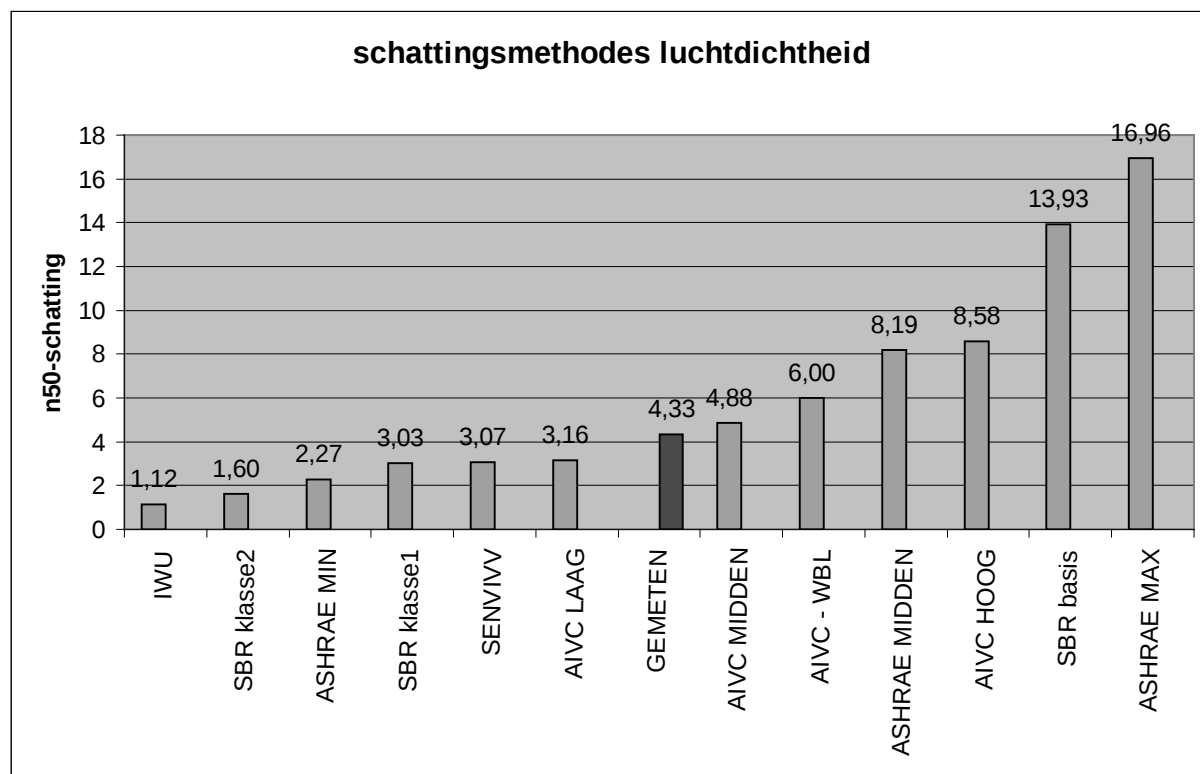
DE BAETS	1, onderdruk	2, onderdruk	3, overdruk	4, overdruk
T buiten (°C)	4	4	4	4
T binnen (°C)	20	20	20	20
Vg (pN)	1356,664076	1148,275966	2490,198818	2452,636969
C	35,003	53,296	390,33	390,2
n	0,9349	0,7848	0,5	0,5
netto bi-volume	419,3	419,3	419,3	419,3
opp gebouwschil	439,28	439,28	439,28	439,28
verschil V %	9,77138185	7,383400719	2,907253616	2,907253616
Vh (pN)	1235,899606	1069,323525	2564,762983	2526,076417
n50	2,94753066	2,550258824	6,116773152	6,024508506
Q50	2,813466595	2,434264079	5,838560787	5,750492662

Resultaten:

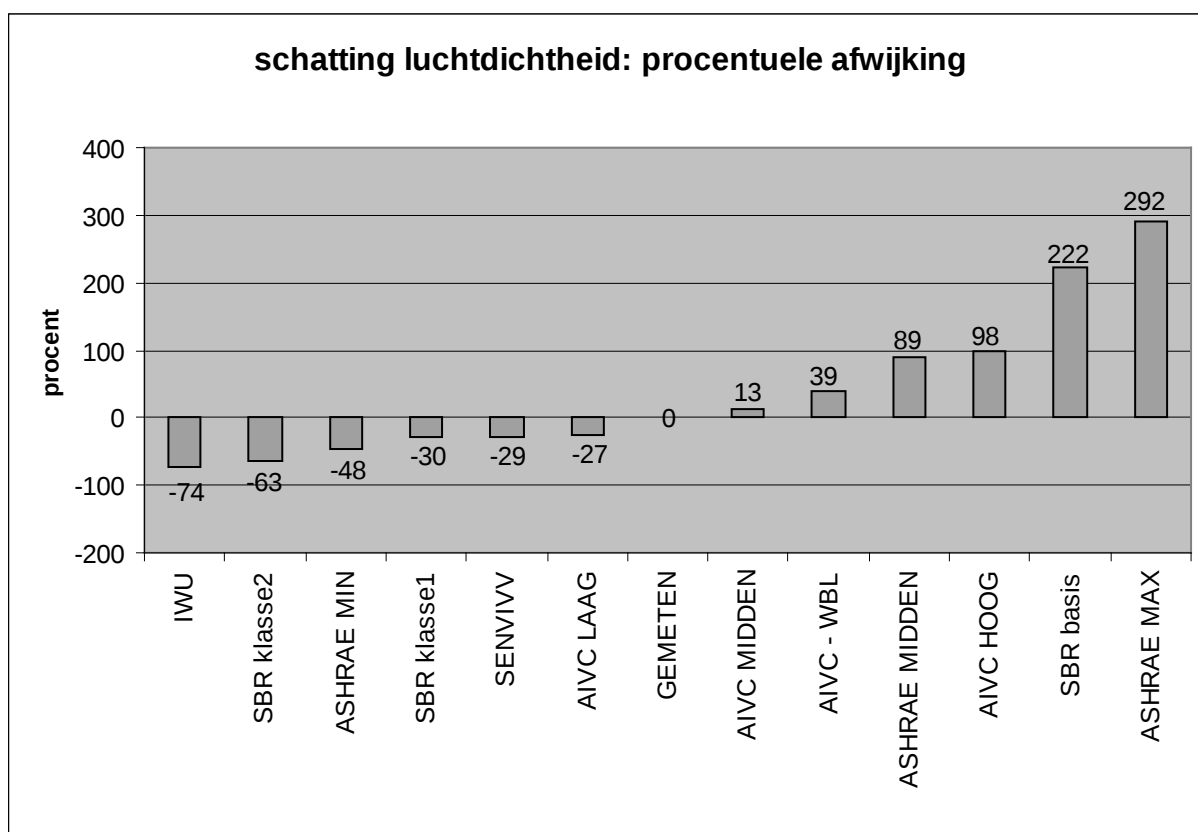
Luchtstroom	1817.04m ³ /h
n ₅₀ -waarde	4.3 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	4.1 m ³ /h.m ²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

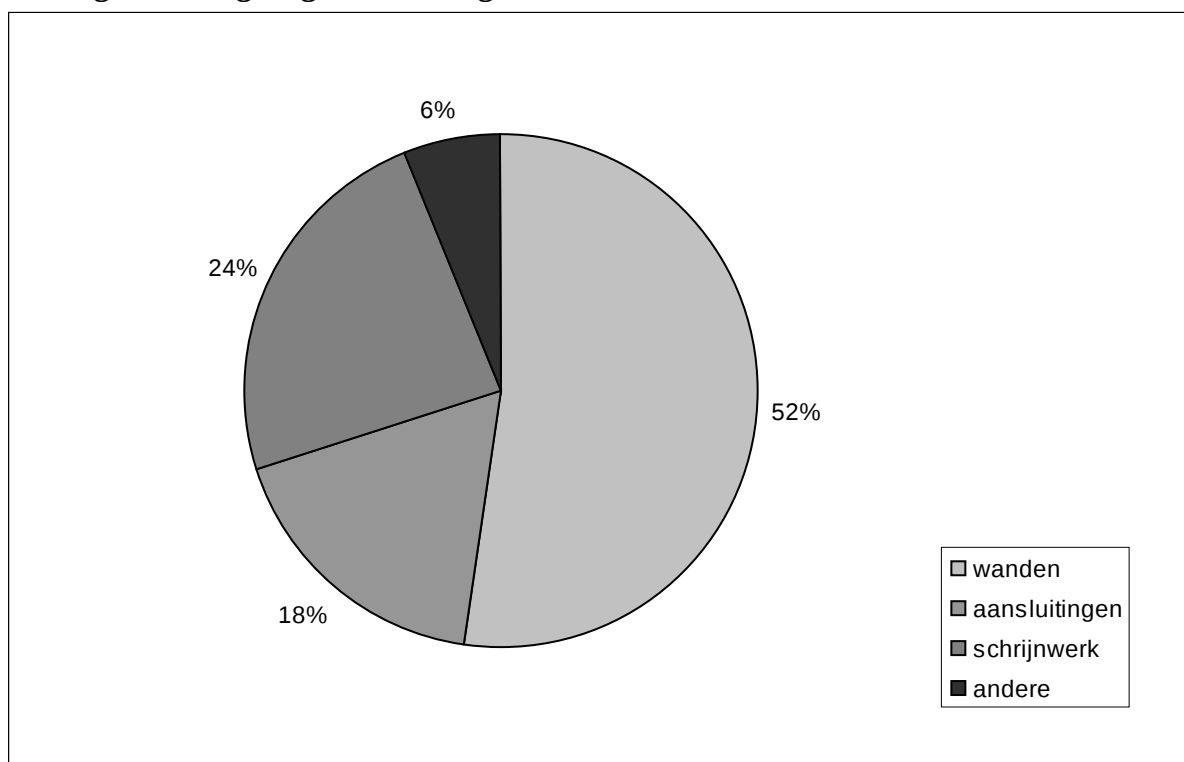
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

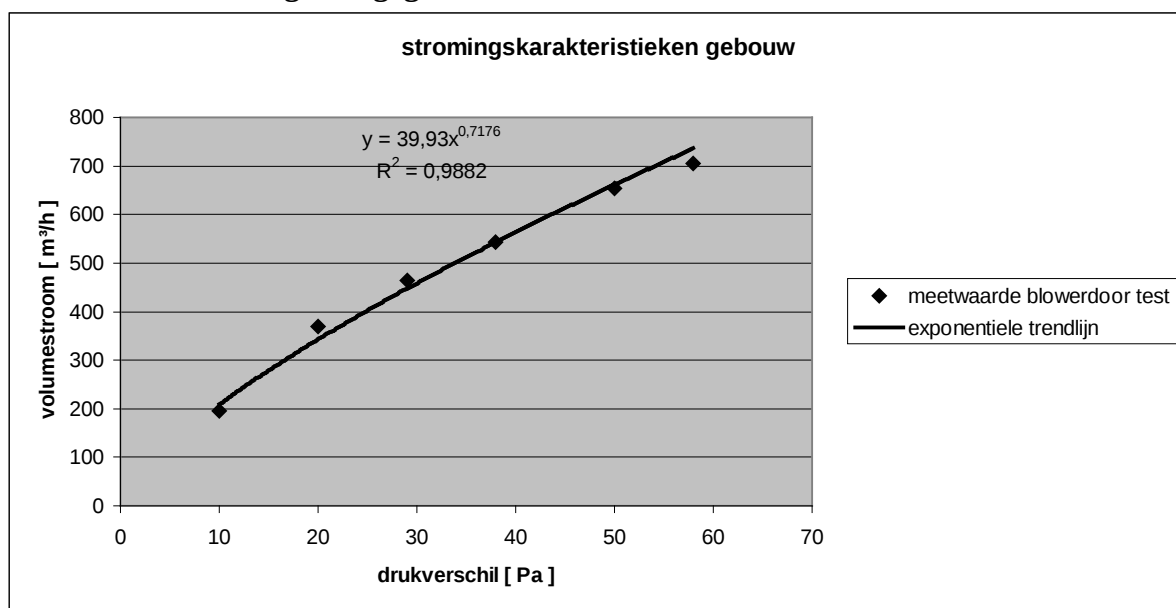


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

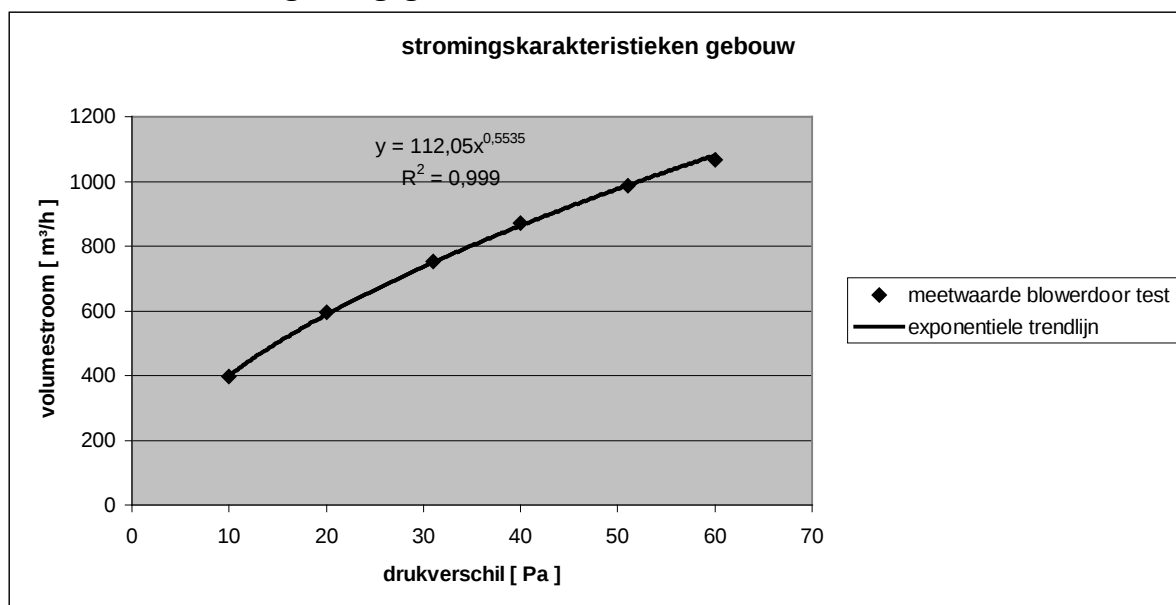


2) Woning De Boei

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

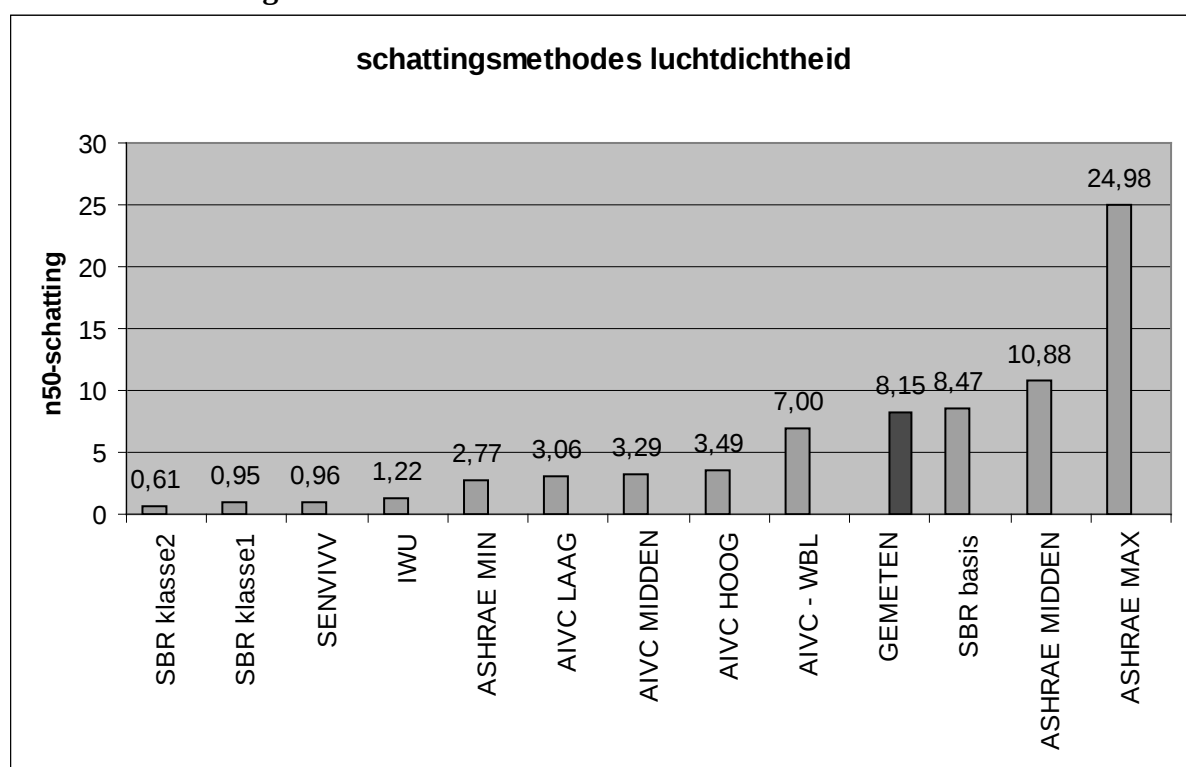
DE BOEI	1, onderdruk	2, onderdruk	3, overdruk
T buiten (°C)	11	11	11
T binnen (°C)	19	19	19
Vg (pN)	718,6100301	661,4243593	976,7687536
C	43,196	39,93	112,05
n	0,7187	0,7176	0,5535
netto bi-volume	100,45	100,45	100,45
opp gebouwschil	133,46	133,46	133,46
verschil V %	2,646705321	2,640816923	1,59499432
Vh (pN)	700,0809503	644,4067566	992,600678
n50	6,969446992	6,41519917	9,881539851
Q50	5,245623785	4,828463634	7,437439518

Resultaten:

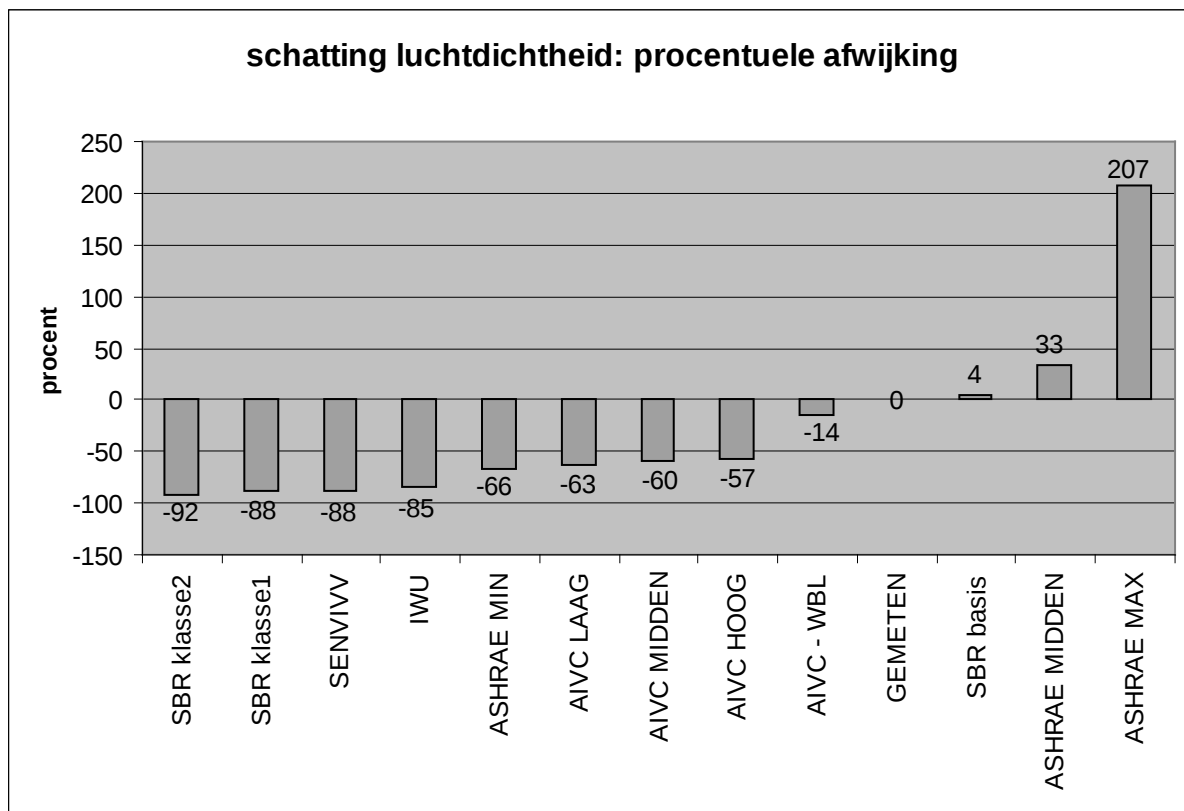
Luchtstroom	818.50 m ³ /h
n ₅₀ -waarde	8.15 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	6.13 m ³ /h.m ²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

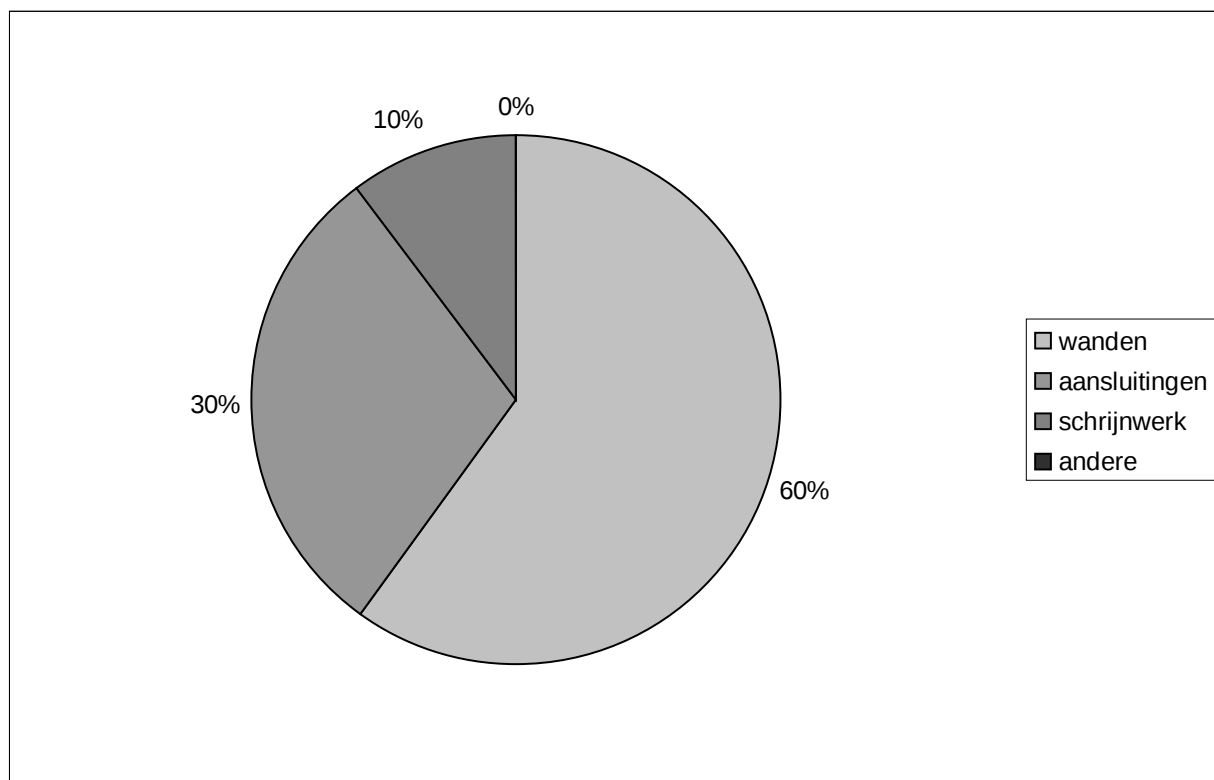
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

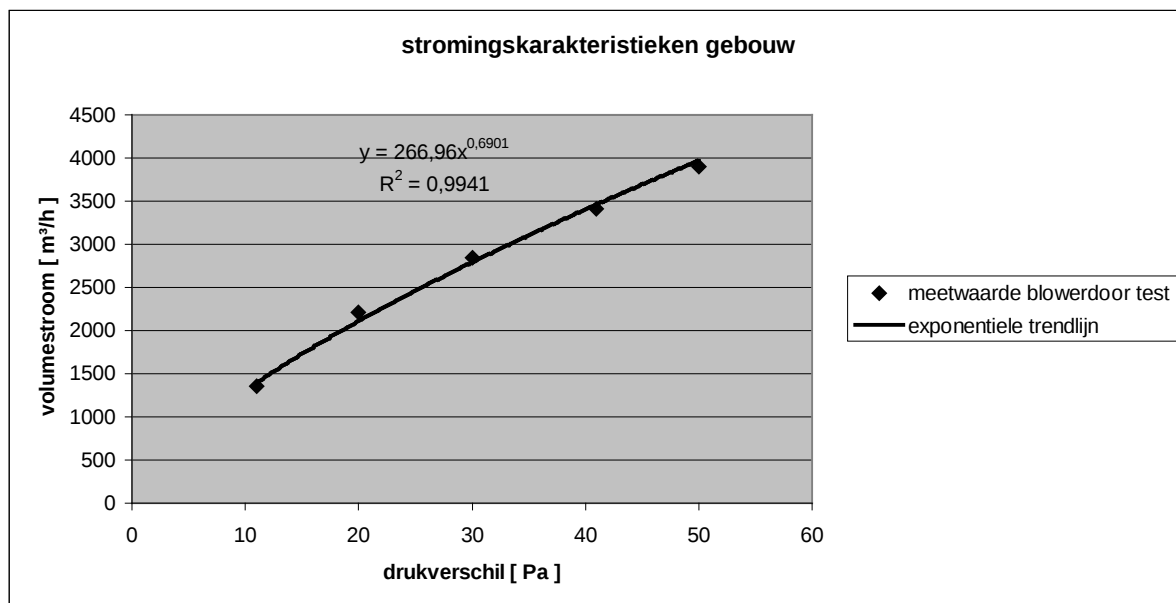


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

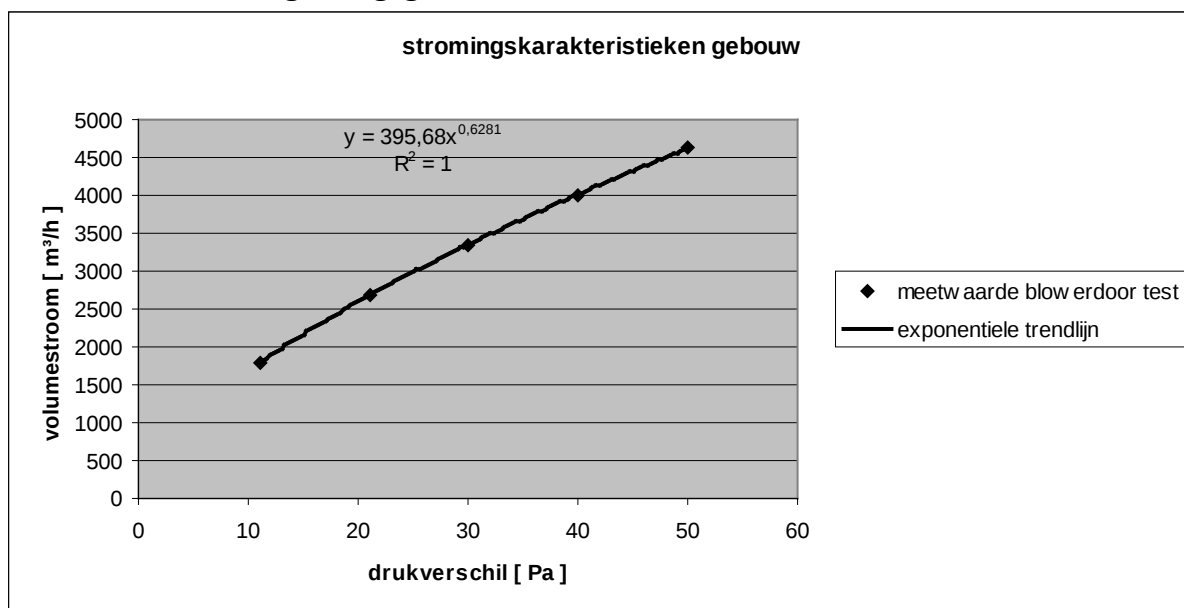


3) Woning De Muynck

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

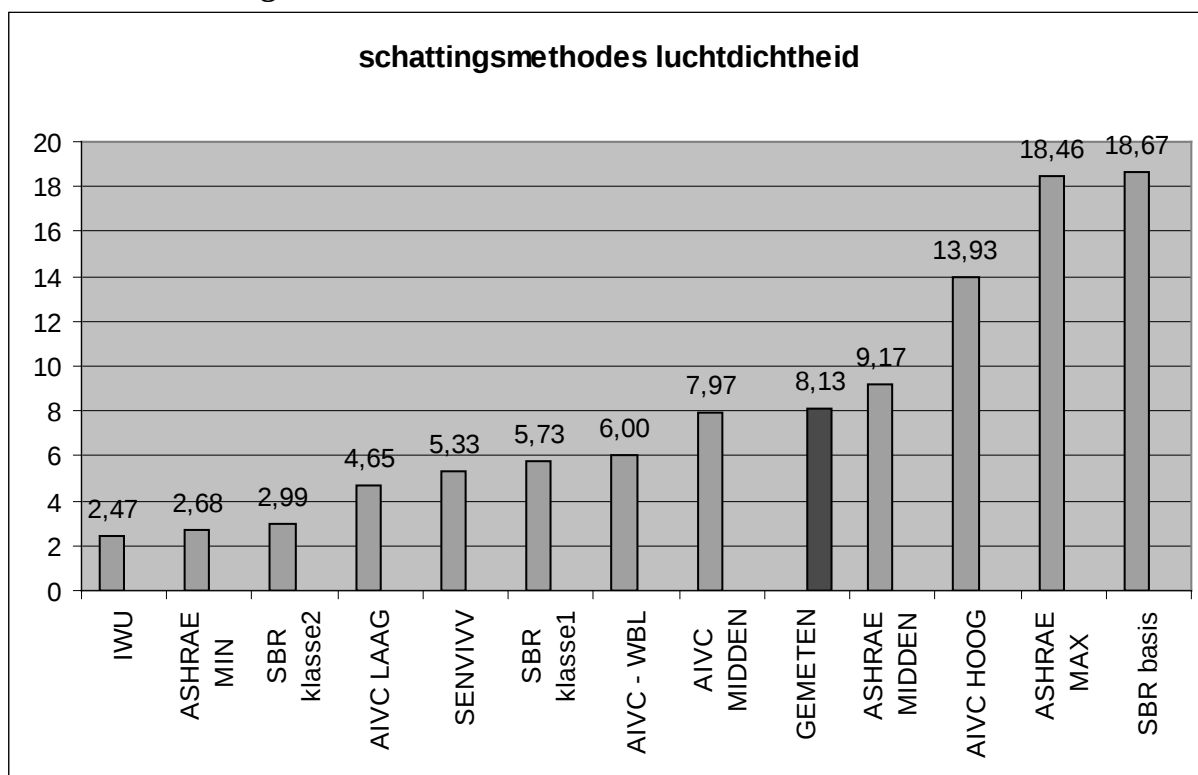
DE MUYNCK	1, onderdruk	2, onderdruk	3, overdruk	4, overdruk
T buiten (°C)	2	2	2	2
T binnen (°C)	19	19	19	19
Vg (pN)	4043,783915	3971,05035	4618,140683	4691,282054
C	202,17	266,96	395,68	580,82
n	0,7658	0,6901	0,6281	0,534
netto bi-volume	522	522	522	522
opp gebouwschil	582,63	582,63	582,63	582,63
verschil V %	7,824958903	6,483611871	2,978291148	3,060199783
Vh (pN)	3750,322704	3729,25963	4759,904497	4839,376647
n50	7,184526254	7,144175536	9,118590991	9,270836489
Q50	6,436885681	6,400733965	8,169686589	8,306089023

Resultaten:

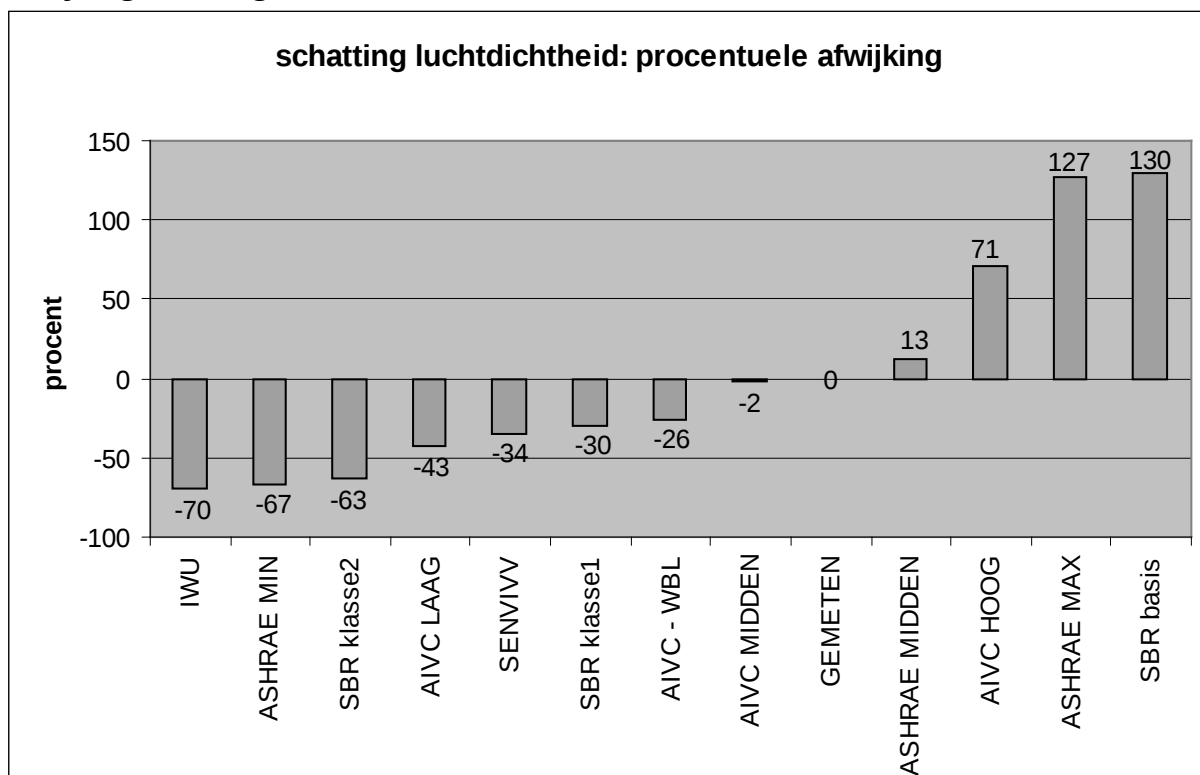
Luchtstroom	4244.6m³/h
n ₅₀ -waarde	8.1 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	7.3 m³/h.m²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

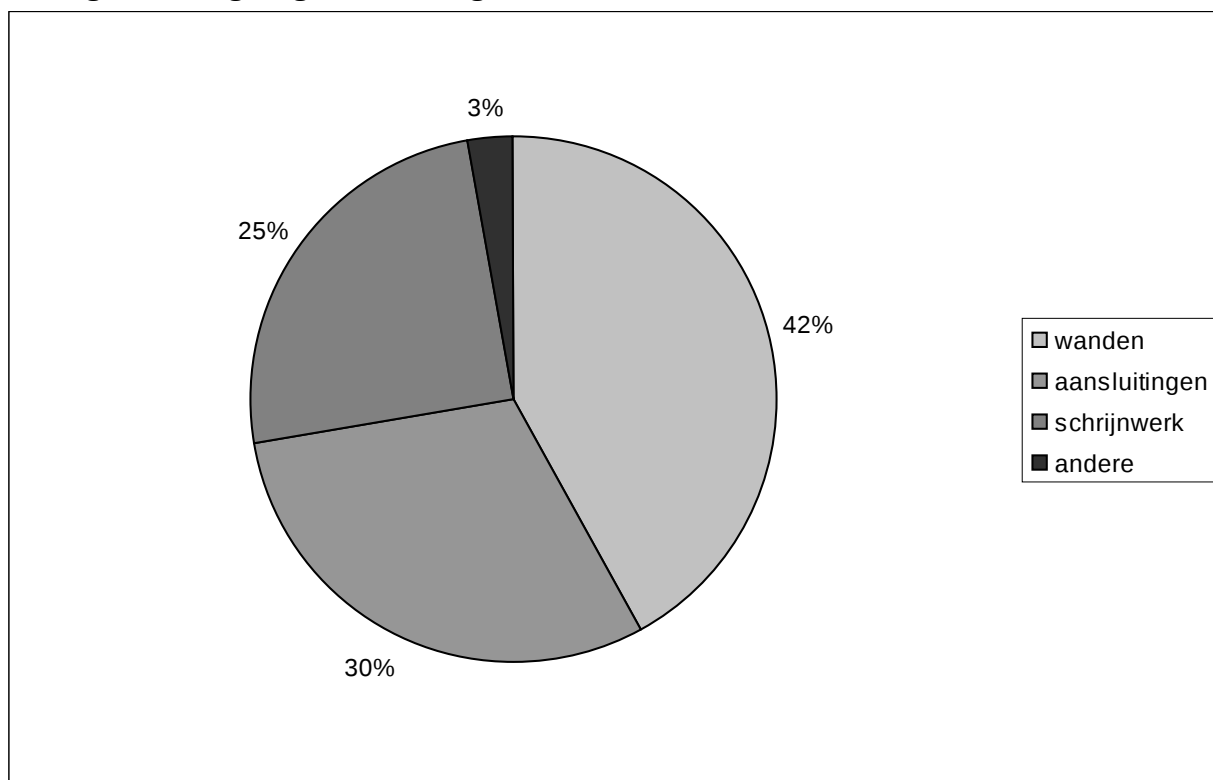
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

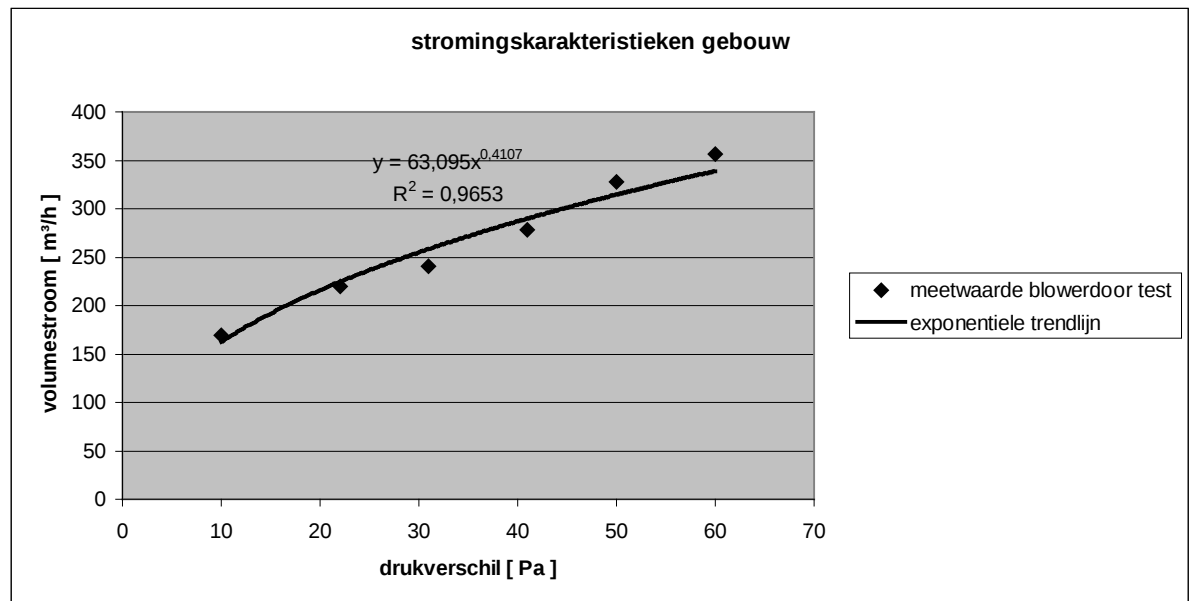


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

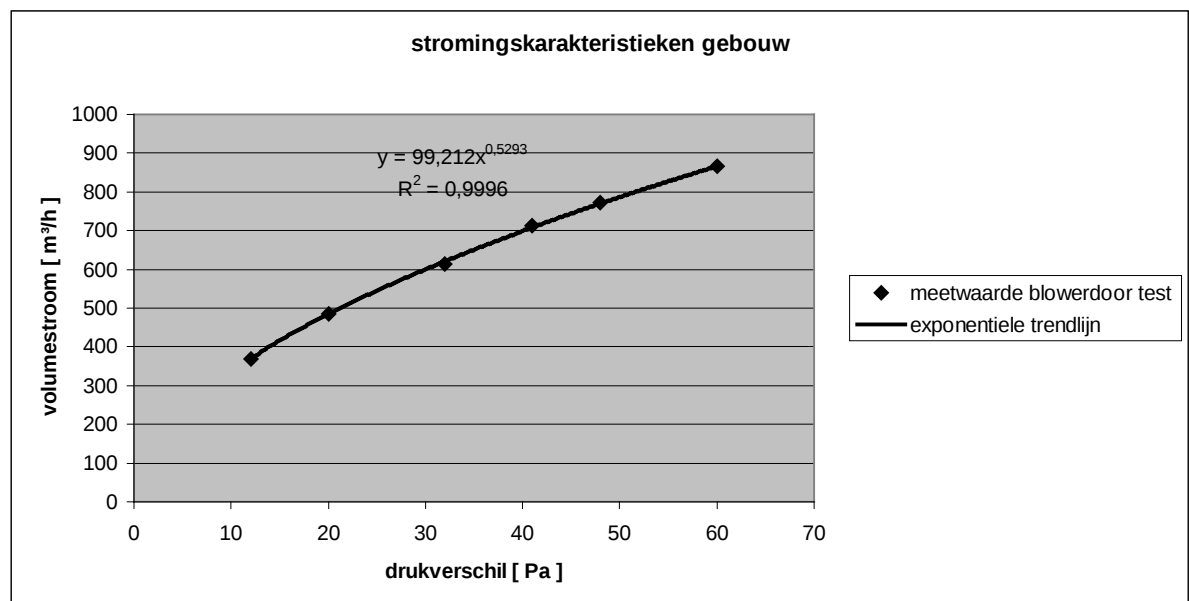


4) Woning Desmet

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

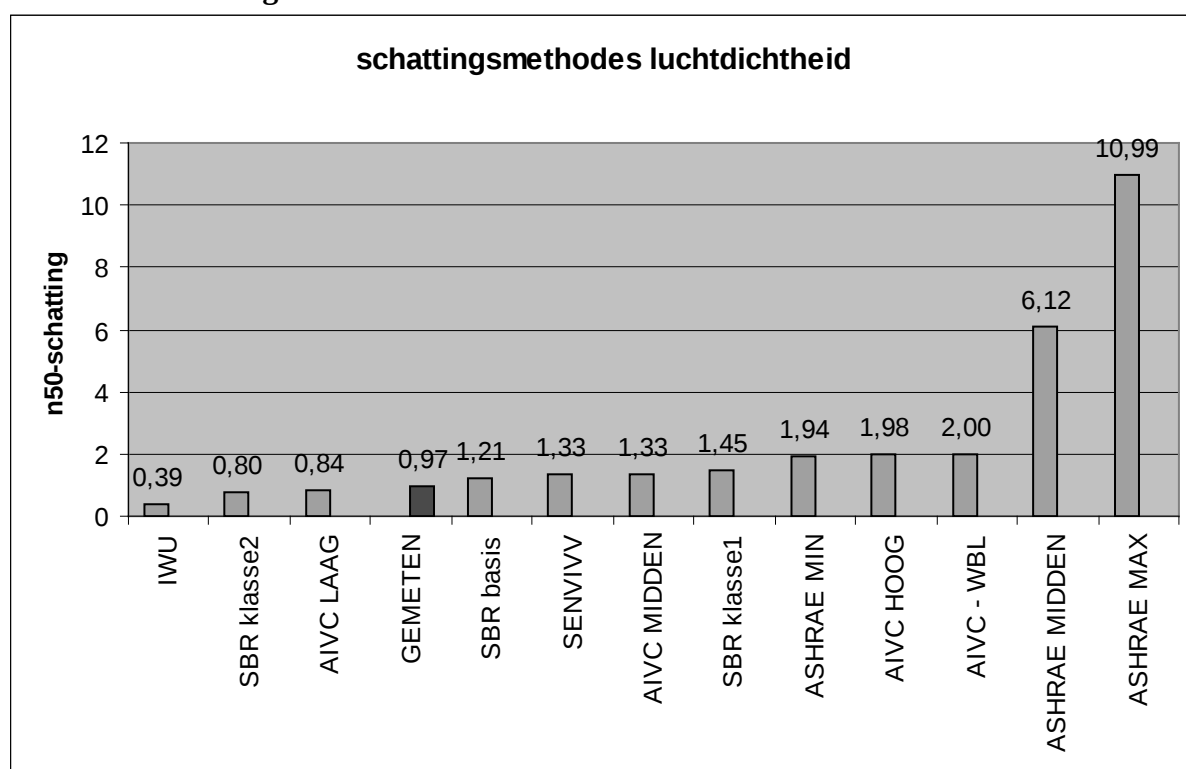
DE SMET	1,onderdruk	2, overdruk
T buiten (°C)	11	11
T binnen (°C)	19	19
Vg (pN)	314,6	786,7360082
C	99,212	99,212
n	0,5	0,5293
netto bi-volume	570,85	570,85
opp gebouwschil	561,34	561,34
verschil V %	1,482602429	1,435025286
Vh (pN)	310,003875	798,19024
n50	0,543056626	1,398248647
Q50	0,552256876	1,421937222

Resultaten:

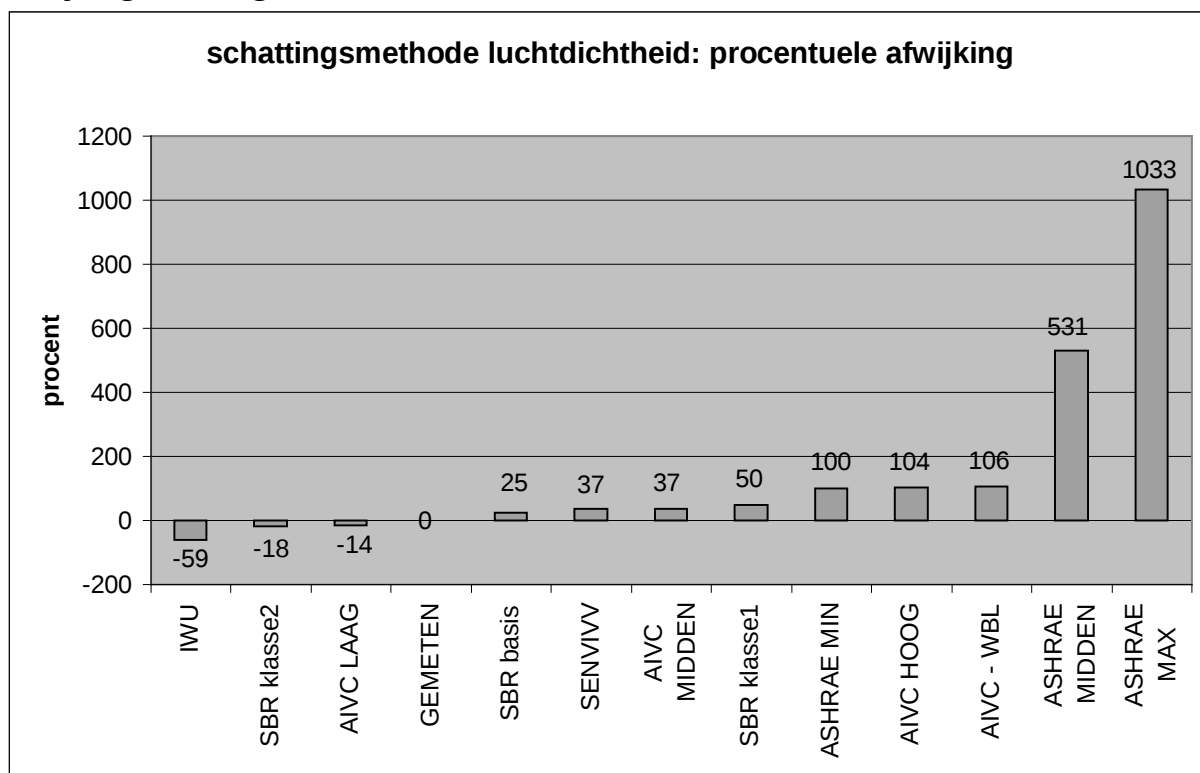
Luchtstroom	554.10 m ³ /h
n ₅₀ -waarde	0.97 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	0.99 m ³ /h.m ²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

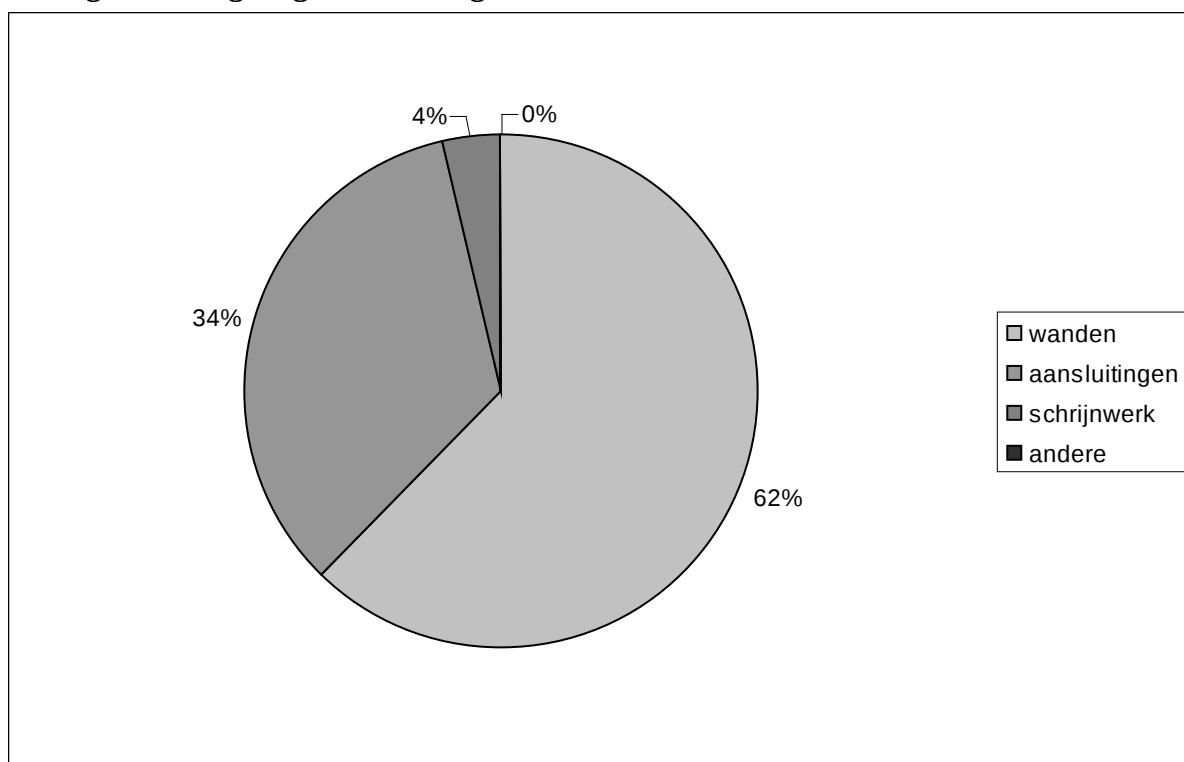
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

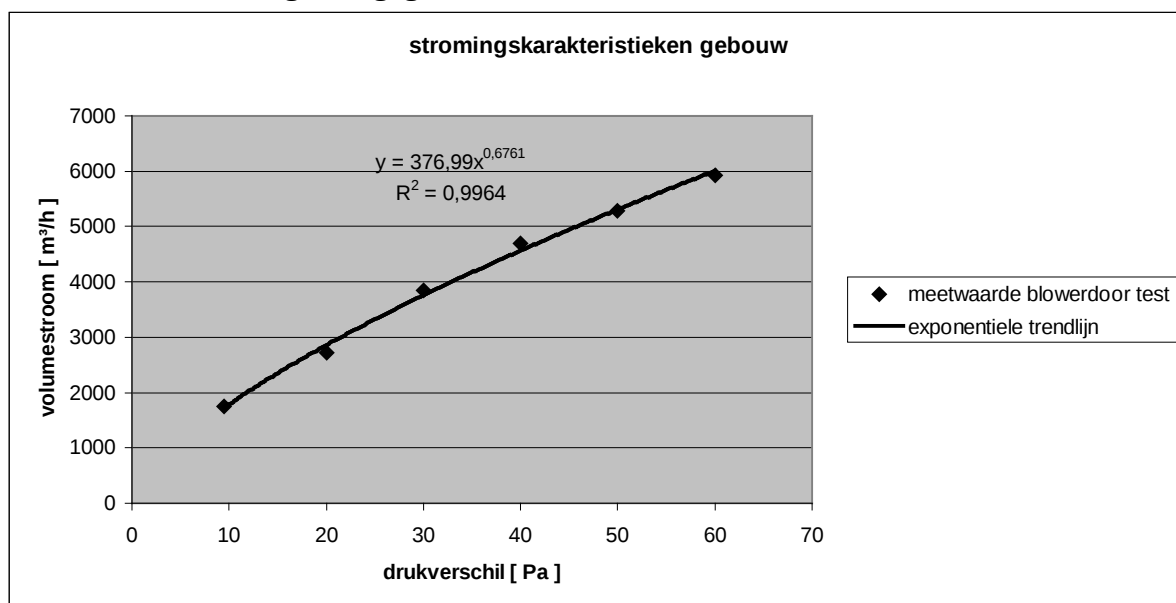


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

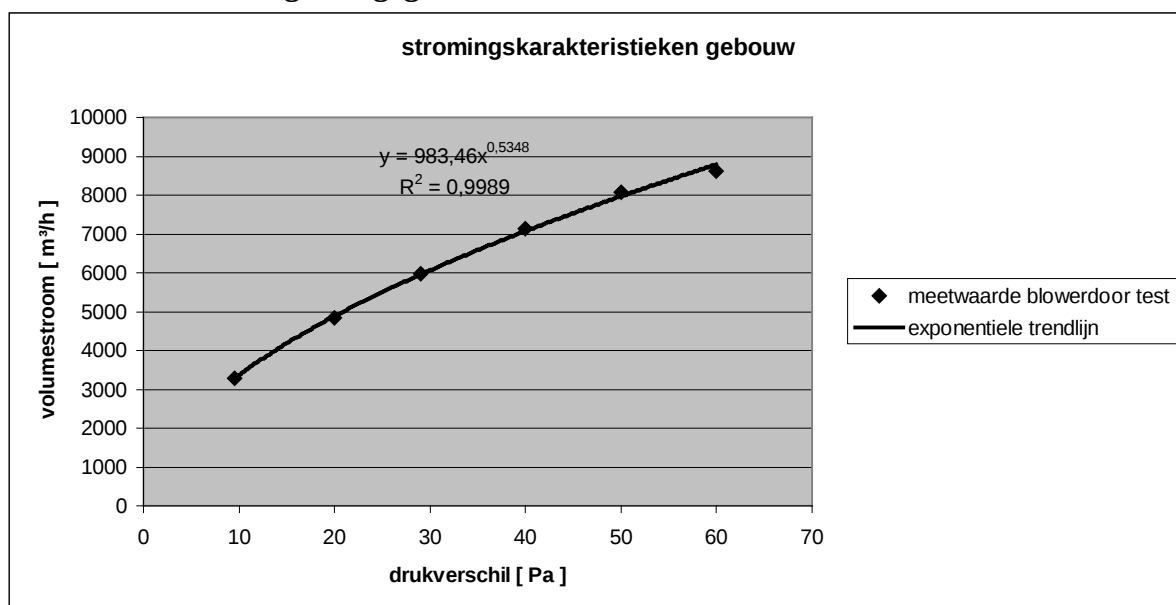


5) Woning Depauw

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H (\rho_N) = \dot{V}_H (\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

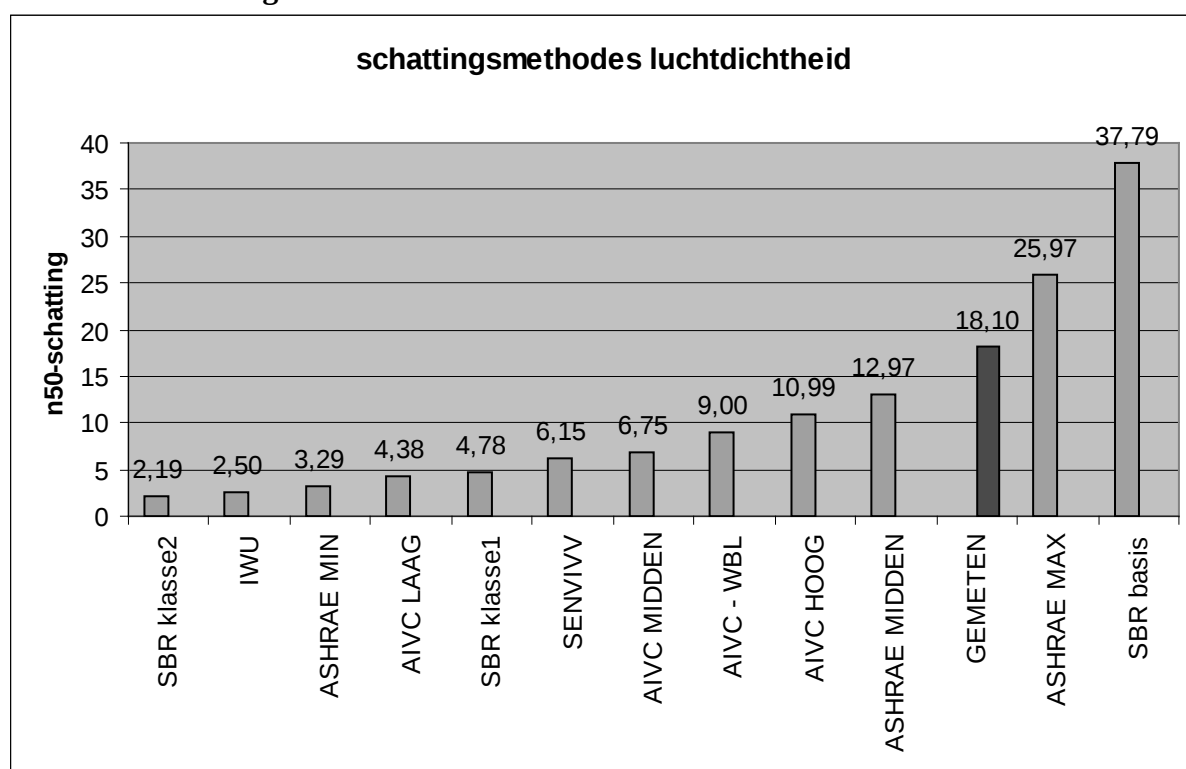
DEPAUW	1, onderdruk	2, overdruk
T buiten (°C)	16	16
T binnen (°C)	18	18
Vg (pN)	5308,886618	7968,303347
C	376,99	983,46
n	0,6761	0,5348
netto bi-volume	365,92	365,92
opp gebouwschil	413,34	413,34
verschil V %	1,007342632	0,30485979
Vh (pN)	5255,941281	7992,669784
n50	14,3636349	21,84266994
Q50	12,71578188	19,33679243

Resultaten:

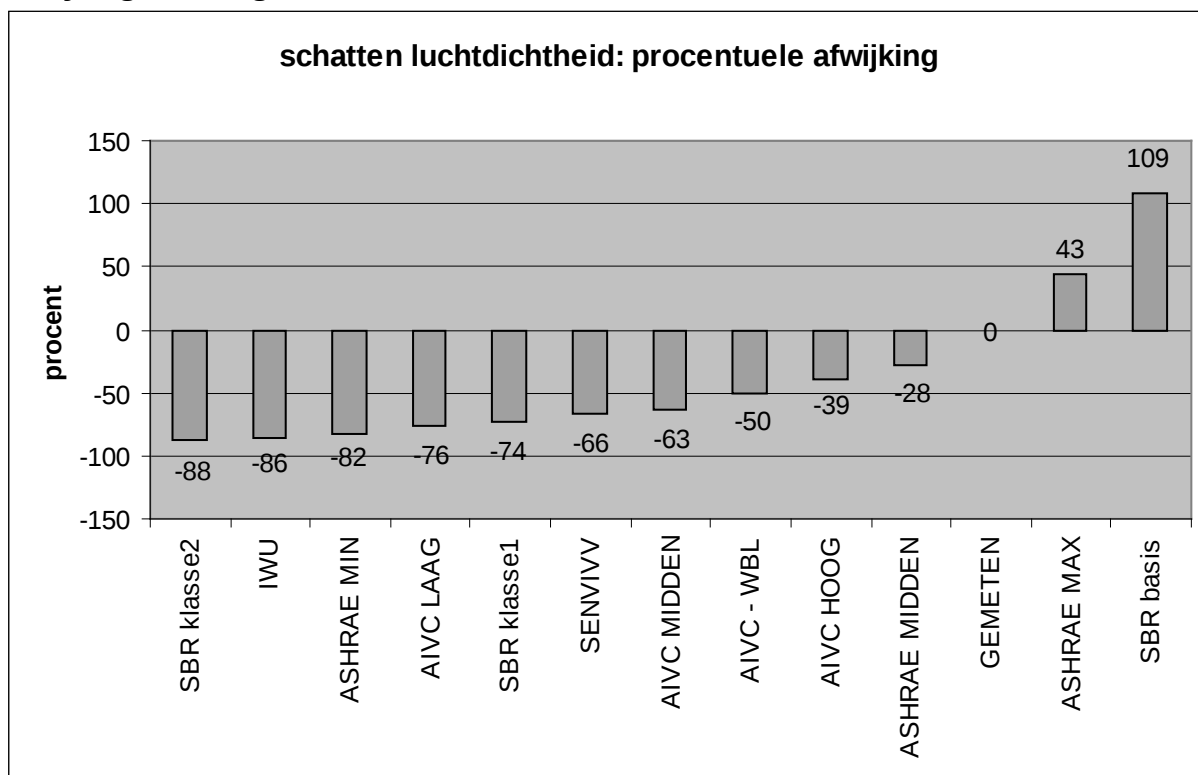
Luchtstroom	6624.31 m ³ /h
n ₅₀ -waarde	18.1 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	16.0 m ³ /h.m ²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

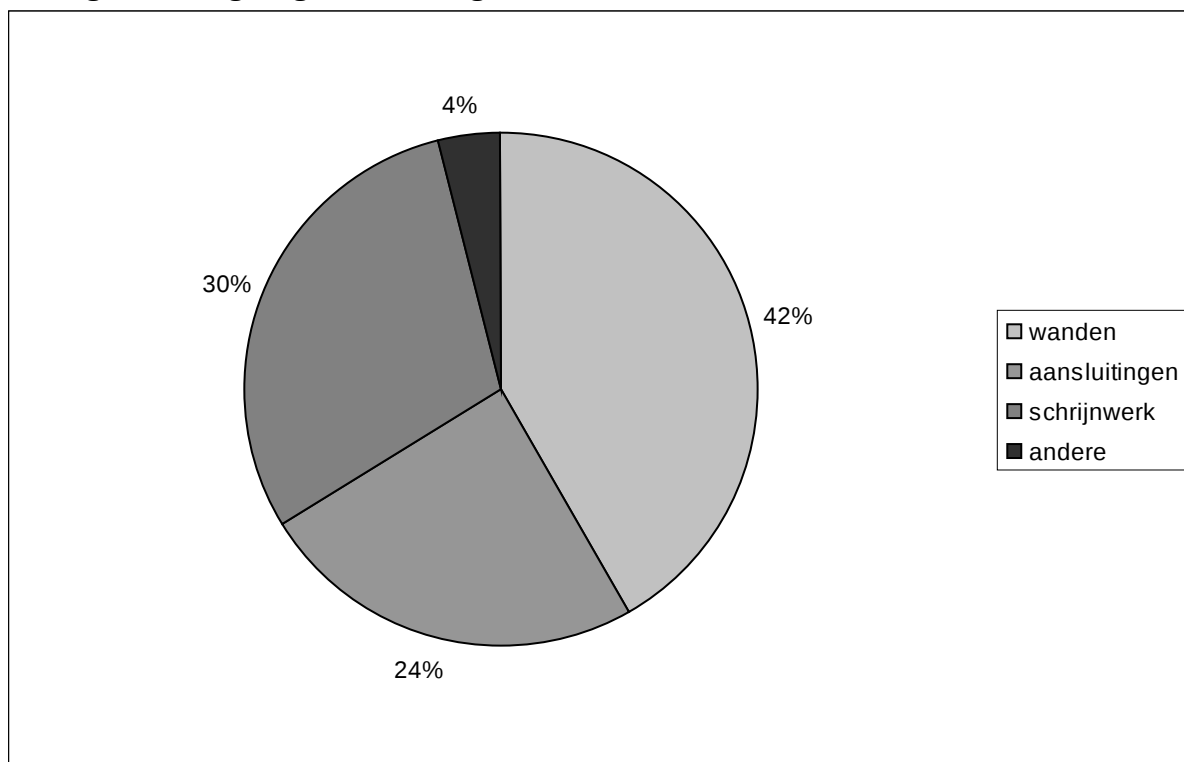
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

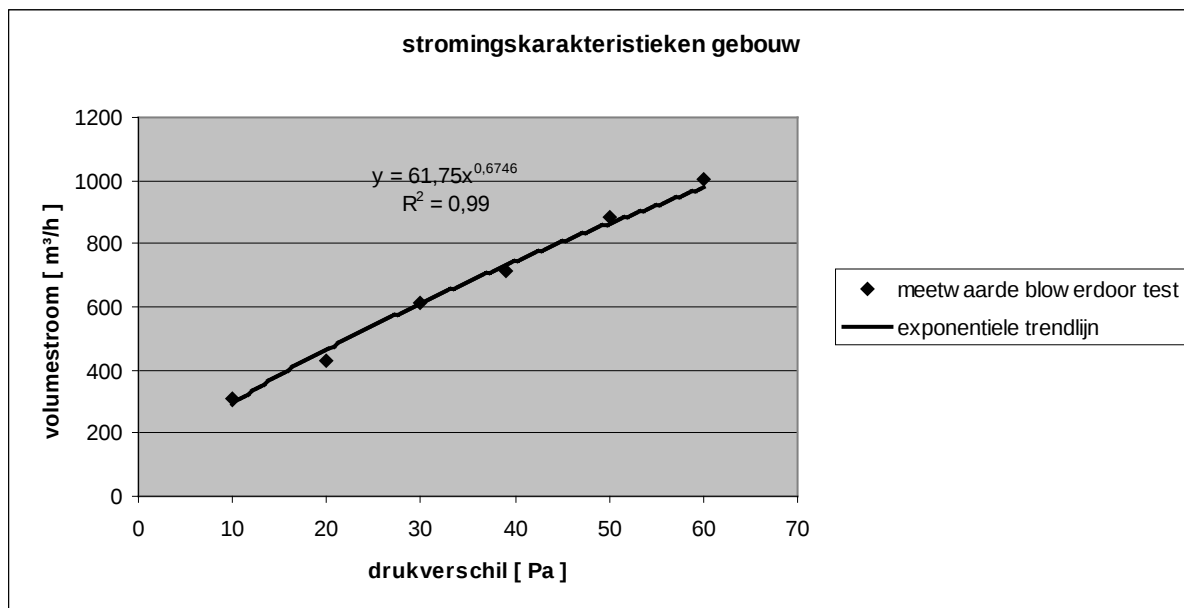


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

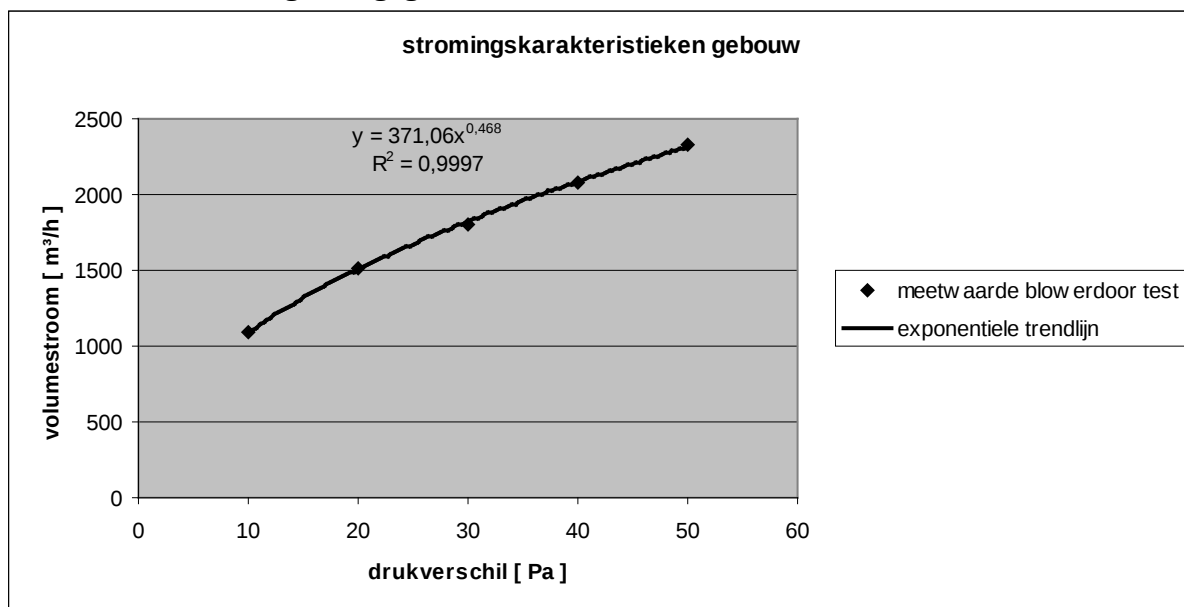


6) Woning Floré

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

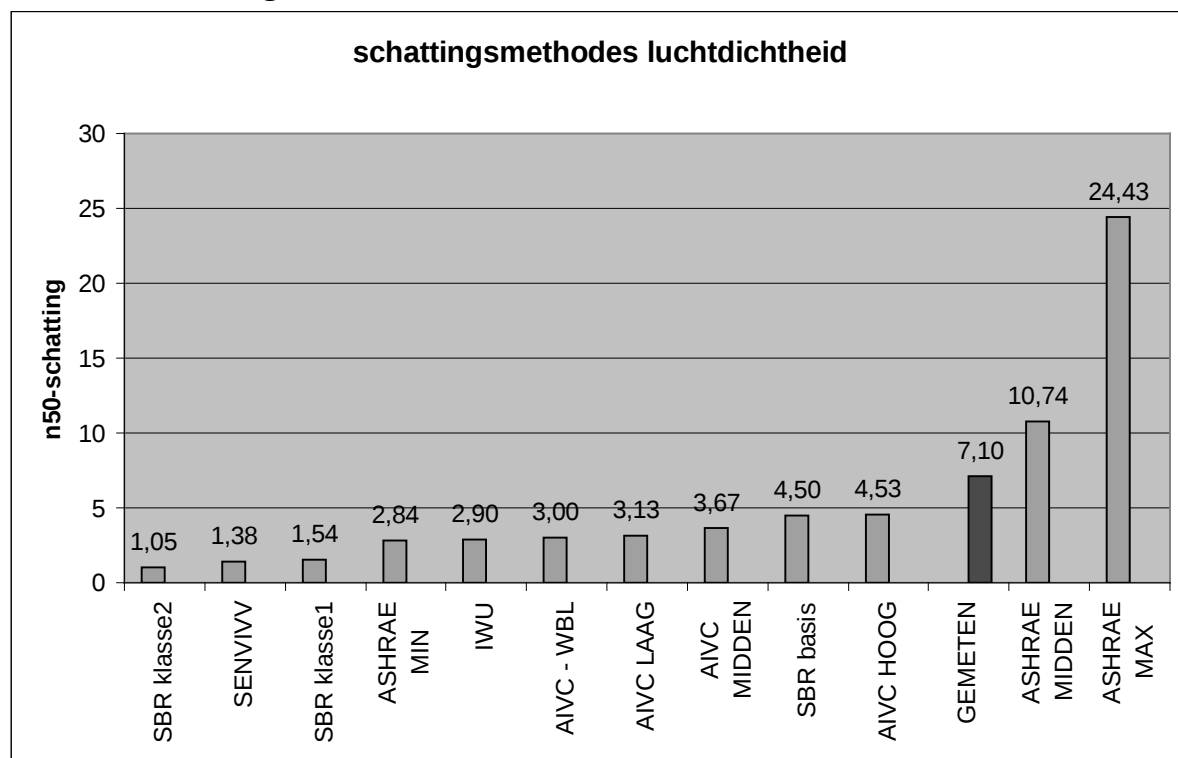
FLORE	1, onderdruk	2, onderdruk	3, overdruk	3, overdruk
T buiten (°C)	5	5	5	5
T binnen (°C)	19	19	19	19
Vg (pN)	1112,247872	864,4942855	2315,059206	2413,853985
C	102,65	61,75	371,06	371,47
n	0,6091	0,6746	0,5	0,5
netto bi-volume	225,288	225,288	225,288	225,288
opp gebouwschil	311,5	311,5	311,5	311,5
verschil V %	4,161192345	5,101203456	2,547497369	2,547497369
Vh (pN)	1067,814074	822,5350968	2375,576967	2476,954331
n50	4,739773419	3,651038212	10,54462273	10,99461281
Q50	3,427974556	2,640562108	7,626250294	7,951699298

Resultaten:

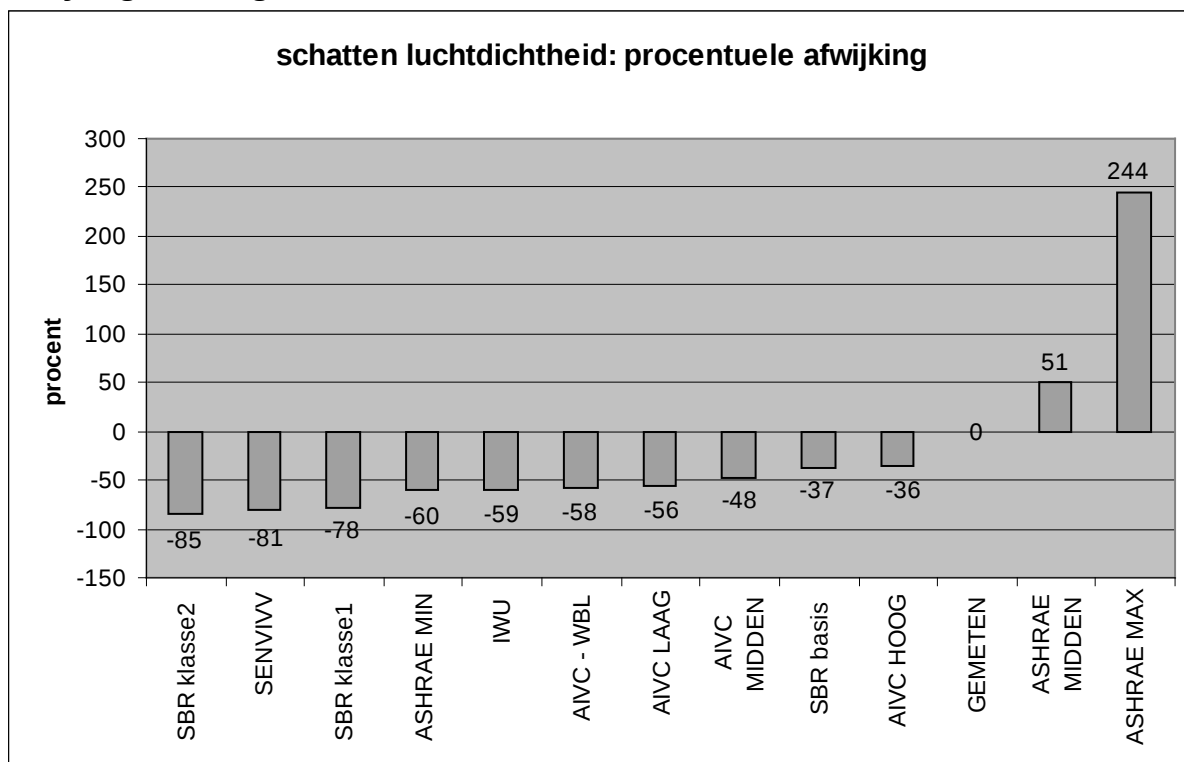
Luchtstroom	1599.056m³/h
n ₅₀ -waarde	7.1 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	5.1 m³/h.m²

Foutschatting	11%
Foutschatting	20%
Foutschatting	15%

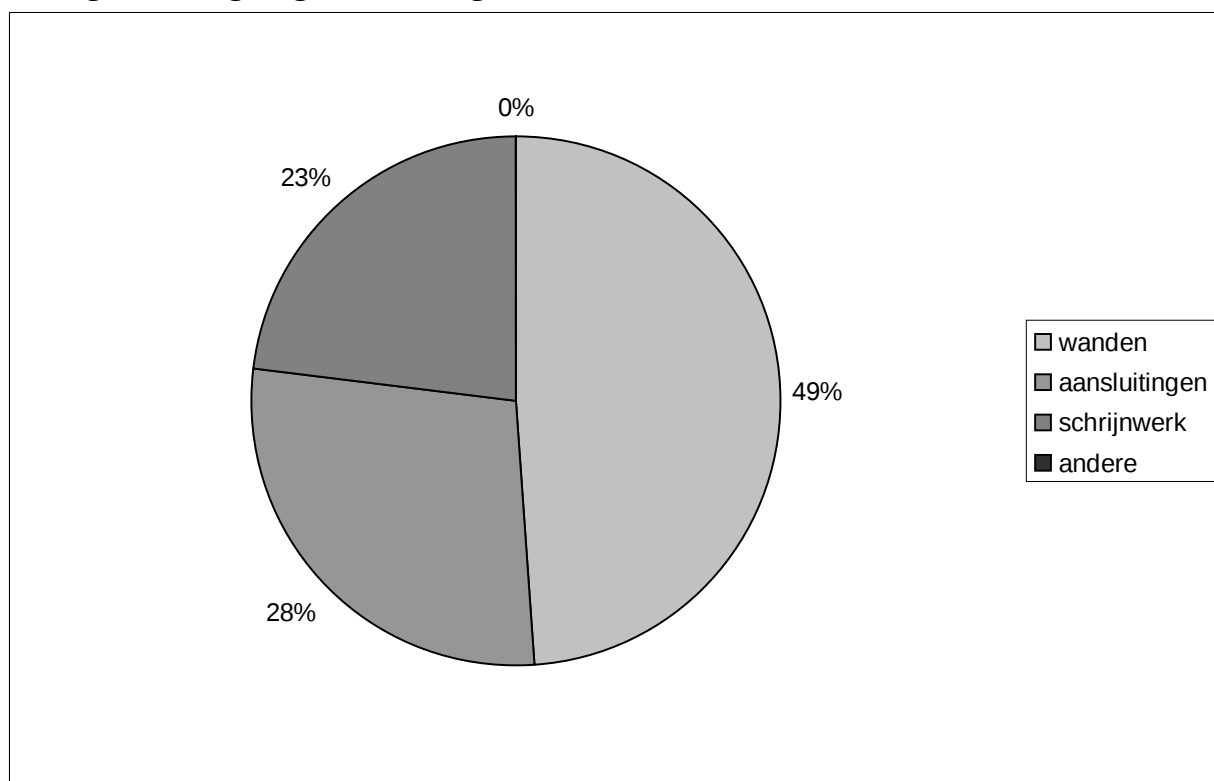
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

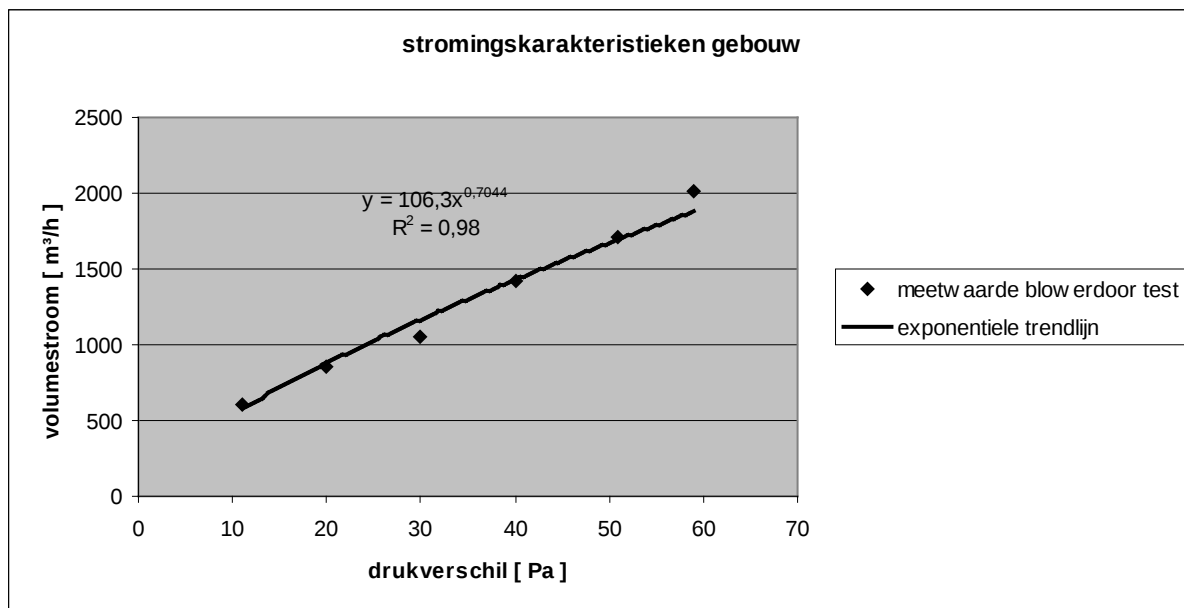


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

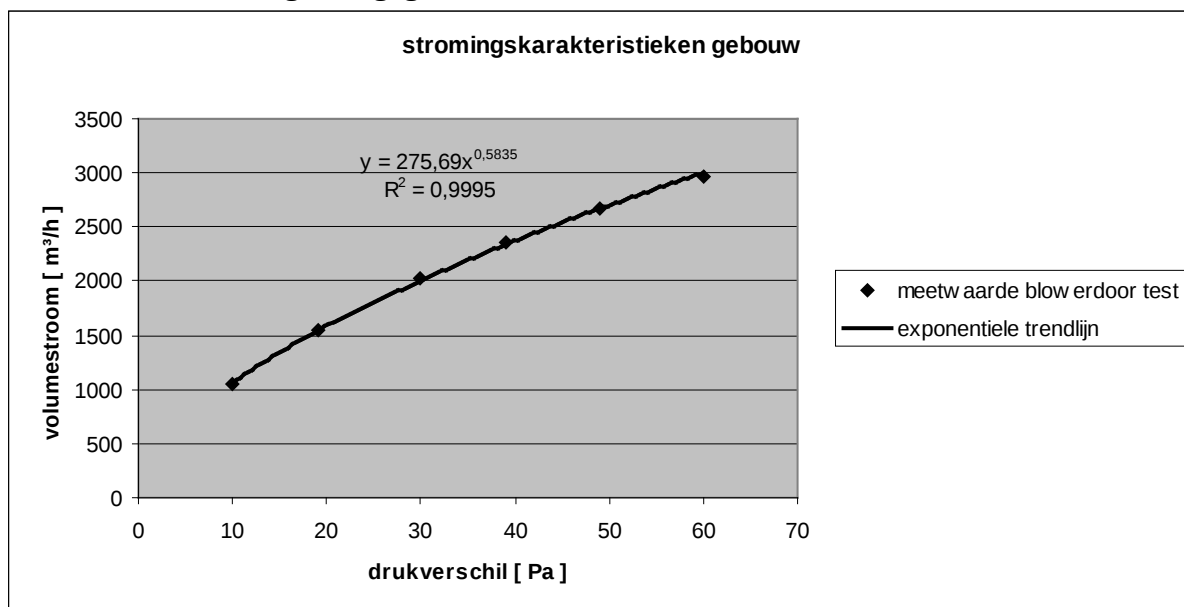


7) Woning Hemeryck

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

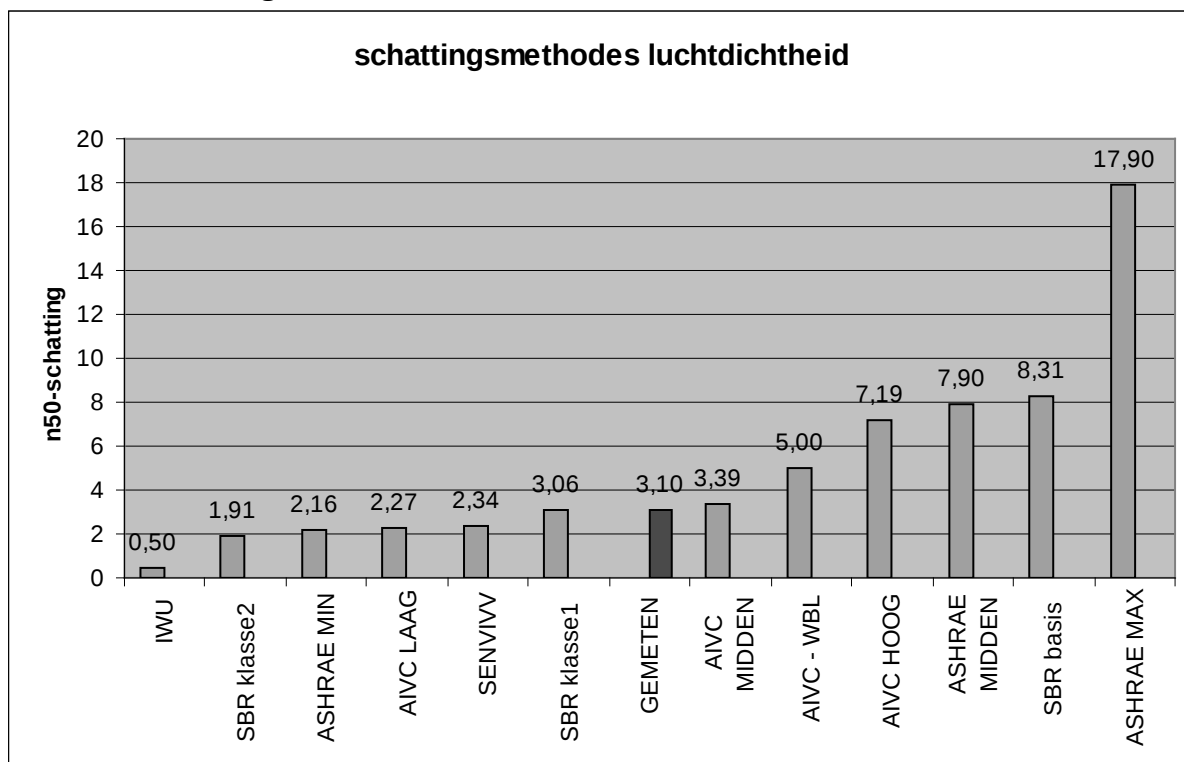
HEMERYCK	1, onderdruk	2, onderdruk	3, overdruk	4, overdruk
T buiten (°C)	13	13	13	13
T binnen (°C)	19	19	19	19
Vg (pN)	1907,03299	1672,198138	2702,52681	2790,08257
C	52,607	106,3	275,69	264,13
n	0,9178	0,7044	0,5835	0,6026
netto bi-volume	703,155	703,155	703,155	703,155
opp gebouwschil	698,82	698,82	698,82	698,82
verschil V %	3,818755266	2,426073653	1,023319652	1,006350584
Vh (pN)	1836,88678	1632,590295	2730,468227	2818,446018
n50	2,612349738	2,321807134	3,883166908	4,008285538
Q50	2,628554964	2,336210033	3,907255413	4,033150193

Resultaten:

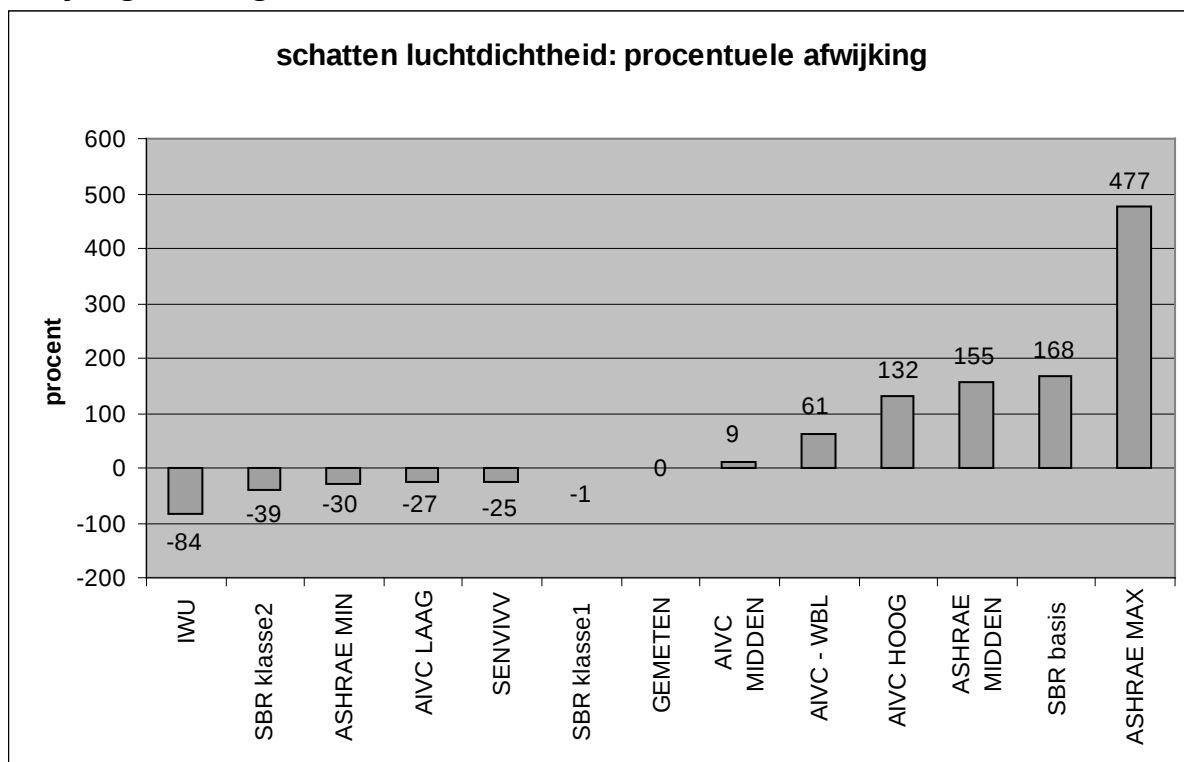
Luchtstroom	2181.53m ³ /h
n ₅₀ -waarde	3.1 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	3.1 m ³ /h.m ²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

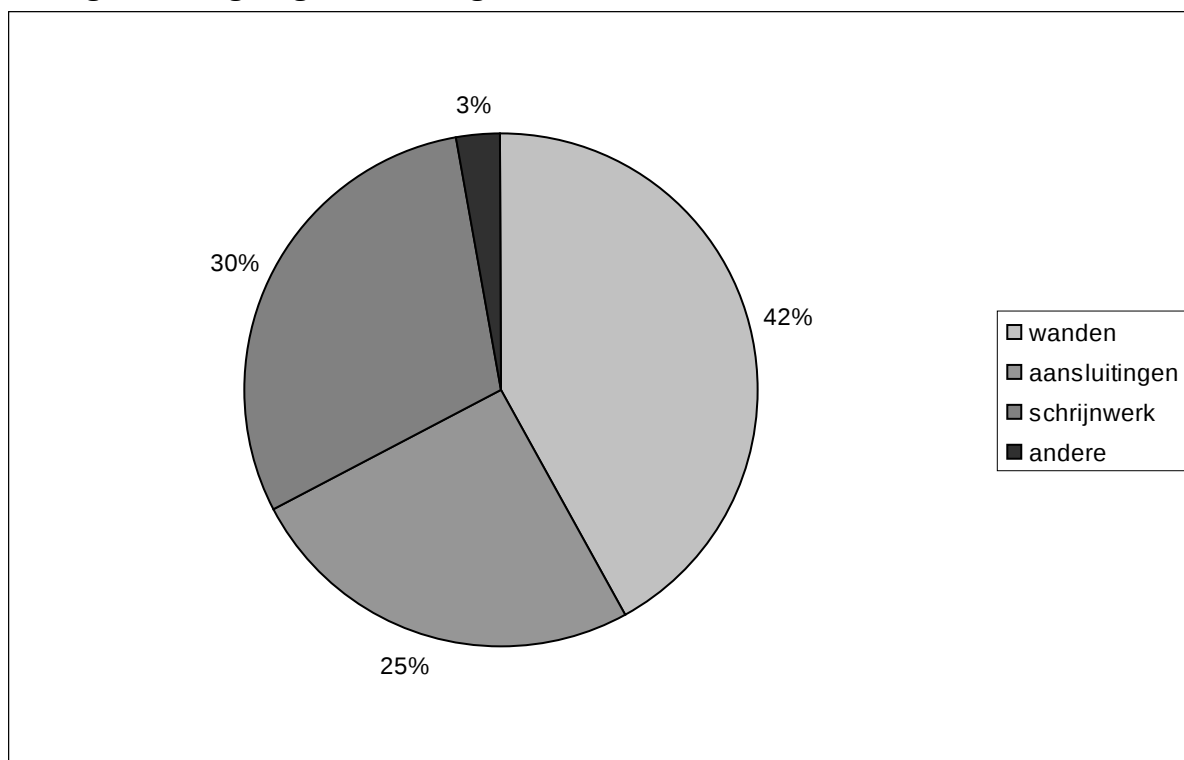
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

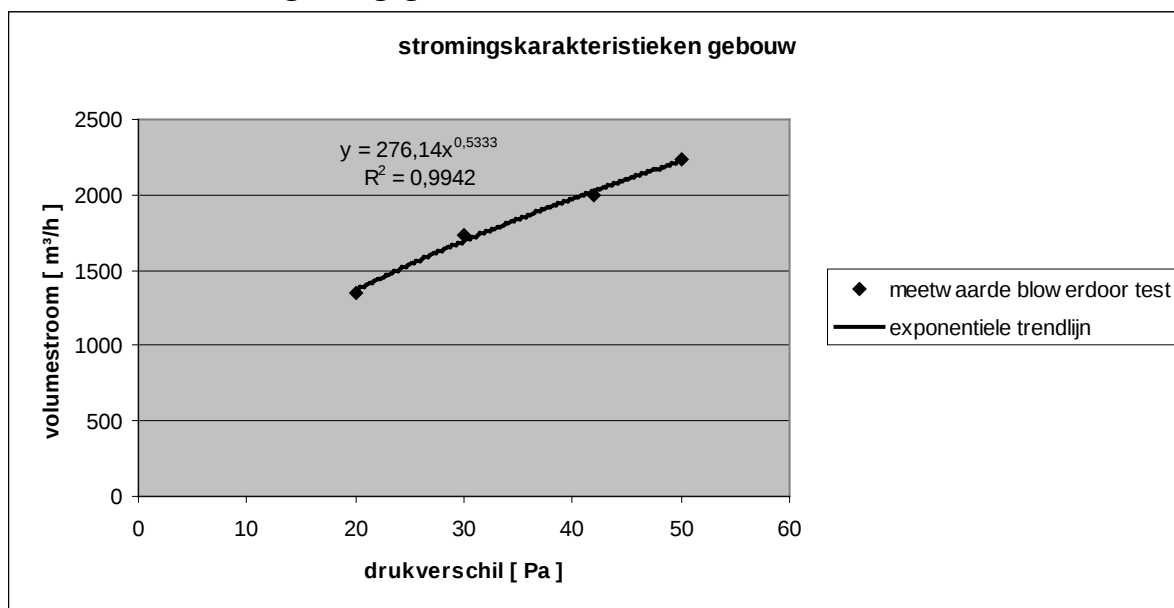


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

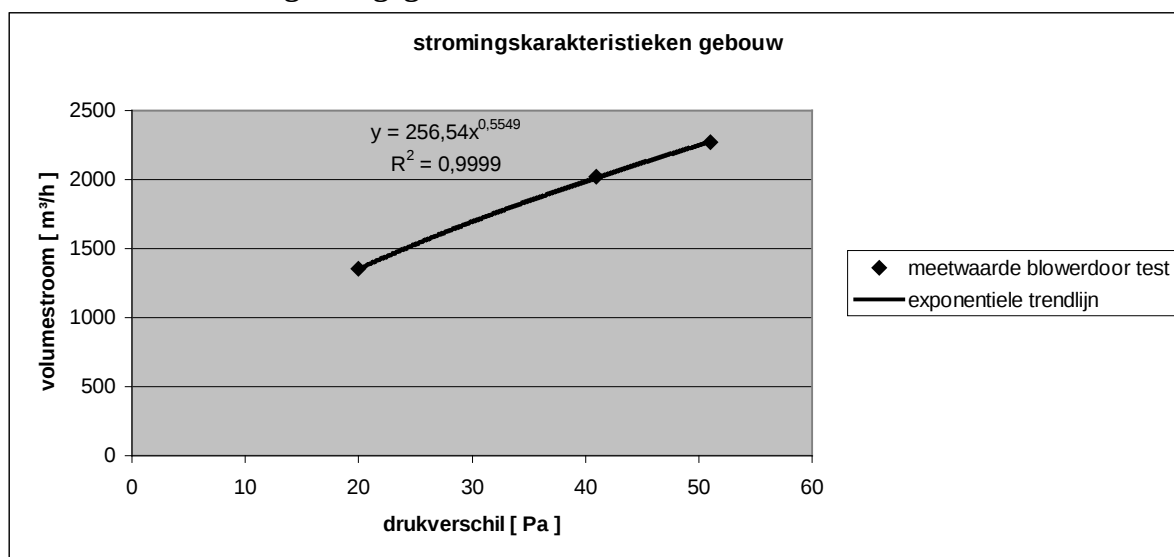


8) Woning Janssens

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

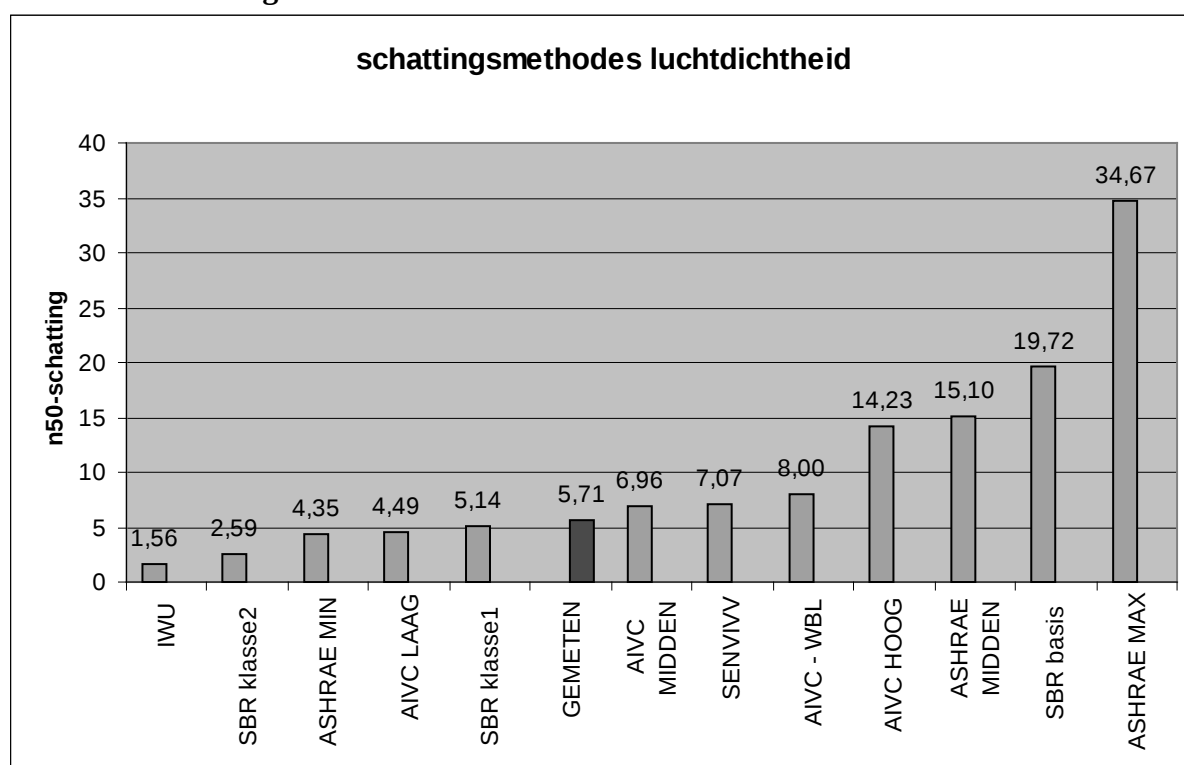
JANSSENS	1, overdruk	2, overdruk	3, overdruk	4, overdruk	5, onderdruk
T buiten (°C)	6	6	6	6	6
T binnen (°C)	18	18	18	18	18
Vg (pN)	3394,463287	3159,284626	2268,041907	2248,606935	2224,282904
C	558,08	415,76	222,23	256,54	276,14
n	0,5	0,5184	0,5938	0,5549	0,5333
netto bi-volume	390,89	390,89	390,89	390,89	390,89
opp gebouwschil	460,8	460,8	460,8	460,8	460,8
verschil V %	2,186837355	2,154489673	2,021822724	2,090290056	2,671827553
Vh (pN)	3470,354291	3228,849863	2314,843948	2296,612804	2166,400421
n50	8,878084093	8,260251894	5,921983034	5,875342947	5,542225231
Q50	7,531150805	7,007052653	5,023532873	4,983968759	4,701389802

Resultaten:

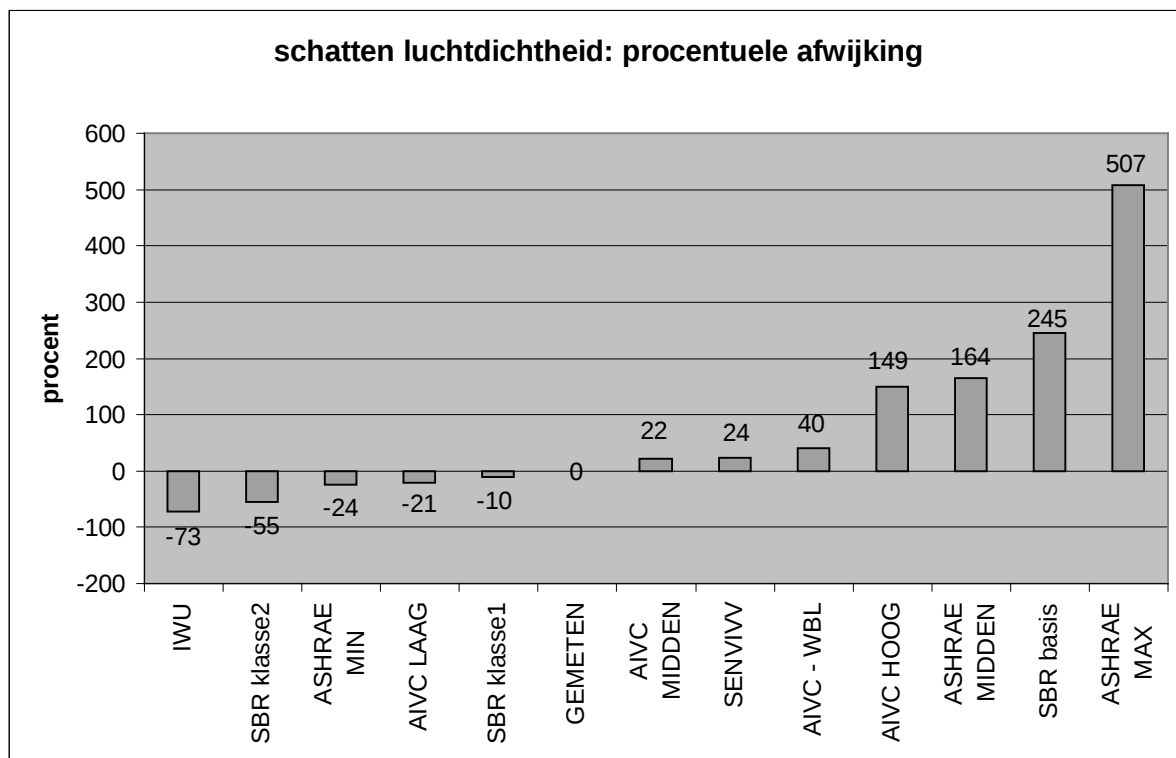
Luchtstroom	2231.51m ³ /h
n ₅₀ -waarde	5.7 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	4.8 m ³ /h.m ²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

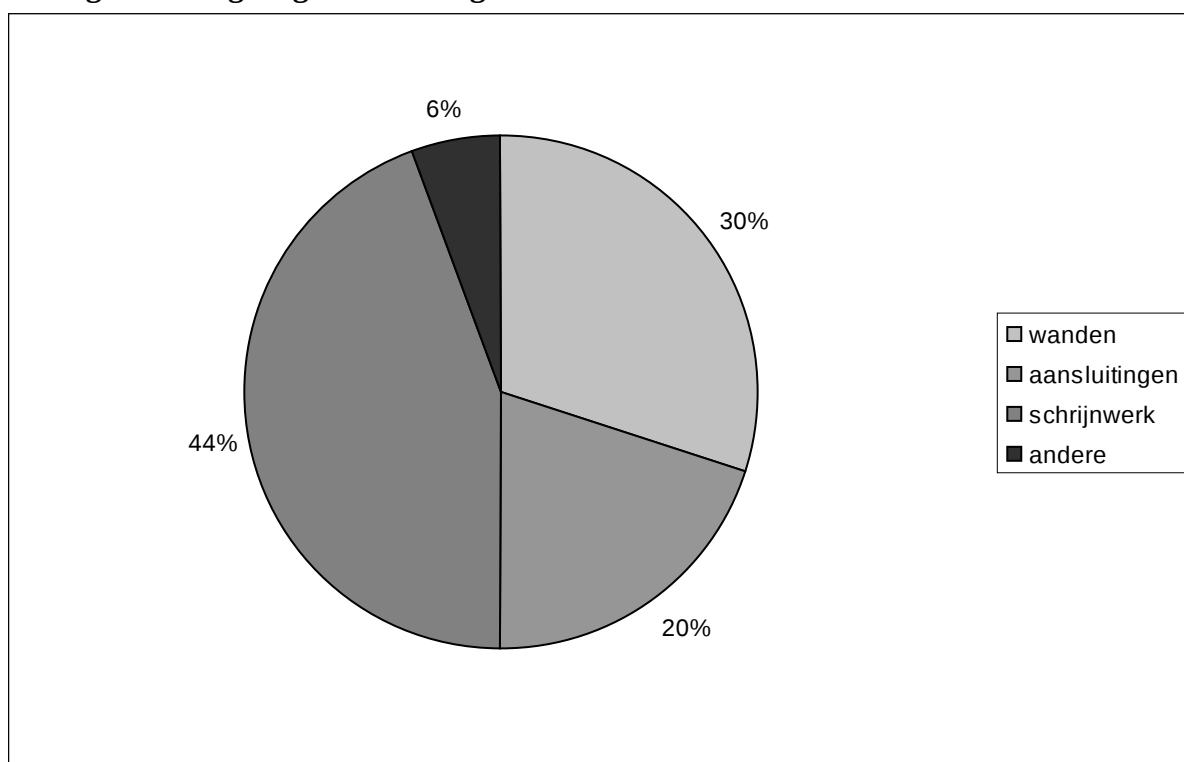
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

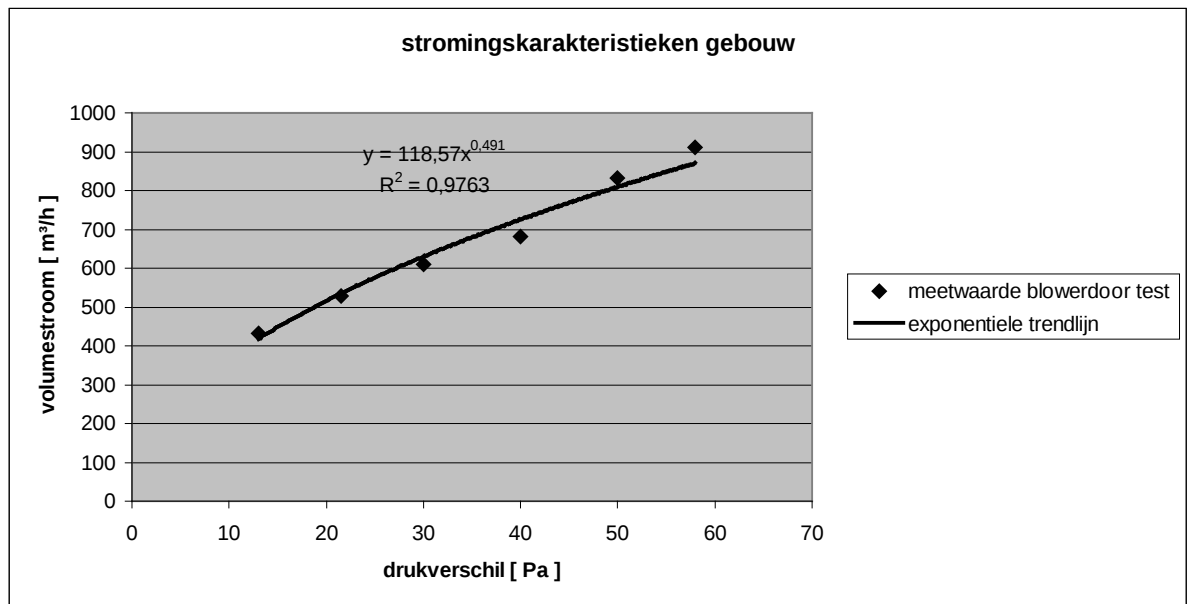


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

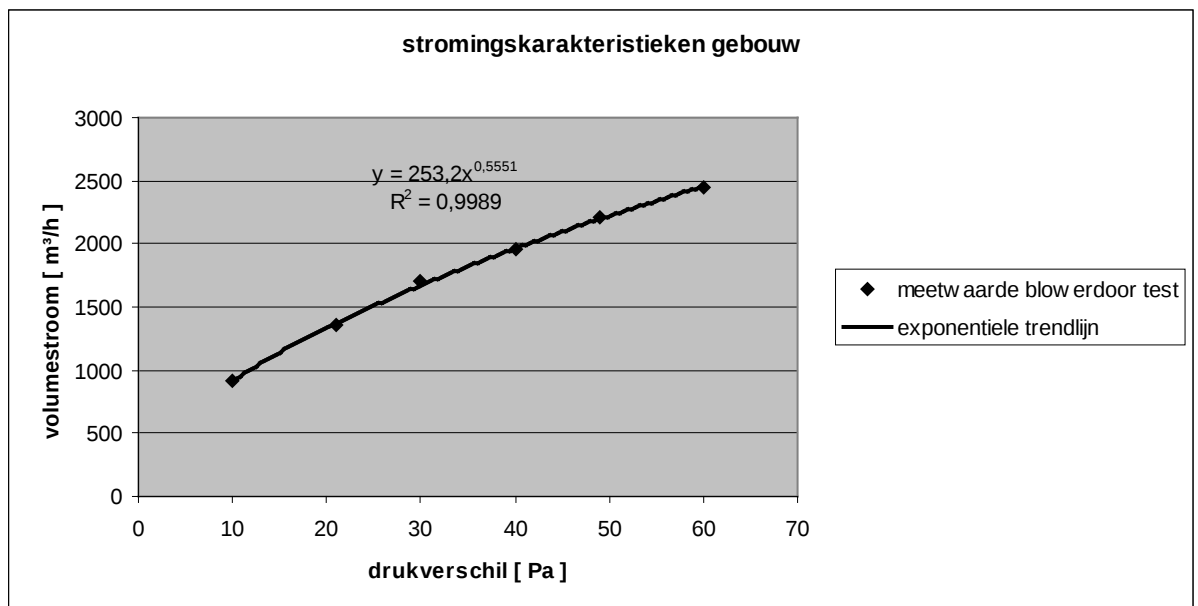


9) Woning Mertens

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

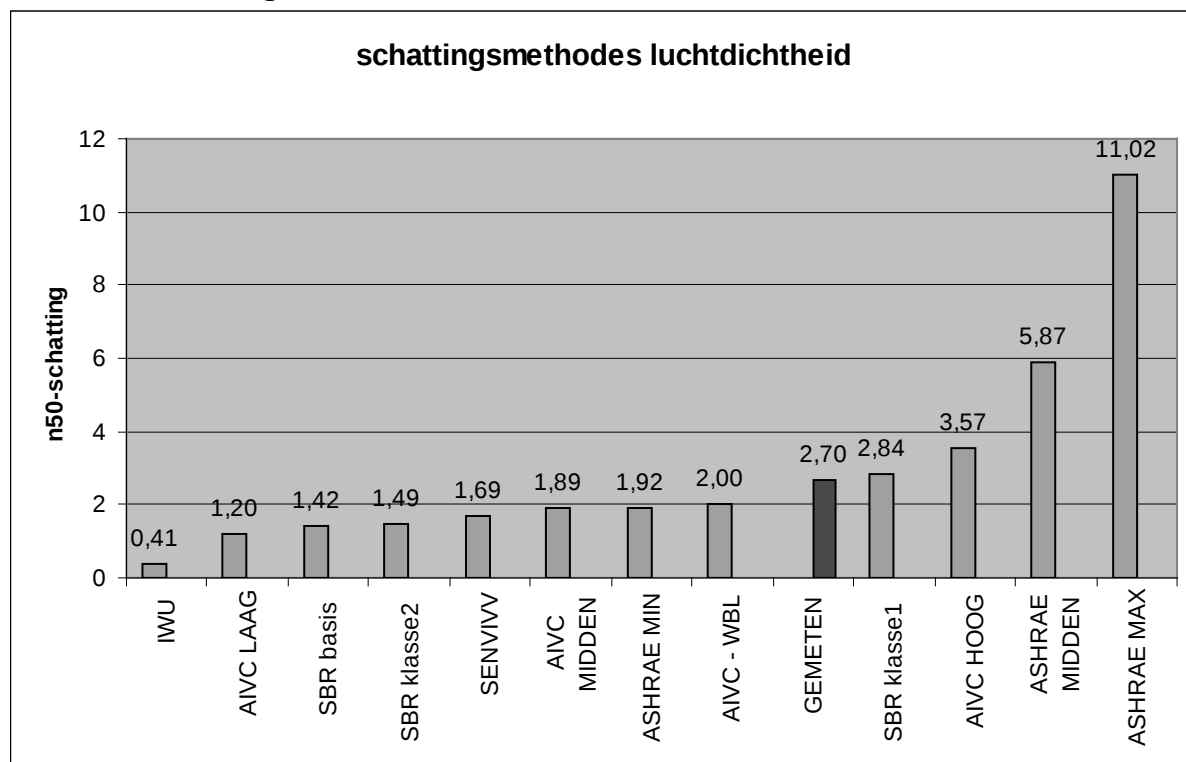
MERTENS	1, onderdruk	2, overdruk
T buiten (°C)	7	7
T binnen (°C)	14	14
Vg (pN)	809,410981	2221,068489
C	118,57	253,2
n	0,5	0,5551
netto bi-volume	563,06	563,06
opp gebouwschil	383,6	383,6
verschil V %	1,29872905	0,986951102
Vh (pN)	799,0336982	2243,207854
n50	1,419091568	3,983958821
Q50	2,0829867	5,847778556

Resultaten:

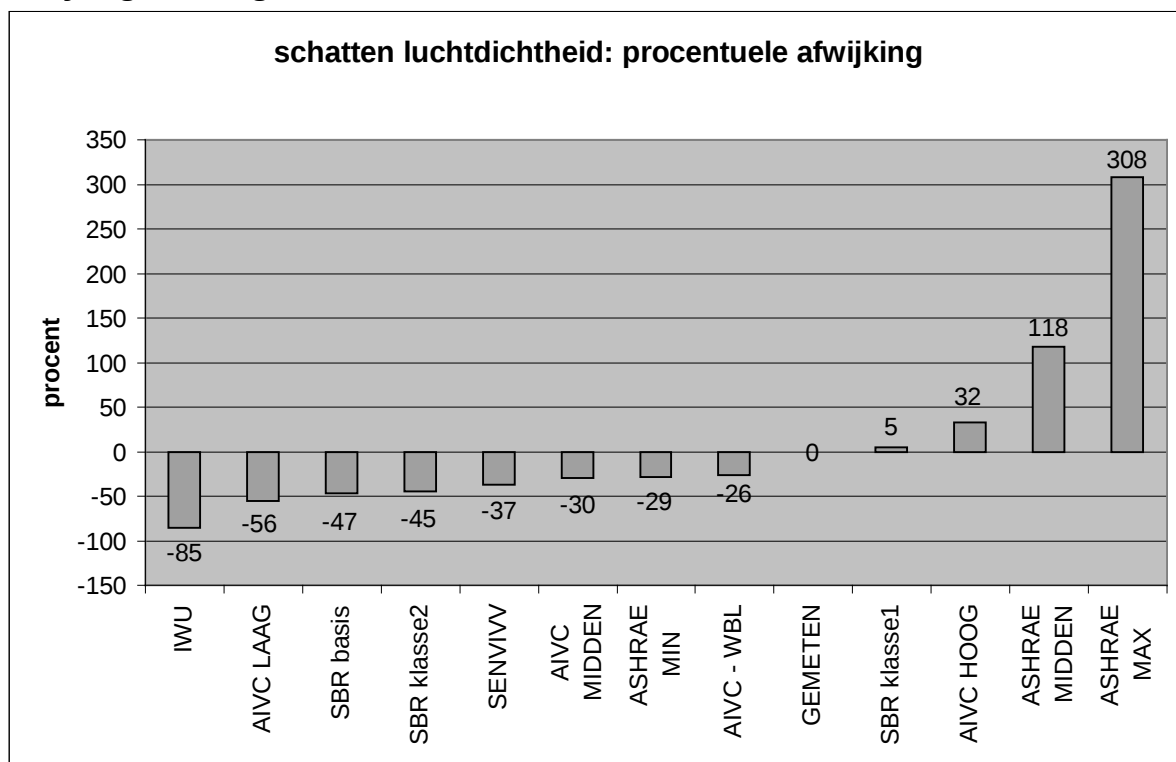
Luchtstroom	1521.12m³/h
n ₅₀ -waarde	2.7 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	4.0 m³/h.m²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

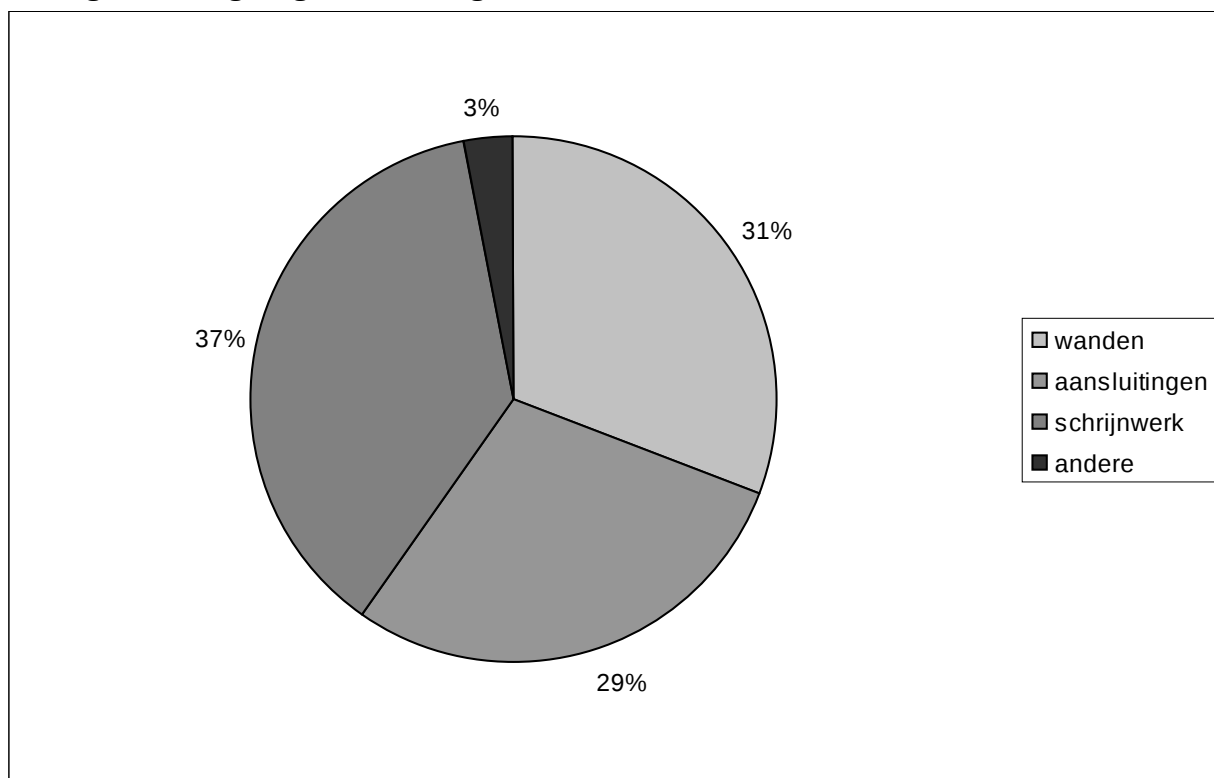
Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:

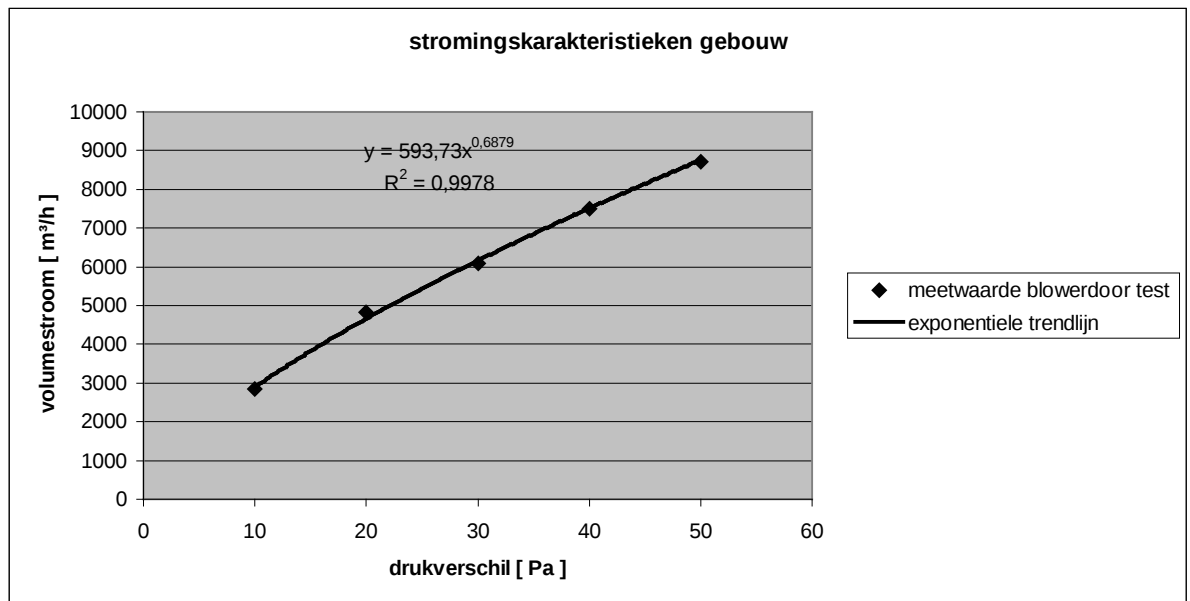


Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

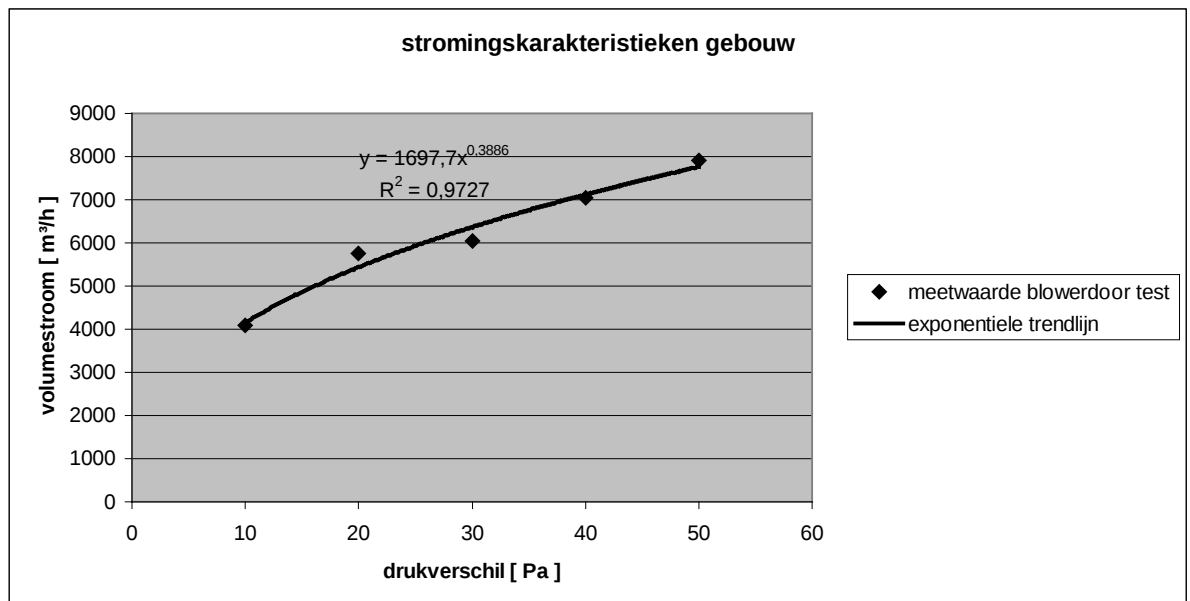


10) Woning Van Hulle

Grafische voorstelling meetgegevens onderdruk:



Grafische voorstelling meetgegevens overdruk:



Toepassing correctiefactoren:

$$\dot{V}_H(\rho_N) = \dot{V}_H(\rho_H) \cdot \left(\frac{\mu_H}{\mu_N} \right)^{2n-1} \cdot \left(\frac{\rho_H}{\rho_N} \right)^{1-n}$$

Parameters berekening:

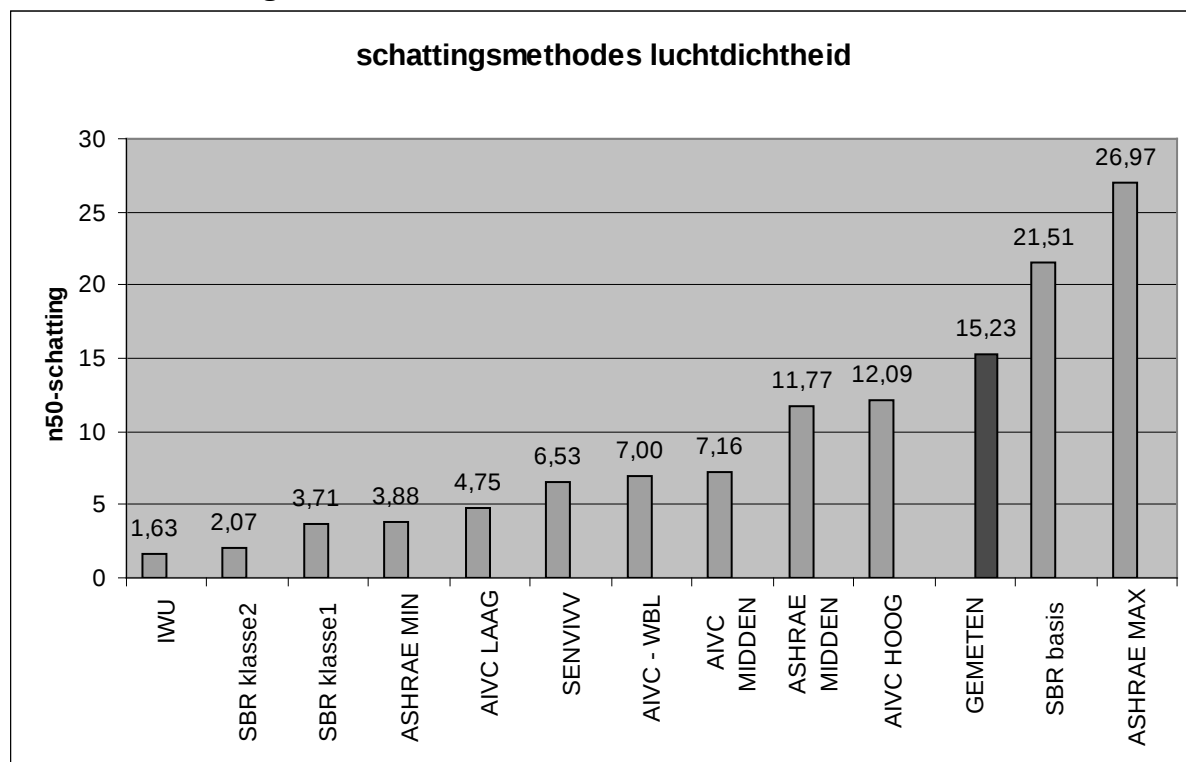
VAN HULLE	1, onderdruk	2, overdruk
T buiten (°C)	4	4
T binnen (°C)	22	22
Vg (pN)	8756,094892	7763,913575
C	593,73	1697,7
n	0,6879	0,5
netto bi-volume	533,95	533,95
opp gebouwschil	686,55	686,55
verschil V %	6,260643874	3,264689621
Vh (pN)	8240,205003	8025,935457
n50	15,43254051	15,0312491
Q50	12,00233778	11,69024173

Resultaten:

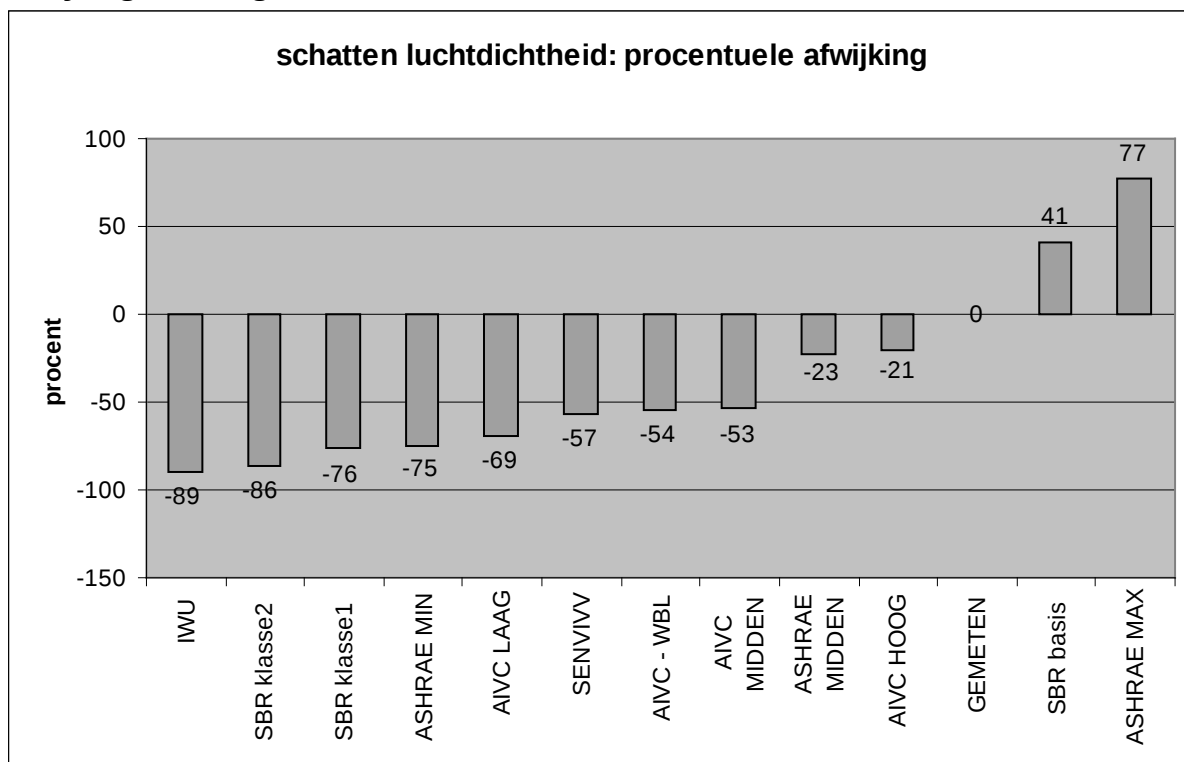
Luchtstroom	8133.07m³/h
n ₅₀ -waarde	15.2 h ⁻¹
q ₅₀ -waarde	11.8 m³/h.m²

Foutschatting	7%
Foutschatting	17%
Foutschatting	12%

Resultaten schattingsmethodes:



Afwijking schattingsmethodes:



Lekkageverdeling volgens schatting UGENT:

