

Experimenteel onderzoek bij luchtdichtheidsmetingen:
vergelijkende studie tussen traditionele Blowerdoor en
vernieuwende Pulse test

Jens Couckuyt

Promotoren: prof. Jelle Laverge, prof. dr. ir. Arnold Janssens

Begeleider: ir.-arch. Wolf Bracke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2017-2018



Experimenteel onderzoek bij luchtdichtheidsmetingen:
vergelijkende studie tussen traditionele Blowerdoor en
vernieuwende Pulse test

Jens Couckuyt

Promotoren: prof. Jelle Laverge, prof. dr. ir. Arnold Janssens

Begeleider: ir.-arch. Wolf Bracke

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur

Academiejaar 2017-2018



Voorwoord

Het schrijven van een thesis is een essentieel onderdeel van elke opleiding, ook van de opleiding tot industrieel ingenieur bouwkunde. Er worden twee wetenschappelijke werken geschreven gedurende de opleiding. Een bachelorproef om de academische bachelor tot een goed einde te brengen en een masterproef om de masteropleiding te voltooien. Dit verslag kadert in het voltooien van het masterjaar.

Een masterproef zorgt ervoor dat de opgedane (theoretische) kennis gekoppeld kan worden aan de praktijk. Het is een ideale manier om ervaring op te doen, en kritisch te leren denken.

In de bouwwereld zijn er verschillende vakgebieden. Vanuit mijn persoonlijke interesses koos ik ervoor om onderzoek te doen naar een onderwerp met energie. Deze keuze is ook toekomstgericht. Het belang van energiezuinig bouwen zal (de komende jaren) enkel maar toenemen. Luchtdichtheid kadert in het volledige concept rond energie. Uit bredere interesse voor het onderwerp heb ik ondertussen ook het theoretisch examen voor de erkenning als luchtdichtheidsmeter tot een goed einde gebracht.

Ook een woord van dank mag in dit voorwoord niet ontbreken. Langs deze weg wil ik iedereen bedanken die rechtstreeks en onrechtstreeks betrokken zijn bij deze scriptie. Eerst en vooral wil ik de begeleiders, promotor en de personen die hun woning ter beschikken stelden bedanken. Daarnaast gaat mijn dank ook uit naar mijn vriendin, mijn ouders en familie, ... Uiteraard is deze lijst niet limitatief. Tot slot gaat een speciaal dankwoord uit naar Stephen Jackson en Struktuur bvba. Stephen Jackson wil ik bedanken voor de bijstand in verband met het Pulsetoestel en de demonstratie bij een bezoek aan de Universiteit van Nottingham. Struktuur wil ik bedanken voor het advies en het uitlenen van de Blowerdoor.

Toelating tot bruikleen

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

Gent, 1 juni 2018

Jens Couckuyt

Abstract

EXPERIMENTEEL ONDERZOEK BIJ LUCHTDICHTHEIDSMETINGEN: VERGELIJKENDE STUDIE TUSSEN TRADITIONELE BLOWERDOOR EN VERNIEUWENDE PULSE TEST

Auteur: Jens Couckuyt

Promotoren: prof. Jelle Laverge
prof. dr. ir. Arnold Janssens

Begeleider: ir.-arch. Wolf Bracke

Academiejaar: 2017-2018

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van
Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Voorzitter: prof. dr. ir. Arnold Janssens
Vakgroep Architectuur en Stedenbouw

Samenvatting:

Om aan de steeds strengere milieu- en duurzaamheidsnormen te voldoen, moeten ook in de bouwwereld inspanningen worden geleverd. Eén ervan is om de energievraag van woningen te beperken. Om maatregelen zoals isoleren en hygiënische ventilatie optimaal te benutten, dient voldoende aandacht besteed te worden aan luchtdichtheid. Om de precieze luchtdichtheidswaarde van een gebouw te bepalen, dient een luchtdichtheidsmeting uitgevoerd te worden. Op dit ogenblik gebeuren deze metingen aan de hand van een Blowerdoortest. Hierbij wordt de woning zowel in over- als onderdruk geplaatst om een luchtstroom doorheen de luchtlekken te creëren. De luchtstroom bij een bepaald gekend drukverschil wordt gemeten. Op die manier kan berekend worden hoeveel het totale luchtlekdebiet van het gebouw bedraagt.

Sinds kort is een nieuwe meetmethode beschikbaar voor het meten van de luchtdichtheid: Pulse. Door middel van korte drukstijgingen wordt het luchtlekdebiet bepaald, bij meer natuurlijke drukverschillen in vergelijking met de Blowerdoor. In deze scriptie worden beide methodes uitvoerig getest in de praktijk. Hierbij worden verschillende gebouwen met beide apparaten gemeten. De resultaten van de twee systemen worden daarna geanalyseerd en vergeleken met elkaar. Op die manier kan nagegaan worden of de nieuwe methode representatieve resultaten kan voorleggen.

Kernwoorden:

Luchtdichtheid, gebouwen, Blowerdoor, Pulse

Experimental research on airtightness measurements: comparative study between the traditional Blowerdoor and innovative Pulse test

Jens Couckuyt

Supervisor(s): prof. Jelle Laverge, prof. dr. ir. Arnold Janssens

Abstract—This article shows the results of airtightness field testing with the Blowerdoor and Pulse, which will be compared and evaluated, in common dwellings in Flanders.

Keywords—airtightness, buildings, Blowerdoor, Pulse

I. INTRODUCTION

In order to meet the ever stricter environmental and durability standards, efforts must also be made in the construction industry. One of those efforts is to limit the energy demand of buildings. To make optimum use of measures such as insulation and hygienic ventilation, sufficient attention must be paid to airtightness. To determine the precise air leakage of a building an airtightness test must be carried out. For many years the Blowerdoor is the most used tool for measuring airtightness in buildings. A new measurement method has recently become available: Pulse.

II. PULSE

A. Principle

The device contains an airtank with a certain capacity, in this case 60 liters. The vessel must be charged by a compressor. During the measurement a known volume of air is sent out for one and a half seconds. This causes a short rise (pulse) in the air pressure. This pressure rise provides airflow through the air leaks. Over time the pressure difference will be stabilized again. The pressure difference, during two seconds before and after the air pressure pulse, is also recorded by the device. The container must be refilled after the test. The measurement result is calculated at a pressure difference of 4 Pa. The pressure range that is achieved is not the same for every test. It depends on the pressure in the air tank, the air leakage and the volume of the building.

B. Literature

Because the system has only recently been developed, little research has been done into this subject. The development was mainly done by the University of Nottingham^{[1] [2] [3] [4] [5]}. Consequently, all literature comes from this angle. Since the end of 2017 the first devices are commercially available. In this way, this is one of the first independent studies.

The studies in which field studies are carried out concern each time a prototype of the Pulse device. One test was performed in a controlled environment^[6]. The other one (dated) homes in the UK^[7]. From these studies, the Pulse shows sufficient repeatability and can measure openings very accurate. Only 1 study is, of course, insufficient to be able to assume these results as generally accepted.

In this way, this research will focus on field tests on new dwellings in Flanders. The airtightness is measured by both the Pulse and the Blowerdoor. These results are compared with each other and the Pulse is analyzed.

III. EXPERIMENTAL RESEARCH

A. Theoretical comparison

The biggest differences between the Pulse and Blowerdoor can be divided in three points.

Pressure difference— The Blowerdoor measurements are carried out at high pressure differences. The results are calculated at a pressure difference of 50 Pa. The pulse expresses the results at a pressure difference of 4 Pa. This is one of the basic concepts of the Pulse: measuring airtightness at natural pressure differences.

Pressurization— A problem of the Pulse is the fact that it only measures in pressurization. The standard recommends that both pressurization and depressurization measurements are performed. In Belgium, the execution of both measurements is mandatory when the measurement is carried out in the context of the energy performance requirements.

Position— A third difference between the Pulse and the Blowerdoor is the position of the device. The Blowerdoor is placed in the building envelope, while the Pulse is placed inside the building. Because of the fact that the building envelope is penetrated, the differences between inside and outside have to be taken into account. A first point of attention is the natural pressure difference between inside and outside. In addition, the temperature difference must also be taken into account. Besides that, the blower installation is not perfectly airtight, which can influence the results. Even though that effect is rather limited.

B. Equipment

The Minneapolis Blower is used for carrying out the Blowerdoor measurements. The measuring instrument is a DG-700 Pressure & Flow Gauge (serial number: 16730-107). The measuring device is calibrated on 15/03/2016 by the

Energy Conservatory Calibration. The data was processed using Tectite Express 4.1 software.

The Pulse device is the Pulse 60. The number 60 refers to the air container. The capacity is (in theory) 60 liters. After research by the manufacturer it appeared that the air tank contains only 58,5 liters. The device was built on November 2017. Information on the pressure gauge is not available.

C. Dwellings

The tested dwellings are all situated in Flanders. The focus is on new homes. The reason behind this choice is that most airtightness measurements in Belgium are carried out in the context of the energy performance requirements. These requirements apply to new buildings. For the moment there is no obligated requirement for the airtightness. But the stricter requirements for energy performance makes an airtightness measurement as good as necessary to meet the requirements.

Due to problems with the Pulse in ‘too’ airtight buildings, a number of older homes and renovated buildings are also being tested. These houses include both detached and semi-detached buildings. The construction method is the same for seven out of eight buildings: masonry. Only building W5 is made up of a timber frame.

Detailed information about the tested properties can be found in Table 1. W2 and W8 are renovations. The year of construction of these buildings is the year of renovation. The mentioned volume is the internal volume. This is used to determine the ‘air changes per hour’ (ACH).

Table 1 Information tested dwellings

	Year of construction	Form of construction	Volume [m ³]
W1	1996	detached	467,42
W2	1998	detached	354,39
W3	2017	semi-detached	280,69
W4	2015	detached	639,49
W5	2017	detached	545,61
W6	2015	semi-detached	1245,0
W7	2012	detached	710,65
W8	2012	semi-detached	486,60

The table shows that a wide range of buildings is tested.

IV. METHODOLOGY

All Blowerdoor measurements are carried out according to standard NBN EN ISO 9972:2015^[8]. This standard replaces NBN EN 13829:2001.

All tests are according to the standard method. This means that one test contains a pressurization test and an depressurization test. The preparations of the building are carried out according to the standard, with extension of the requirements according to the Belgian technical specification STS-P-71-3^[9].

In a number of buildings (W3, W4, W5 and W8) a ventilation system D is placed. Buildings W6 and W7 contains a ventilation C. In Building W1 and W2 is no system for ventilation present. In the dwellings with ventilation, the system is shut down and the openings are sealed. All

intentionally created openings in the building envelope, such as mailboxes, are closed. All indoor door openings are opened, except the door to the toilet.

The same preparations are made for carrying out the Pulse measurements. In order to exclude certain factors as much as possible, an attempt is made to carry out the measurements within a limited period of time.

When Pulse measurements are performed, the air pressure is registered in another room within the same building. With this measuring it is checked whether the pressure increases in the entire building are noticeable. The difference in pressure is measured by the DG-700 pressure and flow gauge. The TECLOG 3 software processes the measurements. The reference for the pressure is taken outside the measured volume.

In order to approach the test conditions of both tests as well as possible, a measurement is also carried out with the setup of the Blowerdoor still in the doorway. However, this produces only a few good Pulse measurements. Only in building W1 (W1 – 1(b)) a result can be calculated.

V. RESULTS

Figure 1 shows the results of the Blowerdoor and Pulse measurements from each house. It should be noted that W3 is not on this list. The reason behind this is a problem with the Pulse 60 in extreme airtight houses. Besides that the airtank of 60 liters is insufficiently powerful to fully measure the volume of W1 in combination with the airtightness score ($n_{50} = 8.48$). Because of that, the volume is split into three different volumes. Both tests (Blowerdoor & Pulse) were performed for each of these measurements.

Also W6 and W7 can not be found in the overview, due issues with the Pulse. In this way a result with the Pulse is not available.

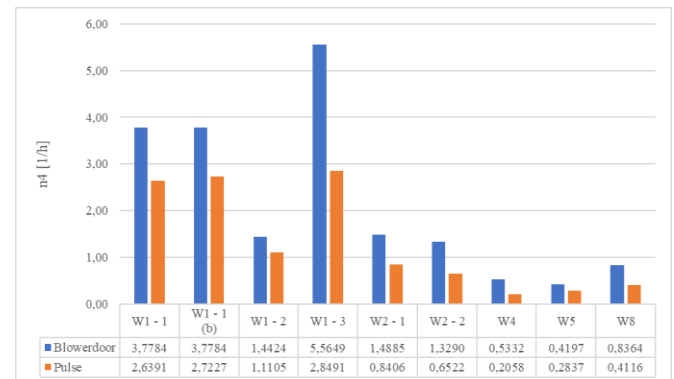


Figure 1 n4-results Blowerdoor and Pulse

The ratio of the Pulse measurements relative to the Blowerdoor ranges from 38,59% (W4) to 76,99% (W1 – 2). However, there is no immediate relation between the ratios. The degree of airtightness, type of buildings, weather conditions, building size do not provide a link.

A notable point that emerged during the measurements is the influence of the position of the Pulse in the building on the results. A clear example of this can be seen in Figure 2. It is clearly visible that the pressure difference can vary considerably, despite the same setting. Only the position of the

device in the building is different. This trend is visible in all tested houses. However, the ideal arrangement or cause of this fact was not found.

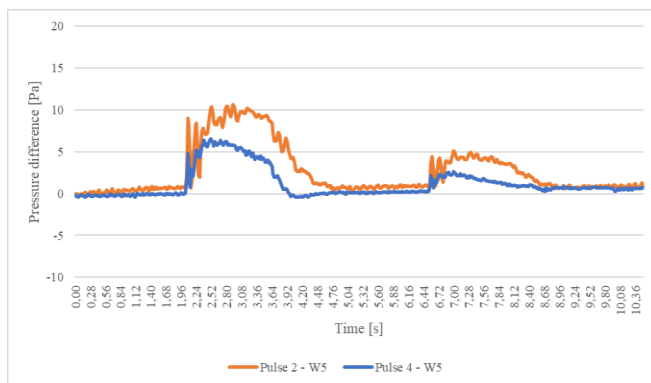


Figure 2 pressure difference Pulse 2 and Pulse 4 (W5)

VI. CONCLUSION

A. Blowerdoor vs Pulse

Based on the measurements and analyses of the results, it appears that the Pulse measurement achieves a lower result on airtightness than the Blowerdoor. This fact was confirmed independently for each of the tested houses. This is a confirmation previous research. However, there is no connection between the difference in results. The fact that every measurement with the Pulse has achieved a lower measurement result is positive. It shows the consequence of the Pulse measurements.

Based on these measurements, it is not possible to determine which of the devices (Pulse or Blowerdoor) is most accurate. Earlier research by Cooper^[7] showed that the Pulse measures a known opening more accurately than the Blowerdoor. Furthermore, it is not possible to find out where the difference in the measurement results is. This may be due to extrapolation, due to the overestimation of the airtightness at high pressure differences, or an underestimation when measuring at low pressure differences for example. Further research may possibly focus on this.

A second positive factor for the Pulse is the fact that, despite the low pressure differences in comparison with the Blowerdoor, the pressure rise is noticeable in the fully measured volume. This is shown by the registration of the pressure difference in a room 'far' from the Pulse device.

B. Evaluation Pulse

In addition to the above-mentioned positive points, there are also a number of disadvantages. A first negative point is the fact that the Pulse only measures at pressurization. Measuring in both pressurization and depressurization is mandatory for carrying out airtightness measurements in the context of the energy performance requirements. And let that be the framework where almost all airtightness measurements are carried out in Belgium.

A second disadvantage is the fact that many measurements not meet the requirements of the error analyses. Often there is no sufficiently large correlation between the different measurement points to determine a linear regression line, and

the corresponding correlation and determination coefficient. Often the minimum measured pressure difference does not include the value of 4 Pa. This is the value at which a result is calculated. These factors ensure that, in order to measure a certain volume, multiple tests must be carried out in order to arrive at a correct measurement. A total of 65 Pulse measurements, without technical problems, were carried out. Of those 65 measurements only 24 fulfilled all requirements, which is approximately 37%. A measurement with the Pulse takes only a few seconds, but the charging takes around 11 minutes (before the air tank is fully loaded). The time saved with the fast measuring of the Pulse in comparison with the Blowerdoor will be undone by this.

The cause of the fact that many measurements do not meet the requirements of the error analyses can partly be explained by the position of the device in a room. When comparing the pressure difference of the various measurements, it appeared that the location of the Pulse within a building can influence the pressure process. In the measurements where the requirements are not met, an erratic process of the pressure can often be seen. These pressure drops and rises ensure insufficient coherence between the measuring points. These fluctuations appear to be smaller in the same building if the measuring device is positioned at a different location, so that often a measurement result can be determined.

As a general conclusion it can be stated that the Pulse offers promising results, taking into account that the method is still in its infancy. To get established as a fully-fledged and reliable measuring device for airtightness measurements a number of, not insurmountable, points need to be refined.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to acknowledge Mr. S. Jackson for the help with the Pulse and Struktuur for the Blowerdoor equipment. Also a special word of thank to the owners of the tested buildings.

REFERENCES

- [1] Cooper, E., & Etheridge, D. (2004). Measurement of building leakage by unsteady pressurisation. Gepresenteerd bij 25th AIVC Conference, Prague.
- [2] Cooper, E., & Etheridge, D. (2007a). An innovative technique for measurement of building leakage at low pressures. Gepresenteerd bij IAQVEC, Sendai, Japan.
- [3] Cooper, E., & Etheridge, D. (2007b). Determining the adventitious leakage of buildings at low pressure. Part 1: uncertainties.
- [4] Cooper, E., Etheridge, D., & Smith, S. (2007). Determining the adventitious leakage of buildings at low pressure. Part 2: pulse technique.
- [5] Cooper, E., Xiaofeng, Z., Gillot, M., Riffat, S., & Yingqing Zu. (2014). A nozzle pulse pressurisation technique for measurement of building leakage at low pressure. Gepresenteerd bij AIVC Conference, Poznan, Poland.
- [6] Xiaofeng, Z., Cooper, E., Mazzon, J., Wallis, I., & Wood, C. (2017). A comparison study of the blower door and novel pulse technique on measuring enclosure airtightness in a controlled environment. Gepresenteerd bij AIVC Conference, Nottingham, UK.
- [7] Cooper, E., Zheng, X., Wood, C., Gillot, M., Tetlow, D., Riffat, S., & De Simon, L. (2016). Field trialling of a new airtightness tester in a range of UK homes.
- [8] Belgisch instituut voor normalisatie (BIN). (2015). NBN EN ISO 9972:2015.FOD Economie. (2014). STS P 71-3: Luchtdichtheid van gebouwen - luchtdichtheidstest.
- [9] FOD Economie. (2014). STS P 71-3: Luchtdichtheid van gebouwen - luchtdichtheidstest.

Inhoud

1.	Inleiding.....	1
2.	Luchtdichtheid van gebouwen.....	2
2.1	Kadering.....	2
2.1.1	EPB-eisen	3
2.2	Luchtdichtheid.....	4
2.2.1	Termen en definities.....	4
2.2.2	Luchtlekken	6
2.2.3	Luchtdichtheid binnen de EPB-eisen	7
2.3	Luchtdicht bouwen.....	9
2.3.1	Belang luchtdicht bouwen	9
2.3.2	Gevolgen beperkte luchtdichtheid.....	9
2.3.3	Kostenoptimum	10
2.3.4	Invloed van tijd.....	11
3.	Luchtdichtheidstesten	12
3.1	Grootheden	13
3.1.1	Luchtlekdebiet per eenheid van volume ($n\Delta p$)	13
3.1.2	Luchtdoorlatendheid ($q\Delta p$)	14
3.1.3	Specifiek luchtlekdebiet (EPB-eisen).....	14
3.1.4	Luchtlekdebiet per eenheid van vloeroppervlakte ($w_{\Delta p}$)	15
3.1.5	Effectief luchtlekoppervlak	16
3.1.6	Drukverschillen	16
3.1.7	Infiltratieverlies bij warmteverliesberekening.....	17
3.2	Blowerdoor.....	19
3.2.1	Principe.....	19
3.2.2	Luchtstromingen.....	20
3.2.3	Vorbereiding.....	21
3.2.4	Meetprocedure.....	22

3.3	Pulse	27
3.3.1	Principe.....	27
3.3.2	Drukverloop.....	28
3.3.3	Natuurlijk drukverschil.....	29
3.3.4	Onzekerheden/correctie	29
3.3.5	Parameters goede meting.....	31
3.3.6	Opmerking.....	32
4.	Theoretische vergelijking	33
5.	Experimenteel onderzoek	35
5.1	Testwoningen	36
5.1.1	Testwoning 1	37
5.1.2	Testwoning 2	38
5.1.3	Testwoning 3	39
5.1.4	Testwoning 4	40
5.1.5	Testwoning 5	41
5.1.6	Testwoning 6	42
5.1.7	Testwoning 7	43
5.1.8	Testwoning 8	44
5.2	Meetapparatuur.....	45
5.2.1	Blowerdoor	45
5.2.2	Pulse	45
5.2.3	Registratie drukverschil.....	45
5.3	Metingen volgens norm.....	46
6.	Meetresultaten	47
6.1	Testwoning 1	48
6.1.1	Blowerdoor	48
6.1.2	Pulse	52
6.1.3	Drukverschil	58

6.1.4	Vergelijking.....	59
6.2	Testwoning 2.....	63
6.2.1	Blowerdoor.....	63
6.2.2	Pulse	66
6.2.3	Drukverschil	71
6.2.4	Vergelijking.....	72
6.3	Tussenevaluatie 1	74
6.4	Testwoning 3.....	75
6.4.1	Blowerdoor.....	75
6.4.2	Pulse	77
6.4.3	Drukverschil	81
6.4.4	Vergelijking.....	82
6.5	Testwoning 4.....	83
6.5.1	Blowerdoor.....	83
6.5.2	Pulse	84
6.5.3	Drukverschil	87
6.5.4	Vergelijking.....	88
6.6	Tussenevaluatie 2	89
6.7	Testwoning 5.....	90
6.7.1	Blowerdoor.....	90
6.7.2	Pulse	91
6.7.3	Drukverschil	93
6.7.4	Vergelijking.....	94
7.	Testwoning 6.....	95
7.1	Blowerdoor.....	95
7.2	Pulse	96
8.	Testwoning 7.....	97
8.1	Blowerdoor.....	97

8.2	Pulse	98
8.3	Testwoning 8	99
8.3.1	Blowerdoor	99
8.3.2	Pulse	101
8.3.3	Drukverschil	103
8.3.4	Vergelijking.....	104
9.	Samenvatting	105
10.	Besluit.....	108
10.1	Inleiding tot besluit.....	108
10.2	Evaluatie Pulse	108
10.3	Verder onderzoek	111
11.	Bronnen	112
12.	Bijlagen	115

Lijst van figuren

Figuur 1: uitstoot per sector (België 2015) - bron: klimaat.be, milieurapport.be.....	2
Figuur 2: infiltratie en exfiltratie in een woning - bron: wtcb.be	6
Figuur 3: drukverschil door wind – bron: wtcb.be	7
Figuur 4: thermische trek – bron: wtcb.be.....	7
Figuur 5: lekdebiet bij 50Pa per eenheid oppervlakte (=Q50) (SENVIVV-studie)	8
Figuur 6: kostenoptimum luchtdichtheid.....	10
Figuur 7: schets bepaling volumes	13
Figuur 8: principe Blowerdoortest (onderdruk) – bron: google afbeeldingen.....	19
Figuur 9: principeschets Pulse - bron: (Cooper & Etheridge, 2007a)	27
Figuur 10: drukverloop Pulsetest	28
Figuur 11: meetopstelling Pulse	29
Figuur 12: stromingsexponent.....	31
Figuur 13: situeringsplan W1 - bron: Google.....	37
Figuur 14: gevelaanzicht W1	37
Figuur 15: situeringsplan W2 – bron: Google.....	38
Figuur 16: gevelaanzicht W2	38
Figuur 17: situeringsplan W3 – bron: Lapeirre	39
Figuur 18: gevelaanzicht W3	39
Figuur 19: situeringsplan W4 - bron: Lapeirre.....	40
Figuur 20: gevelaanzicht W4 – bron: Lapeirre.....	40
Figuur 21: situeringsplan W5 – bron: Google.....	41
Figuur 22: gevelaanzicht W5 - bron: Dewaele.....	41
Figuur 23: situeringsplan W8 – bron: Google.....	44
Figuur 24: gevelaanzicht W8	44
Figuur 25: configuratie TECLOG 3	45
Figuur 26: opstelling W1 - BD.....	48
Figuur 27: luchtlek garage - W1.....	51

Figuur 28: Pulsemetingen – W1	52
Figuur 29: Pulsemetingen - W1 - 1 (1).....	53
Figuur 30: Pulsemetingen - W1 - 1 (2).....	54
Figuur 31: Pulsemetingen - W1 - 1 (3).....	54
Figuur 32: Pulsemetingen - W1 - 2 (1).....	55
Figuur 33: Pulsemetingen - W1 - 2 (2).....	55
Figuur 34: meetopstelling Pulse - W1	56
Figuur 35: Pulsemetingen - W1 - 3 (1).....	57
Figuur 36: Pulsemetingen - W1 - 3 (2).....	57
Figuur 37: registratie drukverschil 1 - W1	58
Figuur 38: registratie drukverschil 2 - W1	58
Figuur 39: vergelijking V_4 -waarde volume 1 (a) - W1	59
Figuur 40: vergelijking n_4 -waarde volume 1 (a) - W1	59
Figuur 41: vergelijking V_4 -waarde volume 1 (b) - W1.....	60
Figuur 42: vergelijking n_4 -waarde volume 1 (b) - W1.....	60
Figuur 43: vergelijking V_4 -waarde volume 2 - W1	61
Figuur 44: vergelijking n_4 -waarde volume 2 - W1.....	61
Figuur 45: vergelijking V_4 -waarde volume 3 - W1	62
Figuur 46: vergelijking n_4 -waarde volume 3 - W1.....	62
Figuur 47: meetopstelling W2 - BD	63
Figuur 48: Pulsemetingen - W2 – 1.....	66
Figuur 49: Pulsemetingen - W2 – 2.....	67
Figuur 50: Pulsemetingen - W2 – 3.....	68
Figuur 51: Pulsemetingen - W2 – 4.....	68
Figuur 52: Pulsemetingen - W2 - 5	69
Figuur 53: Pulsemetingen - W2 - 6	70
Figuur 54: registratie drukverschil 1 - W2	71
Figuur 55: registratie drukverschil 2 - W2	71

Figuur 56: vergelijking V_4 -waarde volume 5 - W2	72
Figuur 57: vergelijking n_4 -waarde volume 5 - W2.....	72
Figuur 58: vergelijking V_4 -waarde volume 6 - W2	73
Figuur 59: vergelijking n_4 -waarde volume 6 - W2.....	73
Figuur 60: tussenevaluatie 1	74
Figuur 61: afdichting ventilatie W3	75
Figuur 62: meetopstelling W3 - BD	75
Figuur 63: Pulsemetingen type 1 - W3.....	77
Figuur 64: Pulsemetingen type 2 - W3.....	78
Figuur 65: meetopstelling Pulse	78
Figuur 66: Pulsemetingen type 3 – W3.....	79
Figuur 67: Pulsemeting met Blowerdoor - W3	80
Figuur 68: registratie drukverschil 1 - W3	81
Figuur 69: registratie drukverschil 2 - W3	81
Figuur 70: registratie drukverschil 3 - W3	82
Figuur 71: afdichting ventilatie W4	83
Figuur 72: meetopstelling W4 - BD	83
Figuur 73: weerdata Nevele testdag W4	84
Figuur 74: Pulsemetingen - W4.....	84
Figuur 75: Pulsemetingen locatie 1 & 2 - W4.....	85
Figuur 76: Pulsemetingen invloed wind - W4.....	85
Figuur 77: Pulsemetingen goede test - W5.....	86
Figuur 78: registratie drukverschil 1 - W4	87
Figuur 79: registratie drukverschil 2 - W4	87
Figuur 80: vergelijking V_4 -waarde W4.....	88
Figuur 81: vergelijking n_4 -waarde W4.....	88
Figuur 82: Pulsemetingen W5.....	91
Figuur 83: vergelijking Pulse 3 & 4 - W5.....	92

Figuur 84: registratie drukverschil 1 – W5.....	93
Figuur 85: registratie drukverschil 2 - W5	93
Figuur 86: vergelijking V_4 -waarde W5.....	94
Figuur 87: vergelijking n_4 -waarde W5.....	94
Figuur 88: Pulsemetingen W6.....	96
Figuur 89: Pulsemetingen - W7.....	98
Figuur 90: afdichting ventilatie W8	99
Figuur 91: meetopstelling W8 - BD	99
Figuur 92: samenvatting n_{50} -waarde testwoningen	100
Figuur 93: Pulsemetingen W8.....	101
Figuur 94: Pulsemetingen locatie 1 & 2 - W8.....	102
Figuur 95: Pulsemetingen per locatie - W8.....	102
Figuur 96: registratie drukverschil 1 - W8	103
Figuur 97: registratie drukverschil 2 - W8	103
Figuur 98: vergelijking V_4 -waarde W8.....	104
Figuur 99: vergelijking n_4 -waarde W8.....	104
Figuur 100: samenvatting meetresultaten.....	105
Figuur 101: samenvatting positie Pulse (1).....	106
Figuur 102: samenvatting positie Pulse (2).....	106
Figuur 103: samenvatting positie Pulse (3).....	107

Lijst van tabellen

Tabel 1: huidige EPB-eisen – bron: energiesparen.be	3
Tabel 2: volumes en oppervlaktes W1	37
Tabel 3: volumes en oppervlaktes W2	38
Tabel 4: volumes en oppervlaktes W3	39
Tabel 5: volumes en oppervlaktes W4	40
Tabel 6: volumes en oppervlaktes W5	41
Tabel 7: volumes en oppervlaktes W6	42
Tabel 8: volumes en oppervlaktes W7	43
Tabel 9: volumes en oppervlaktes W8	44
Tabel 10: meetresultaten W1 - BD – OO - volledige woning.....	48
Tabel 11: meetresultaten W1 - BD – O - volledige woning.....	49
Tabel 12: meetresultaten W1 - BD – OO – volume 2	49
Tabel 13: meetresultaten W1 - BD - O – volume 2.....	50
Tabel 14: meetresultaten W1 - BD – OO – volume 3	50
Tabel 15: meetresultaten W1 - BD – OO – volume 1	51
Tabel 16: meetresultaten W1 - BD – O – volume 1	52
Tabel 17: meetresultaten W2 – BD – OO – volledige woning.....	63
Tabel 18: meetresultaten W2 - BD - O - volledige woning.....	64
Tabel 19: meetresultaten W2 - BD - OO - zonder garage.....	64
Tabel 20: meetresultaten W2 - BD - O - zonder garage.....	65
Tabel 21: meetresultaten W3 - BD - OO - volledige woning.....	75
Tabel 22: meetresultaten W3 - BD - O - volledige woning.....	76
Tabel 23: meetresultaten W4 - BD - O.....	83
Tabel 24: meetresultaten W5 - BD - OO.....	90
Tabel 25: meetresultaten W5 - BD - O.....	90
Tabel 26: meetresultaten W5 - P	92
Tabel 27: meetresultaten W6 - BD - OO.....	95

Tabel 28: meetresultaten W6 - BD - O.....	95
Tabel 29: meetresultaten W7 - BD - OO.....	97
Tabel 30: meetresultaten W7 - BD - O.....	97
Tabel 31: meetresultaten W8 - BD - OO.....	99
Tabel 32: meetresultaten W8 - BD - O.....	100

Lijst met symbolen

A	= oppervlakte van de opening	[m ²]
A_E	= oppervlakte gebouwschil	[m ²]
A_F	= netto vloeroppervlakte	[m ²]
A_t	= testoppervlakte	[m ²]
C	= klimaatafhankelijke factor	[-]
C_d	= weerstandsgetal van de opening	[-]
C_{env}	= stromingscoëfficiënt	[m ³ /(h.Pa ⁿ)]
C_L	= genormeerde stromingscoëfficiënt	[m ³ /(h.Pa ⁿ)]
C_p	= winddrukcoëfficiënt	[-]
ELA_{pr}	= effectief luchtlekoppervlak	[m ²]
$ELA_{E\Delta p}$	= effectief luchtlekoppervlak t.o.v. oppervlakte gebouwschil	[-]
$ELA_{F\Delta p}$	= effectief luchtlekoppervlak t.o.v. netto vloeroppervlakte	[-]
H	= correctiefactor gebouwhoogte	[-]
h	= gebouwhoogte	[m]
n	= stromingsexponent	[-]
L	= correctiefactor grootte luchtlekken	[-]
n_{inf}	= seizoensgemiddeld infiltratievoud	[1/h]
$n_{\Delta p}$	= infiltratievoud bij drukverschil p	[1/h]
n_{50}	= infiltratievoud bij 50Pa	[1/h]
p_{bar}	= barometrische luchtdruk	[Pa]
p_v	= partiële waterdampdruk	[Pa]

p_{vs}	= saturatiedampdruk	[Pa]
p_w	= winddruk op een vlak	[Pa]
Δp	= drukverschil (over opening)	[Pa]
Δp_o	= gemiddelde waarde van het natuurlijk drukverschil	[Pa]
$q_{\Delta p}$	= luchtdoorlatendheid bij drukverschil p	[m ³ /(h.m ²)]
Q	= luchtdebiet doorheen opening	[m ³ /h]
Q_{50}	= luchtlekdebiet bij 50 Pa	[m ³ /h]
S	= correctiefactor beschutting	[-]
v	= windsnelheid	[m/s]
$v_{\Delta p}$	= luchtdoorlatendheid bij drukverschil p	[m ³ /(h.m ²)]
$\dot{v}_{50}$	= luchtdoorlatendheid bij 50 Pa	[m ³ /(h.m ²)]
V	= (binnen)volume	[m ³]
$\dot{V}_{50}$	= luchtlekdebiet bij 50Pa	[m ³ /h]
$\dot{V}_{\Delta p}$	= luchtlekdebiet bij drukverschil p	[m ³ /h]
$\dot{V}_{env}$	= lekdebiet door de gebouwschil	[m ³ /h]
$w_{\Delta p}$	= luchtlekdebiet per eenheid van vloeroppervlakte	[m ³ /(h.m ²)]
ρ	= massadichtheid lucht	[kg/m ³]
ρ_e	= massadichtheid van de buitenlucht	[kg/m ³]
ρ_i	= massadichtheid van de binnenlucht	[kg/m ³]
ρ_o	= massadichtheid lucht bij normomstandigheden	[kg/m ³]
ϕ	= relatieve luchtvochtigheid	[%]
Φ_{inf}	= warmteverlies door infiltratie	[W]

θ = temperatuur [°C]

θ_i = binnentemperatuur [K]

θ_e = buitentemperatuur [K]

$\Delta\theta$ = temperatuurverschil binnen $\Leftrightarrow$ buiten [K]

1. Inleiding

In het eerste deel van deze scriptie wordt een inleiding gegeven tot het begrip luchtdichtheid. Het algemene kader wordt geschetst, met aansluitend het belang van luchtdicht bouwen. Ook veelgebruikte termen en definities worden toegelicht. De eigenschappen van een luchtdicht gebouw worden bekeken, evenals de gevolgen van het niet-luchtdicht bouwen. Verder worden de meest gebruikte grootheden voor het uitdrukken van de luchtdichtheid verklaard en uitgewerkt in formulevorm.

Na de inleiding volgt een uitgebreide uitleg over het testen van de luchtdichtheid. Hierbij worden de pressurisatietest en de nieuwe Pulsetest behandeld. Zowel het principe als de theoretische achtergrond worden uit de doeken gedaan. Dit gedeelte wordt verder aangevuld met een aantal gekende ‘problemen’ uit de literatuur. Daarnaast wordt ook gedetailleerde uitleg gegeven over het uitvoeren van luchtdichtheidsmetingen volgens de norm, met inbegrip van de achterliggende rekenmethode voor de Blowerdoormetingen.

De derde fase van dit werk bestaat erin om de alom vertegenwoordigde blowerdoortest te vergelijken met de nieuwe Pulse methode. Aan de hand van de hiaten in de bestaande literatuur wordt een meetconcept opgesteld voor veldtesten. Bij deze testen worden een aantal gebouwen, met een brede range aan luchtdichtheidsresultaten, getest met beide meetmethodes (Pulse en Blowerdoor). Extra informatie over de testwoningen is er ook terug te vinden.

Tot slot worden alle meetresultaten geanalyseerd en met elkaar vergeleken. Om op die manier tot een besluit te komen.

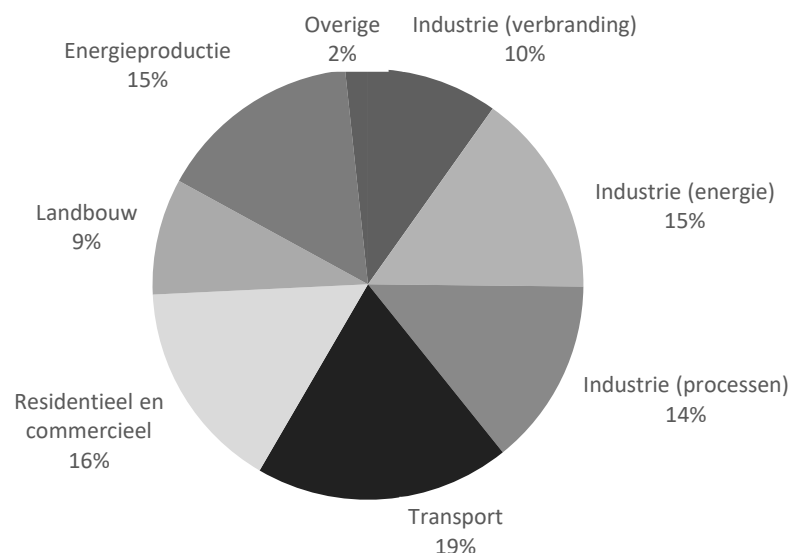
2. Luchtdichtheid van gebouwen

Dit hoofdstuk dient ertoe om de beweegreden achter luchtdicht bouwen uit de doeken te doen. Op die manier wordt een beter inzicht verkregen over luchtdichtheid binnen het kader van energiebesparing in de bouwwereld.

2.1 Kadering

Het hele concept van energie in de bouw start vanuit het Kyoto-protocol, en dus het beperken van de uitstoot van broeikasgassen om de klimaatsverandering tegen te gaan/te beperken. Het Verdrag van Kyoto (1997) is één van de belangrijkste internationale rechtsinstrumenten om klimaatverandering te bestrijden. Het bevat de verbintenis van de industrielanden om hun uitstoot van bepaalde broeikasgassen te verminderen. De lidstaten van de Europese Unie (en IJsland) verbinden zich ertoe om tijdens de tweede verbintenisperiode (2013–2020) hun totale broeikasgasemissies met 20% te verminderen ten opzichte van het niveau van 1990 (European Commission, 2017).

Naast landbouw, industrie en transport hebben ook residentiële en commerciële gebouwen een bijdrage aan het CO₂-equivalent. In België wordt 16% van de totale uitstoot gerelateerd aan gebouwen (zie Figuur 1). De voornaamste oorzaak hiervan is de verbranding van fossiele brandstoffen om aan de warmtevraag voor woningen en kantoren te voldoen. Zo wordt 63% tot 70% van de energie in Vlaamse huishoudens gebruikt voor verwarming (Vlaamse Milieumaatschappij, 2009).



Figuur 1: uitstoot per sector (België 2015) - bron: klimaat.be, milieurapport.be

Om de uitstoot van broeikasgassen van gebouwen te verminderen, werd op Europees niveau de 'EPBD' richtlijn ingevoerd. EPBD staat voor Energy Performance of Buildings Directive en betreft de energieprestaties van gebouwen. Elke EU-lidstaat dient deze richtlijn om te zetten in een eigen wetgeving, en geeft dus een zekere mate van vrijheid.

Deze Europese richtlijn telt echter wel vijf verplichtingen:

- Methode om energieprestaties van gebouwen te berekenen;
- Minimumeisen voor energieprestaties;
- Energieprestatiecertificaten bij verkoop en verhuur;
- Regelmatige keuring van systemen voor centrale verwarming;
- Keuring door gekwalificeerde personen.

België voerde hierop de EPB-eisen (energieprestatie en binnenklimaat) in om het energieverbruik te beperken en het comfort binnen gebouwen te optimaliseren. De richtlijn is een gewestelijke bevoegdheid, dus zijn er drie verschillende wetgevingen gangbaar (Vlaams gewest, Waals gewest en Brussels hoofdstedelijk gewest). Ieder bouwproject moet voldoen aan de opgelegde eisen.

2.1.1 EPB-eisen

Afhankelijk van het type of de functie/bestemming van een gebouw en de datum van de bouwvergunning zijn er specifieke eisen opgelegd. Deze eisen worden sinds de invoer van de energieprestaties iedere jaar verstrengd, tot een bepaald niveau bereikt wordt. De indeling in verschillende types gebouwen wordt gemaakt tussen wonen, niet-residentieel (kantoren, ...) en industrie. De eisen zijn verder ook afhankelijk van de aard van de werken. Er wordt onderscheid gemaakt tussen nieuwbouw, renovatie en een ingrijpende energetische renovatie (IER). Een renovatie is een IER wanneer de technische installaties worden vervangen, en wanneer minstens 75% van de bestaande en nieuwe buitenschil geïsoleerd wordt. In de huidige eisen dient ook een minimaal aandeel in hernieuwbare energie voorzien te worden.

Tabel 1: huidige EPB-eisen – bron: energiesparen.be

Voor bouwprojecten met stedenbouwkundige vergunningsaanvraag of melding vanaf 1 januari 2018

EPB-eisen (eisen op het vlak van ENERGIEPRESTATIE en BINNENKLIMAAT)		BESTEMMING		
AARD VAN HET WERK		wonen	niet-residentieel	industrie
nieuwbouw (of gelijkwaardig)	thermische isolatie	maximaal S 31 (wooneenheid) en maximale U-waarden	maximale U-waarden	maximaal K 40 (gebouw) en maximale U-waarden
	energieprestatie	maximaal E 40 (wooneenheid)	maximaal E-peil* (in functie van de bestemmingen)	-
	binnenklimaat	minimale ventilatievoorzieningen en beperken van risico op oververhitting (wooneenheid)	minimale ventilatievoorzieningen	minimale ventilatievoorzieningen
	hernieuwbare energie	≥ 15 kwh/m2.jaar	≥ 15 kwh/m².jaar	
	installaties	-	-	minimale installatie-eisen
ingrijpende energetische renovatie	thermische isolatie	maximale U-waarden (voor nieuwe en na-geïsoleerde delen)		-
	energieprestatie	maximaal E 90 (wooneenheid)	maximaal E-peil (in functie van de bestemmingen)	volg de eisen bij renovatie
	installaties	-	-	
	binnenklimaat	minimale ventilatievoorzieningen		
	hernieuwbare energie	≥ 15 kwh/m².jaar	≥ 15 kwh/m².jaar	-
renovatie	thermische isolatie	maximale U-waarden (voor nieuwe en na-geïsoleerde delen)		
	energieprestatie	-		
	installaties	minimale eisen (voor nieuwe, vernieuwde of vervangen installaties)		
	binnenklimaat	minimale ventilatievoorzieningen (voor bestaande ruimten bij vervanging van vensters en voor nieuwe ruimten)		ventilatie-eisen (voor het nieuw gebouwde toegevoegde deel)

De eisen hebben betrekking op de maximale warmtedoorgangscoefficienten, het S-peil, het E-peil, de oververhittingsindicator, ventilatie en hernieuwbare energie. Indien bepaalde eisen niet gehaald worden, wordt een boete opgelegd.

Vanaf 2021 is het doel om van alle nieuwbouwwoningen die gebouwd worden een BEN-woning te maken. BEN staat voor Bijna Energie Neutraal. Het principe van bijna-energieneutraal is dat woningen zo weinig mogelijk energie verbruiken voor ventilatie, (sanitair) warm water, koeling en verwarming. De resterende energie die hiervoor nog nodig is, wordt uit groene energiebronnen (= hernieuwbare energie) gehaald.

2.2 Luchtdichtheid

Het luchtdicht bouwen van gebouwen komt neer op het beperken van luchtlekken, zowel van buiten uit (infiltratie) als van binnen uit (exfiltratie) om op die manier warmteverliezen te beperken. Deze luchtlekken ontstaan door drukverschillen tussen de binnen- en buitenomgeving.

Die drukverschillen kunnen op verschillende manieren veroorzaakt worden. Ten eerste door temperatuurverschillen. Een tweede drijvende kracht is de wind.

2.2.1 Termen en definities

Om het concept van luchtdichtheid beter te begrijpen, dienen eerst een aantal vaak gebruikte termen uitgelegd te worden. Onderstaande termen kunnen in volgende hoofdstukken aan bod komen.

Beschermd volume

Het beschermd volume omvat het verwarmd (en onrechtstreeks verwarmd) volume van de binnenomgeving van een gebouw, afgebakend door middel van een thermische isolatielaag.

Het beschermd volume is onder meer van belang om een in latere fase bepaalde grootheden te berekenen. Het volume wordt bepaald aan de hand van het Transmissiereferentiedocument. Deze term wordt vooral gebruikt in eigen land, in het kader van de EPB-eisen. Het beschermd volume wordt bepaald aan de hand van de buitenafmetingen.

Gemeten volume

Het gemeten volume bij een luchtdichtheidsmeting hoeft niet noodzakelijk het beschermd volume te omvatten. Het gemeten volume is dan het volume gevormd door alle lokalen waarvan de luchtdichtheid gemeten wordt. Ruimtes afsluiten van het gemeten volume kan bijvoorbeeld door deuren te sluiten.

Gebouwschil

De gebouwschil omvat alle gevels, openingen, vloeren en daken (van het beschermd volume) die in contact zijn met de niet-verwarmde omgeving (buitenomgeving, grond, eventuele kelder en aangrenzende onverwarmde ruimte).

Testoppervlakte

Het testoppervlak is de oppervlakte van het beschermd volume. Deze term wordt gebruikt voor het bepalen van de luchtdoorlatendheid in het kader van de EPB-eisen. Belangrijk hierbij te vermelden is dat gemene muren niet bij het testoppervlak gerekend worden.

Overdrukmeting

Bij een overdrukmeting wordt de druk binnen het gebouw (of het te meten volume) opgedreven zodat binnen een hogere druk bekomen wordt ten opzichte van het referentiepunt buiten. Door het gecreëerde drukverschil tussen binnen en buiten ontstaat er een luchtstroom doorheen de luchtlekken van binnen naar buiten toe.

Onderdrukmeting

Een onderdrukmeting is het tegenovergestelde van een overdrukmeting. In dit geval wordt de lucht uit het gebouw 'gezogen' om een lagere druk te creëren ten opzichte van de buitenomgeving. Op die manier ontstaan luchtstromen van buiten naar binnen.

Bewust gemaakte opening

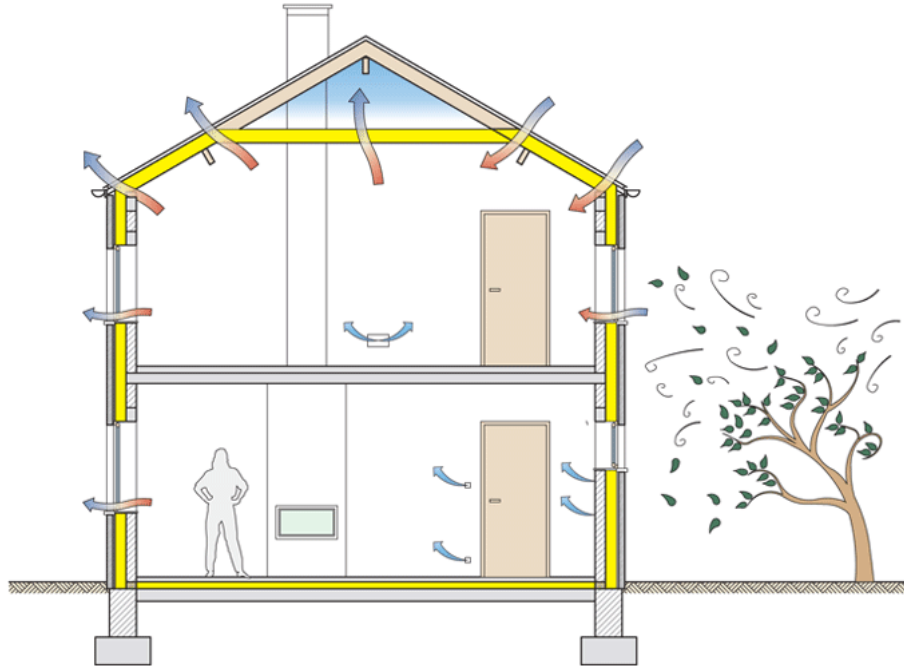
Bewust gemaakte openingen zijn openingen in de gebouwschil of de schil van het te meten volume die met een specifiek doel gemaakt zijn. Voorbeelden hiervan zijn ramen, deuren, ventilatieroosters, brievenbussen, kattenluiken, ...

Luchtlekken

Een luchtlek is een (kleine) opening in de gebouwschil. Deze openingen zijn niet bewust gemaakt en dienen vermeden te worden. Doorheen deze luchtlekken ontstaan, door het drukverschil, ongecontroleerde (warmte)verliezen. Het doel van een luchtdichtheidsmeting is om deze luchtlekken te begroten.

2.2.2 Luchtlekken

Luchtlekken komen over het algemeen voor, daar waar verschillende onderdelen van een gebouw samenkomen. Er dient voldoende aandacht besteed te worden aan de aansluitingen om een zo goed mogelijke luchtdichtheid te verwerven. Door het verschil in luchtdruk tussen de binnen- en buitenomgeving ontstaat een luchtstroom doorheen onvoorziene openingen. Het verschil in luchtdruk wordt veroorzaakt door een verschil in temperatuur en door de wind.



Figuur 2: infiltratie en exfiltratie in een woning - bron: wtcb.be

De belangrijkste factor die drukverschillen omheen lage gebouwen creëert is de wind. De winddruk op een vlak kan bepaald worden aan de hand van de formule:

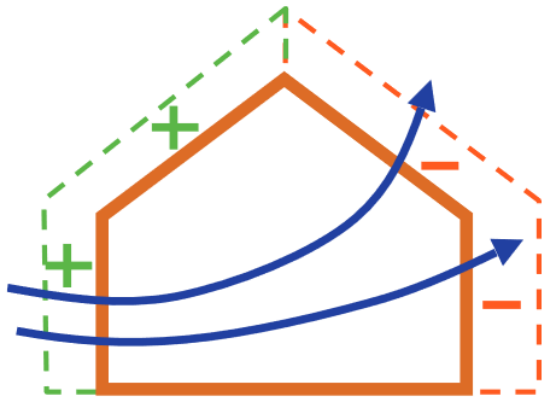
$$p_w = C_p \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \text{ [Pa]}$$

met

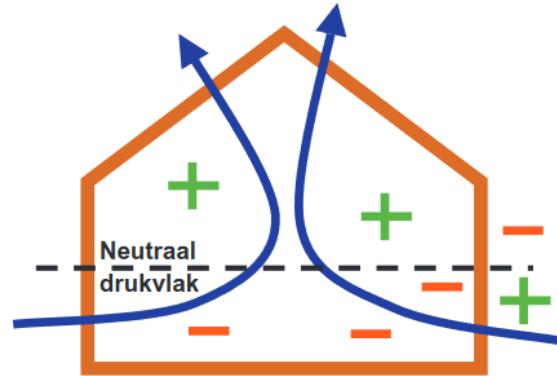
p_w	=	winddruk	[Pa]
C_p	=	winddrukcoëfficiënt	[-]
ρ	=	massadichtheid lucht	[kg/m ³]
v	=	windsnelheid	[m/s]

Zoals te zien in de vergelijking staat de winddruk in rechtstreeks verband met de windsnelheid. De winddrukcoëfficiënt houdt verband met de manier waarop de wind aangrijpt, de geometrie van het gebouw en het gebouwelement (gevel, dak). Deze waarden zijn terug te vinden in tabellen (norm NBN EN 1991-1-4) (Belgisch instituut voor normalisatie (BIN), 2005). Uiteraard heeft ook de rechtstreekse omgeving invloed op deze waarden.

De windbelasting zal aan de loefzijde (loodrecht op windrichting) een positieve druk creëren, terwijl aan de lijfzijde een negatieve druk ontstaat. Op die manier vormt zich een over- en onderdruk zodat een luchtstroom ontstaat doorheen de woning via de luchtlekken.



Figuur 3: drukverschil door wind – bron: wtcb.be



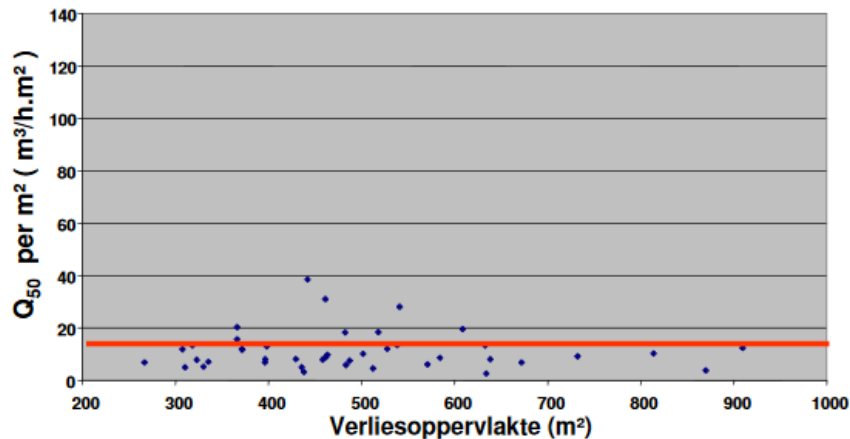
Figuur 4: thermische trek – bron: wtcb.be

Het drukverschil veroorzaakt door een verschil in temperatuur is ook gekend als het schoorsteeneffect. Bij ruimtes die verwarmd worden, stijgt de warme lucht. Daardoor ontstaat bovenaan het gebouw een overdruk, terwijl er onderaan een onderdruk ontstaat. Op die manier wordt opnieuw een luchtstroom gecreëerd doorheen het gebouw. Wanneer de buitentemperatuur hoger is dan de binnentemperatuur werkt het schoorsteeneffect net omgekeerd. Dit verschijnsel is vooral van toepassing bij hogere gebouwen. Het drukverschil kan begroot worden door de Wet van Pascal.

2.2.3 Luchtdichtheid binnen de EPB-eisen

Zoals eerder vermeld is het doel van het volledige energieconcept in hoofdzaak het energieverlies van gebouwen te beperken. Hiertoe draagt ook de luchtdichtheid bij. Het zo luchtdicht mogelijk bouwen van een gebouw levert een aantal S-peil (vroeger E-peil) punten winst op. Veel luchtdichtheidstesten worden dan ook in het kader van deze eisen uitgevoerd. De meting dient wel te gebeuren door een erkende verslaggever. Het verlagen van het S-peil na meting heeft als reden dat nieuwbouwwoningen zo goed als altijd beter scoren dan de waarde bij ontstentenis van het lekdebiët Q_{50} per m^2 ($=12,0 m^3/(h.m^2)$).

Deze waarde bij ontstentenis van $12 m^3/h.m^2$ is gebaseerd op onderzoek van het WTCB in samenwerking met het departement Architectuur van de LUCA School of Arts. Dit is de zogenaamde SENVINVV studie. Er werden tussen 1995 en 1997 200 woningen onderzocht die gebouwd werden tussen 1987 en 1993. Het doel was om een globaal beeld te krijgen van (toen) nieuwbouwwoningen op gebied van energie en binnenklimaat in Vlaanderen. Hier werd het aspect luchtdichtheid onderzocht bij 51 van de 200 woningen, waarvan 9 appartementen, 6 gesloten bebouwingen, 9 halfopen bebouwingen en 27 vrijstaande gebouwen. De luchtdichtheid werd getest aan de hand van een pressurisatietest.



Figuur 5: lekdebiet bij 50Pa per eenheid oppervlakte ($=Q_{50}$) (SENVIVV-studie)

Bovenstaande afbeelding toont de grafiek waarop de waarde bij ontstentenis is gebaseerd. Uit de metingen blijkt dat ongeveer 20% van de geteste woningen de grootteorde van $15,0 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ overstijgt. Er werd dan beslist om de waarde vast te leggen op $12,0 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$. Deze waarde is op zich vrij hoog, maar zoals uit de studie blijkt niet de meest ongunstige (WTCB & WenK, 1998; Wouters e.a., 2012).

Recenter onderzoek heeft aangetoond dat er een aantal kanttekeningen kunnen gemaakt worden bij deze studie. Zo werden de metingen niet uitgevoerd volgens de norm NBN EN 13829. En werden de luchtdichtheidsmetingen enkel uitgevoerd in overdruk. De norm schrijft echter voor dat de meetresultaten van de Blowerdoortest voortkomen uit het gemiddelde van een onderdruk- en overdruktest. Daarnaast werd geen rekening gehouden met correctiefactoren, bij een aantal woningen werden de ventilatioorosters niet verzegeld, en zo zijn nog een aantal opmerkingen te maken (Van Den Bossche, 2005). Hier kan wel de bemerking gemaakt worden dat de norm waarop Van den Bossche zich baseert een aantal jaar later dan de datum van uitvoering van de SENVIVV-studie geschreven werd.

In 2006 werd een nieuw onderzoek van de Universiteit Gent uitgevoerd naar luchtdichtheid en binnenluchtkwaliteit bij 50 woningen. Uit die studie blijkt dat het gemiddelde lekdebiet bij 50 Pa per eenheid van oppervlak $6,0 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ bedraagt. Dit is een groot verschil in vergelijking met de SENVIVV-studie. Ook de n_{50} -waarden verschillen duidelijk ($12,4 \text{ h}^{-1}$ t.o.v. $6,0 \text{ h}^{-1}$). Uit de studie kan besloten worden dat de waarde bij ontstentenis van $12,0 \text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$ aan de hoge kant is. Huidige nieuwbouwwoningen zullen zo goed als in alle gevallen beter score dan de waarde bij ontstentenis (De Brauwere & Van de Velde, 2010). Wanneer bepaalde eisen (S-peil) niet gehaald worden, kan het aangeraden zijn om een luchtdichtheidstest uit te voeren. Tot op heden is het uitvoeren de luchtdichtheidstest geen verplichting. Enkel voor het behalen van certificaat passiefhuis dient een maximale luchtdichtheid gehaald te worden. In bepaalde Europese landen is het reeds verplicht om bij alle nieuwbouwwoningen een luchtdichtheidstest uit te voeren.

2.3 Luchtdicht bouwen

Het luchtdicht bouwen van een woning kan bekomen worden door voldoende aandacht te besteden aan bouwdetails. Muur- en vloer/dakaansluitingen, buitenschrijnwerk, stopcontacten en dergelijke zijn plaatsen waar vaak luchtlekken gedetecteerd worden (Kalamees, 2007; Van Den Bossche, 2005). Vooral de muuropeningen (buitenschrijnwerk) zorgen vaak voor problemen. Ook het type van constructie heeft invloed op de luchtdichtheid. Bij een houtskeletbouw zal reeds van in de ontwerpfase rekening gehouden moeten worden met het luchtdicht uitvoeren. Terwijl bij de klassieke bouwmethode (met metselwerk) over het algemeen een vrij goede luchtdichtheid bekomen wordt door de middel van de pleisterlaag. Verder zijn ook stopcontacten, doorvoeren van technische leidingen en dergelijke gevoelig voor luchtlekken.

Er zijn verschillende manieren om tot een betere luchtdichte constructie te komen, als er voldoende aandacht aan besteed wordt. Zo heeft bijvoorbeeld het plaatsen van de isolatie in de buitenwand in twee geschrante lagen invloed op de luchtdichtheid. In hoofdzaak is de regel om een luchtscherm aan te brengen. De keuze van de correcte materialen voor dit luchtscherm is van groot belang. Het luchtscherm kan bestaan uit: een pleisterlaag, folies, houtplaten, ter plaatse gestorte beton en bepaalde geïndustrialiseerde bouwsystemen. Om een goede luchtdichtheid te garanderen, dienen alle voegen en doorboringen afgedicht te worden. Het is ook aangeraden om de doorboringen doorheen het luchtscherm te beperken. Dit is echter niet altijd mogelijk.

2.3.1 Belang luchtdicht bouwen

Binnen het kader van het zo energiebesparend/energiezuinig mogelijk bouwen is de luchtdichtheid van aanzienlijk belang. Naast het gebruik van moderne technische installaties (verwarming, hernieuwbare energie, ventilatie) dienen gebouwen voldoende geïsoleerd te worden. Wanneer echter geen aandacht besteed wordt aan de luchtdichtheid, zal het effect van de daarnet vernoemde maatregelen beperkt of zelfs tenietgedaan worden.

2.3.2 Gevolgen beperkte luchtdichtheid

Het niet-luchtdicht maken van de gebouwschil heeft verschillende gevolgen. Een eerste gevolg is het stijgende energieverbruik. Terwijl het energieverbruik net zo beperkt mogelijk dient gehouden te worden door de Europese EPBD richtlijn. Omwille van onvoorziene openingen (luchtlekken) in de gebouwschil zal langs die weg ongecontroleerd warmte ontsnappen, wat tot een hoger verbruik van de verwarmingsinstallatie resulteert. Ook het ventilatiesysteem zal hinder ondervinden van het ongecontroleerd ontsnappen van lucht. Zo zullen de beoogde ventilatiedebieten bijvoorbeeld verstoord worden. Het niet efficiënt gebruik van het ventilatiesysteem zal opnieuw tot een stijgend energieverbruik leiden.

Het ongecontroleerd verlies van warmte en de verstoorde werking van het ventilatiesysteem kan tot klachten in verband met het binnencomfort leiden. Deze klachten gaan van thermisch en akoestisch comfort (tocht, lawaaihinder), tot verminderde kwaliteit van de lucht (geur, te veel vocht, CO₂, ...).

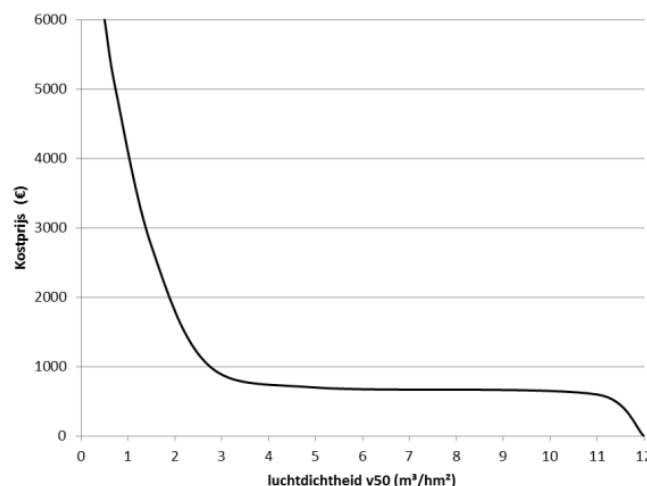
Naast het hoger verbruik en de invloed op het binnencomfort kan het niet luchtdicht bouwen ook gevolgen hebben voor de constructie zelf. Niet zozeer op vlak van stabiliteit, maar wel op de goede werking van de isolatielaag en bijgevolg ook op de inwendige condensatie (Janssens & Hens, 2003). Deze condensatie kan over een langdurige periode grote gevolgen hebben voor zowel het gebouw, als voor de bewoners. Aanhoudende condensatie in combinatie met warmte kweekt schimmels, welke de constructie kunnen aantasten, en nefaste gevolgen kunnen hebben voor de gezondheid (WHO Regional Office for Europe, 2009).

Er kan bijgevolg besloten worden dat de luchtdichtheid, samen met de thermische isolatie en de hygiënische ventilatie, een belangrijk onderdeel is in de globale strategie om een gebouw energiezuinig, comfortabel en gezond te maken.

2.3.3 Kostenoptimum

Zoals eerder vermeld is voor het optimaliseren van de luchtdichtheid in een gebouw de nodige aandacht vereist. Zowel het gebruik van de correcte materialen als een kwaliteitsvolle uitvoering kan extra kosten met zich meebrengen. Zoals bij de meeste zaken het geval is, dient ook hier de balansoefening gemaakt te worden tussen een perfect luchtdicht gebouw en de kostprijs die het met zich meedraagt.

Uit een onderzoek naar de kosten optimale niveaus inzake de EPB-eisen van nieuwe residentiële gebouwen werd volgend resultaat bekomen op gebied van luchtdichtheid (zie Figuur 6). Vanaf een $\dot{v}_{50}$ -waarde lager dan 3 m³/(h.m²) stijgen de kosten exponentieel.



Figuur 6: kostenoptimum luchtdichtheid

Deze studie maakte een gefundeerde inschatting van de kosten. De onderzoekers maakten de opmerking dat meer wetenschappelijk onderzoek naar dit onderwerp gewenst is, om met grotere zekerheid het kostenoptimum te kunnen bepalen (Van der Veken, Creylman, & Lenaerts, 2013). Verder opzoekingswerk naar dit onderwerp leverde geen resultaten op. De meeste onderzoeken richten zich op de optimale kosten om tot een bijna energieneutraal gebouw te komen.

2.3.4 Invloed van tijd

Uit onderzoek is gebleken dat na verloop van tijd de luchtdichtheid van gebouwen afneemt. Dit onderzoek werd uitgevoerd bij gebouwen waar geen wijzigen aan de gebouwschil gebeurden. Wanneer hieraan immers wijzigen gebeuren, kan onmogelijk nog eenzelfde luchtdichtheidsscore behaald worden. Uit het onderzoek blijkt de n_{50} -waarde 25% (mediaan) gestegen te zijn over een periode van ongeveer 1,5 jaar (Bracke, Laverge, Van Den Bossche, & Janssens, 2013). Het is bijgevolg niet zo dat een luchtdichte woning plots zeer slecht scoort op het gebied van luchtdichtheid. In andere onderzoeken wordt onder meer een toename van de n_{50} -waarde van 30% over een periode van 5 jaar bekomen (Reiß & Erhorn, 2003). Het feit dat de luchtdichtheid afneemt na verloop van tijd is een extra bevestiging dat in er de werffase reeds voldoende aandacht besteed dient te worden aan de luchtdichtheid, om op die manier extra garantie te bieden voor een goede werking van onder meer de isolatie en het ventilatiesysteem te garanderen, ook op lange termijn.

3. Luchtdichtheidstesten

De luchtdichtheid van een gebouw kan op verschillende manieren getest worden. De meest toegepaste manier is de pressurisatietest, beter gekend als de Blowerdoortest. Wanneer de luchtdichtheidstest gebeurt in het kader van de EPB-eisen, is het verplicht de test uit te voeren met de Blowerdoor.

Bij een andere methode wordt gas gebruikt om de luchtverliezen te bepalen, deze test wordt de Tracer gas methode genoemd. Hierbij wordt een bepaald gas, zogenaamd indicatorgas, (vooral helium—en waterstofgas) in de ruimte verspreid. Door de concentraties op verschillende plaatsen op te meten kan de beweging van het gas gevolgd worden, en zo de luchtstroom bepaald worden. Een voordeel van deze methode is dat het gebeurt onder natuurlijke omstandigheden, wat langs de andere kant ook een nadeel kan zijn. Zo zullen de weersomstandigheden een grote invloed hebben op de resultaten. Op die manier is het ook moeilijk om verschillende gebouwen onderling met elkaar te vergelijken (Ghazi & Marshall, 2014).

Daarnaast bestaan nog technieken die enkel de luchtlekken detecteren. Hieronder vallen onder meer rookstaven en de infraroodcamera. Vaak worden deze technieken gebruikt in combinatie met een aantal van de bovenstaande methodes.

Sinds kort is een nieuwe techniek ontwikkeld voor het meten van de luchtverliezen van gebouwen. De zogenaamde Pulse methode. Het doel van deze masterproef is om deze nieuwe methode te vergelijken met de klassieke Blowerdoortest. Hiervoor is de nodige achtergrondkennis van beide testen vereist. In de volgende hoofdstukken worden eerst de grootheden die vaak gebruikt worden toegelicht, en wordt er dieper ingegaan op de achtergrond en het werkingsprincipe van beide testen.

3.1 Grootheden

Er zijn verschillende mogelijkheden om de luchtdichtheid van een woning uit te drukken. De meest gebruikte eenheden in België zijn het luchtlekdebiet of de $\dot{V}_{\Delta p}$ -waarde [m^3/h], de n_{50} -waarde [$1/\text{h}$] en de $\dot{v}_{50}$ -waarde [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$]. Zowel de $n_{\Delta p}$ -waarde als alle andere eenheden worden berekend aan de hand van een luchtlekdebiet bij een bepaald drukverschil ($\dot{V}_{\Delta p}$), meestal is dat 50 Pa. De $\dot{V}_{\Delta p}$ -waarde vertelt hoeveel kubieke meter lucht per uur de woning verlaat. Dit is de waarde die rechtstreeks gemeten wordt door de Blowerdoorproef, of door een andere test. Door het gebruiken van deze eenheden kunnen verschillende gebouwen met elkaar vergeleken worden.

De waarden die gebruikt worden om de luchtdichtheid uit te drukken worden over het algemeen gemeten bij een drukverschil van 50 Pa. Het drukverschil (Δp) bedraagt 50 Pa om bepaalde invloeden, zoals de invloed van wind en temperatuur, uit te kunnen sluiten zodat deze de resultaten niet kunnen beïnvloeden.

3.1.1 Luchtlekdebiet per eenheid van volume ($n_{\Delta p}$)

De $n_{\Delta p}$ -waarde is ook gekend als het ventilatievoud of infiltratievoud. Het drukt het aantal volumewisselingen uit per eenheid van tijd (uur):

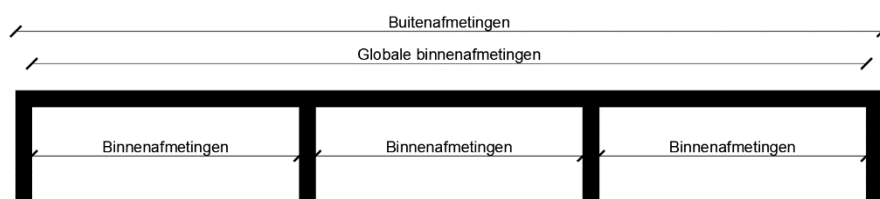
$$n_{\Delta p} = \frac{\dot{V}_{\Delta p}}{V} \text{ [1/h of ACH]}$$

Met

$n_{\Delta p}$	=	ventilatievoud	[1/h]
$\dot{V}_{\Delta p}$	=	gemeten luchtlekdebiet bij Δp	[m^3/h]
V	=	binnenvolume	[m^3]

Met andere woorden is het ventilatievoud het aantal keer dat de lucht in het gebouw per uur ververst wordt (over het algemeen bij een drukverschil van 50 Pa). De eenheid ACH (air change per hour) wordt in de buurlanden (en de literatuur) vaak gebruikt. Om de luchtdichtheid van een gebouw uit te drukken is de $n_{\Delta p}$ -waarde een vaak gebruikte eenheid in het buitenland.

Het binnenvolume wordt berekend aan de hand van de globale binnenaftmetingen (zie Figuur 7). Dit is in feite het beschermd volume, met aftrek van het volume van de constructiedelen in contact met de buitenomgeving. Het volume van binnenmuren en -vloeren mag niet in vermindering worden gebracht.



Figuur 7: schets bepaling volumes

3.1.2 Luchtdoorlatendheid ($q_{\Delta p}$)

De luchtdoorlatendheid beschrijft het luchtlekdebiet ten opzichte van de oppervlakte van de gebouwschil:

$$q_{\Delta p} = \frac{\dot{V}_{\Delta p}}{A_E} \text{ [m}^3\text{/(h.m}^2\text{)]}$$

Met

$q_{\Delta p}$	=	luchtdoorlatendheid	[m ³ /(h.m ²)]
$\dot{V}_{\Delta p}$	=	gemeten luchtlekdebiet bij Δp	[m ³ /h]
A_E	=	oppervlakte gebouwschil	[m ²]

De luchtdoorlatendheid vertelt in feite hoe luchtdicht de gebouwschil is. Voor bepaalde constructiedelen en materialen bestaan normen aangaande de luchtdoorlatendheid. Zo omschrijft de norm NBN EN 1026 aan welke eisen buitenschrijnwerk moet voldoen.

De oppervlakte van de gebouwschil is het oppervlak van het binnenvolume (zie vorige paragraaf). Het is de som van alle muren, daken, vloeren in contact met de buitenomgeving, de grond en een aangrenzende (on)verwarmde ruimte. Ook de gemene muur tussen verschillende wooneenheden wordt hier meegeteld. Voor appartementen worden de vloer en het plafond in dat geval ook meegerekend.

3.1.3 Specifiek luchtlekdebiet (EPB-eisen)

Het specifiek luchtlekdebiet ($\dot{v}_{50}$ -waarde) is de waarde die gebruikt wordt bij de berekening van de S-peileis in het kader van de Energieprestatieregelgeving. Dit is het lekdebiet (V_{50}) bij een drukverschil van 50 Pa per eenheid van het testoppervlak van de gebouwschil (A_t). Deze grootte komt niet voor in de norm.

$$\dot{v}_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_t} \text{ [m}^3\text{/(h.m}^2\text{)]} \quad \text{Met } \dot{V}_{50} = \frac{V_{50\text{-overdruk}} - V_{50\text{-onderdruk}}}{2}$$

Met

$\dot{v}_{50}$	=	luchtdoorlatendheid	[m ³ /(h.m ²)]
$\dot{V}_{\Delta p}$	=	gemeten luchtlekdebiet bij 50Pa	[m ³ /h]
A_t	=	testoppervlakte	[m ²]

De testoppervlakte omvat alle muren, daken en vloeren grenzend aan de buitenomgeving. Gemene muren worden hier dus niet bijgerekend; De berekende waarde is gekend als de v_{50} -waarde. Door alle testen uit te drukken in deze waarde kunnen gebouwen met elkaar vergeleken worden. Deze waarde mag niet verward worden met de q_{50} -waarde.

Opmerking: Het grote verschil met de q_{50} -waarde is de oppervlakte waarmee gerekend wordt. Het testoppervlak (bij de $\dot{v}_{50}$ -waarde) is de oppervlakte van de gebouwschil, bij het beschermd volume. Het beschermd volume wordt berekend aan de hand van de buitenafmetingen van het gebouw. Terwijl bij de q_{50} -waarde de schiloppervlakte bepaald wordt aan de hand van het binnenvolume. Hier worden de buitenwanden buiten beschouwing gelaten. Wat op die manier tot twee verschillende resultaten leidt.

De test in het kader van de EPB-regelgeving wordt uitgevoerd als methode A. Methode A heeft als doel de energieverliezen vast te stellen. Bij deze manier van meten dient de woning in gebruikstoestand te zijn. Dit wil zeggen dat alle bewust gemaakte openingen (deuren, ramen, ventilatieopeningen) afgesloten dienen te worden.

Naast methode A is er ook methode B. De test aan de hand van methode B wordt uitgevoerd in de werffase. Bij deze meting worden alle gekende openingen gesloten of afgedicht. Zo kunnen niet gekende openingen (luchtlekken) gevonden worden. Omdat deze Blowerdoortest in de werffase gebeurt, kan het luchtlek eventueel nog weggewerkt worden.

3.1.4 Luchtlekdebiet per eenheid van vloeroppervlakte ($w_{\Delta p}$)

De w -waarde van een gebouw drukt het gemeten luchtlekdebiet uit ten opzichte van de vloeroppervlakte.

$$w_{\Delta p} = \frac{\dot{V}_{\Delta p}}{A_F} \text{ [m}^3\text{/(h.m}^2\text{)]}$$

Met

$w_{\Delta p}$	=	luchtlekdebiet per eenheid van vloeroppervlakte	[m ³ /(h.m ²)]
$\dot{V}_{\Delta p}$	=	luchtlekdebiet bij Δp	[m ³ /h]
A_F	=	netto vloeroppervlakte	[m ²]

De netto-vloeroppervlakte wordt volgens de norm bepaald door middel van nationale regels. In België wordt in theorie de vloeroppervlakte van iedere ruimte opgeteld. Bepaalde uitsparingen als vides en traphallen worden hier niet bijgerekend. Omwille van het vele werk mag ook de vereenvoudigde methode toegepast worden. Hierbij wordt gerekend met de globale binnenafmetingen.

3.1.5 Effectief luchtlekoppervlak

De effectieve luchtlekoppervlakte drukt het luchtlekverlies uit in een oppervlakte. Op die manier kan een voorstelling gemaakt worden van de totale oppervlakte aan luchtlekken. Dit kan opgevat worden als het totaal aantal, in vierkante meter, aan gaten en kieren dat aanwezig is in een gebouw. Op die manier kan de luchtdichtheid beter gevisualiseerd worden.

Het effectief luchtlekoppervlak wordt bepaald aan de hand van de formule:

$$ELA_{\Delta p} = \frac{1}{3600} C_L \left(\frac{\rho_0}{2} \right)^{0,5} (\Delta p)^{n-0,5} \text{ [m}^2\text{]}$$

Met

$ELA_{\Delta p}$	=	effectief luchtlekoppervlak	[m ²]
C_L	=	genormeerde stromingscoëfficiënt	[m ³ /(h.Pa ⁿ)]
ρ_0	=	luchtdichtheid bij standaardomstandigheden	[kg/m ³]
Δp	=	drukverschil	[Pa]
n	=	stromingsexponent	[-]

Met de effectieve luchtlekoppervlakte kan zowel een effectief luchtlekoppervlak ten opzichte van de oppervlakte van de gebouwschil ($ELA_{E\Delta p}$) als van de netto vloeroppervlakte ($ELA_{F\Delta p}$) bepaald worden. Dit geeft de verhouding weer van het luchtlekoppervlak ten opzichte van bepaalde oppervlaktes.

$$ELA_{E\Delta p} = \frac{ELA_{\Delta p}}{A_E} \text{ [-]}$$

$$ELA_{F\Delta p} = \frac{ELA_{\Delta p}}{A_F} \text{ [-]}$$

Over het algemeen wordt de effectieve luchtlekoppervlakte uitgedrukt bij een drukverschil van 10 Pa.

3.1.6 Drukverschillen

Zoals uit vorige paragrafen al duidelijk is geworden, worden de verschillende grootheden over het algemeen uitgedrukt bij een drukverschil van 50 Pa. Naast deze waarde van 50 Pa worden nog een aantal drukverschillen vaak gebruikt. Zo wordt een drukverschil van 10 Pa in de Canadese definitie van effectief luchtlekoppervlak gebruikt. In Nederland wordt het luchtlekdebiet volgens NEN 2686 uitgedrukt bij een drukverschil van 10 Pa. De metingen verlopen gelijk met metingen in België. Enkel wordt het resultaat omgezet naar een waarde bij een drukverschil van 10 Pa.

Daarnaast wordt een drukverschil van 1 tot 4 Pa algemeen gezien als het drukverschil gecreëerd door weersomstandigheden. In hoofdzaak wordt 4 Pa genomen. Het drukverschil van 1 Pa wordt namelijk enkel in theoretische vraagstukken gebruikt.

3.1.7 Infiltratieverlies bij warmteverliesberekening

Om de warmtebehoefte van gebouwen te bepalen (aan de hand van de warmtebalans/wet van behoud van energie) worden de warmtewinsten en warmteverliezen met elkaar vergeleken. Ventilatie- en infiltratieverliezen behoren tot de categorie warmteverliezen. De infiltratieverliezen hebben te maken met de luchtdichtheid van een gebouw. Deze verliezen kunnen bepaald worden aan de hand van de formule:

$$\Phi_{\text{inf}} = 0,34 \cdot n_{\text{inf}} \cdot V(\theta_i - \theta_e) \text{ [W]}$$

Met

Φ_{inf}	=	warmteverlies door infiltratie	[W]
n_{inf}	=	infiltratievoud	[1/h]
V	=	volume	[m ³]
θ_i	=	binnentemperatuur	[K]
θ_e	=	buitentemperatuur	[K]

Het seizoensgemiddeld infiltratievoud n_{inf} staat in verband met de berekende n_{50} -waarde uit de luchtdichtheidstest. Omwille van het onnatuurlijk hoog drukverschil die bij de Blowerdoortest gesimuleerd wordt, dient nog een correctiefactor toegepast te worden op de n_{50} -waarde.

$$n_{\text{inf}} = \frac{n_{50}}{2} \cdot \left(\frac{\Delta p}{50}\right)^n \text{ [1/h]}$$

Met

n_{inf}	=	seizoensgemiddeld infiltratievoud	[1/h]
n_{50}	=	infiltratievoud bij 50Pa	[1/h]
Δp	=	drukverschil	[Pa]
n	=	stromingsexponent	[-]

Omdat de stromingsexponent niet altijd eenvoudig te bepalen is, wordt de formule vereenvoudigd:

$$n_{\text{inf}} = \frac{n_{50}}{x} \text{ [1/h]}$$

Met

x	=	10-15	blootgesteld/middelhoog	[-]
	=	14-20	matig beschut/2-3 verdiepingen	[-]
	≥	25	sterk beschut/laagbouw	[-]

Zoals bovenstaande tabel aangeeft is de waarde 'x' afhankelijk van de hoogte van het gebouw en/of de blootstelling aan de wind. De invloed van de luchtdichtheid op de warmteverliezen blijft echter nog steeds onzeker. Omwille van verschillende invloedparameters waar geen rekening mee gehouden is. Hierbij kan ook nog vermeld worden dat voor EPB-toepassingen de waarde '20' gebruikt wordt.

Een meer gedetailleerde formule voor het bepalen van het seizoensgemiddeld infiltratievoud werd reeds in 1994 opgesteld:

$$n_{inf} = \frac{n_{50}}{C.H.S.L} [1/h]$$

Met

n_{inf}	=	seizoensgemiddeld infiltratievoud	[1/h]
n_{50}	=	infiltratievoud bij 50Pa	[1/h]
C	=	klimaatafhankelijke factor	[-]
H	=	correctiefactor gebouwhoogte	[-]
S	=	correctiefactor beschutting	[-]
L	=	correctiefactor grootte luchtlekken	[-]

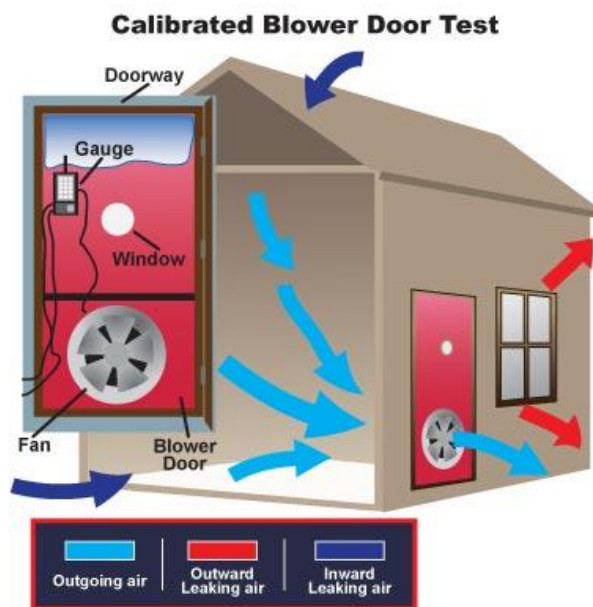
Voor de exacte waarden van de correctiefactor wordt verwezen naar het werk. (Meier, 1994)

3.2 Blowerdoor

3.2.1 Principe

De pressurisatietest is beter gekend als de Blowerdoortest. De test werd voor het eerst gebruikt in Zweden in 1977. De naam Blowerdoor vertelt reeds het principe van de methode. Door middel van een ventilator, die in een deuropening geplaatst wordt, wordt extra lucht in het gebouw geblazen of afgezogen. Het gebouw wordt daarbij in overdruk (binnenlucht ontsnapt) of in onderdruk (buitenlucht wordt aangezogen) geplaatst. Bij de officiële luchtdichtheidstest dient de woning eens in overdruk en eens in onderdruk geplaatst te worden. In België worden pressurisatietesten uitgevoerd volgens de norm NBN EN ISO 9972:2015: Thermische eigenschappen van gebouwen – Bepaling van de luchtdoorlatendheid van gebouwen – overdrukmethode met ventilator (Belgisch instituut voor normalisatie (BIN), 2015). Deze norm vervangt de norm NBN EN 13829:2001.

Bij het uitvoeren van de test wordt het volume lucht opgemeten dat doorheen de ventilator verplaatst wordt. Dit bij verschillende drukverschillen tussen binnen en buiten (meestal tussen 20 Pa en 60 Pa). Omdat de luchtdebieten doorheen de ventilator opgemeten worden, en dus gekend zijn, kan perfect gemeten worden welke hoeveelheid lucht aan de woning toegevoegd of onttrokken wordt om het luchtdrukverschil tussen binnen en buiten te behouden. Rekening houdende met alle omgevingsparameters worden de metingen door software verwerkt tot een grafiek. De verschillende meetresultaten dienen een voldoende grote correlatie te hebben om geldige testresultaten te bekomen.



Figuur 8: principe Blowerdoortest (onderdruk) – bron: google afbeeldingen

3.2.2 Luchtstromingen

Zoals in vorige paragraaf vermeld werd, wordt het luchtlekdebiet berekend door luchtstromingen doorheen openingen te bepalen. Algemeen wordt de luchtstroom doorheen één opening beschreven door volgende formule:

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Met

Q	=	luchtdebiet doorheen opening	[m ³ /h]
C _d	=	weerstandsgetal van de opening	[-]
A	=	oppervlakte van de opening	[m ²]
Δp	=	drukverschil over opening	[Pa]
ρ	=	massadichtheid lucht	[kg/m ³]

In de praktijk zullen niet alle oppervlaktes (A) van de openingen gekend zijn, in het bijzonder van de onvoorziene openingen (luchtlekken). Bovenstaande vergelijking is bijgevolg niet toepasbaar om het luchtlekdebiet van een woning te bepalen. Om die reden wordt in de praktijk een vereenvoudigde formule toegepast:

$$Q = C_L \cdot \Delta p^n$$

Met

C _L	=	genormeerde stromingscoëfficiënt	[m ³ /(h.Pa ⁿ)]
Δp	=	drukverschil over opening	[Pa]
n	=	stromingsexponent	[-]

De stromingscoëfficiënt (C_L) is afhankelijk van de afmetingen en de vorm van de opening. De stromingsexponent (n) hangt af van de soort stroming, laminair (n = 1,0) of turbulent (n = 0,5), doorheen die opening. Bij een kleine opening zal de stroming zich eerder laminair gedragen, terwijl bij een grote opening er een turbulente stroming zal optreden. Het ontstaan van het drukverschil (Δp) werd in hoofdstuk 2.2.2 reeds behandeld.

Aan de hand van de gemeten waarden van het luchtdebiet en het drukverschil kunnen de stromingscoëfficiënt en stromingsexponent bepaald worden.

3.2.3 Voorbereiding

Voordat een pressurisatieproef uitgevoerd kan worden, dienen een aantal aandachtspunten gecontroleerd te worden. Belangrijk is het feit dat een luchtdichtheidsmeting pas uitgevoerd kan worden nadat alle werken aan de oppervlakte van de gebouwschil uitgevoerd zijn.

Een eerste aandachtspunt is het sluiten of verzegelen van bewust gemaakte openingen. De vereisten zijn beschreven in STS-P-71-3. Bij deze scriptie wordt ervan uitgegaan dat er een ‘standaardtest’ uitgevoerd wordt. De bewust gemaakte openingen zijn in hoofdzaak afkomstig van het ventilatiesysteem, maar dit kunnen ook openingen zijn voor bijvoorbeeld een brievenbus of een kattenluik. Het afdichten van de openingen is nodig om de meetresultaten niet te beïnvloeden. Er is vrije keuze om de ventilatie aan de toe- en afvoermonden af te dichten, of bij de centrale unit. Bij sanitaire voorzieningen dienen de zwanenhalzen gevuld te zijn met water. Daarnaast dienen alle buitendeuren en ramen gesloten te worden. De binnendeuren worden geopend, enkel deze van het toilet wordt gesloten.

Er dient ook op de weersomstandigheden gelet te worden. De windsnelheden en de temperatuurverschillen tussen binnen en buiten kunnen de resultaten beïnvloeden. Deze gegevens dienen bijgevolg nauwkeurig gemeten en geregistreerd te worden. Voor windsnelheden is het voldoende om aan de hand van visuele aspecten (bewegen van bomen, ...) de windsnelheid op de schaal van Beaufort te bepalen.

Volgens de oude norm NBN EN 13829:2001 wordt het moeilijk om een toereikend natuurlijk drukverschil (zero flow pressure) te behalen wanneer:

$$\Delta\theta \cdot h \leq 500 \text{ [K.m]}$$

$$v_{\text{wind}} \geq 6 \text{ m/s [m/s]}$$

Met

$\Delta\theta$	=	temperatuurverschil binnen <=> buiten	[K]
h	=	gebouwhoogte	[m]
v_{wind}	=	windsnelheid	[m/s]

De bijgewerkte norm uit 2015 maakt hier geen melding van.

3.2.4 Meetprocedure

De Blowerdoortesten die uitgevoerd worden in het kader van deze scriptie, worden uitgevoerd volgens de norm NBN EN ISO 9972:2015. De procedure wordt hieronder beschreven.

Natuurlijk drukverschil

Het natuurlijk drukverschil of zero flow pressure is het verschil in druk tussen binnen en buiten dat veroorzaakt wordt door wind- en temperatuurverschillen. Dit drukverschil wordt steeds opgemeten voor én na een luchtdichtheidstest. Op basis van deze meting worden de meetinstellingen aangepast om op die manier tot een geldige meting te resulteren. Aan de hand van de zero flow pressure wordt een correctie op de meetresultaten toegepast en worden alle testomstandigheden als gelijk verondersteld.

Om het natuurlijk drukverschil te kunnen opmeten wordt de ventilator afgesloten met een kap zodat de opening volledig luchtdicht is. Over een periode van 30 seconden worden binnen en buiten drukverschillen gemeten en op die manier is het mogelijk om volgende gemiddelde waarden te bekomen:

Start van de test:

Δp_{01+} = gemiddelde positieve waarde van het natuurlijk drukverschil [Pa]

Δp_{01-} = gemiddelde negatieve waarde van het natuurlijk drukverschil [Pa]

Δp_{01} = gemiddelde waarde van het natuurlijk drukverschil [Pa]

Einde van de test:

Δp_{02+} = gemiddelde positieve waarde van het natuurlijk drukverschil [Pa]

Δp_{02-} = gemiddelde negatieve waarde van het natuurlijk drukverschil [Pa]

Δp_{02} = gemiddelde waarde van het natuurlijk drukverschil [Pa]

Indien blijkt dat één van de waarden bij het starten van de test (Δp_{01+} of Δp_{01-}) groter is dan 5 Pa, dan mag de proef niet uitgevoerd worden. Indien één van de eindwaarden (Δp_{02+} of Δp_{02-}) groter is dan 5 Pa, dan is de proef ongeldig en moet deze hernomen worden.

Volumestroom

Om tot een genormeerde luchtstroom te komen dienen een aantal correcties toegepast te worden. Een eerste is de factor is de nauwkeurigheid van het meettoestel. In deze scriptie wordt de Tectite Express 4.1 software gebruikt. Deze past de correcties automatisch toe.

Ook voor het temperatuurverschil tussen binnen en buiten wordt een correctie aangebracht. Op het moment dat er een meting bij overdruk plaatsvindt en er dus een verplaatsing is van koudere lucht van buiten naar binnen, zal die lucht opwarmen en dus ook uitzetten. Het volume lucht dat ontsnapt door de gebouwschil zal op die manier groter zijn dan het volume lucht dat door de meting naar binnen wordt verplaatst. Bij een onderdrukmeting is het principe hetzelfde, maar net omgekeerd. Het volume lucht dat binnenkomt via de gebouwschil is kleiner dan het volume lucht dat door de meting naar buiten wordt verplaatst.

Bij overdruk wordt dit omgezet in volgende formule:

$$\dot{V}_{env} = \dot{V}_m \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_i} \right) [\text{m}^3/\text{h}]$$

Bij onderdruk is dat:

$$\dot{V}_{env} = \dot{V}_m \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_e} \right) [\text{m}^3/\text{h}]$$

Met

$\dot{V}_{env}$	=	lekdebiet door de gebouwschil	$[\text{m}^3/\text{h}]$
$\dot{V}_m$	=	afgelezen volumestroom	$[\text{m}^3/\text{h}]$
ρ_i	=	massadichtheid van de binnenlucht	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_e	=	massadichtheid van de buitenlucht	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Het bepalen van de massadichtheid van de binnen- en buitenlucht gebeurt aan de hand van volgende formules:

$$\rho = \frac{p_{bar} - 0,37802 \cdot p_v}{278,055 \cdot (\theta + 273,15)} [\text{kg}/\text{m}^3]$$

$$p_v = \phi \cdot p_{vs} [\text{Pa}]$$

$$p_{vs} = \exp\left(59,484085 - \frac{6790,4985}{\theta + 273,15} - 5,02802 \cdot \ln(\theta + 273,15)\right) [\text{Pa}]$$

Met

ρ	=	massadichtheid lucht	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
p_{bar}	=	barometrische luchtdruk	$[\text{Pa}]$
p_v	=	partiële waterdampdruk	$[\text{Pa}]$
θ	=	temperatuur	$[\text{°C}]$
ϕ	=	relatieve luchtvochtigheid	$[\%]$
p_{vs}	=	saturatiedampdruk	$[\text{Pa}]$

Opbouw drukverschil

Volgens de oude norm kan er gekozen worden voor een single-point test. Bij deze werkwijze wordt het luchtdebiet enkel gemeten bij een drukverschil van 50 Pa. De huidige norm maakt hier echter geen melding meer van. Volgens NBN EN ISO-9972:2015 dienen er vijf verschillende meetpunten te liggen tussen het laagste en hoogste drukverschil met ongeveer eenzelfde verschil. Er dient bijgevolg een multi-point test uitgevoerd te worden. Het drukverschil wordt bij deze test stapsgewijs op-afgebouwd, zo kan men een regressierechte bekomen op basis van de verschillende meetwaarden. Op die manier kan bij ieder drukverschil de volumestroom afgelezen worden. De voornaamste reden om een multi-point test uit te voeren is dat toevallige onjuistheden/uitschieters gemakkelijker opgespoord kunnen worden.

Er dient minimaal getest te worden tot een drukverschil van 50 Pa en er wordt aanbevolen om te meten tot 100 Pa. Hierbij dient wel een praktische opmerking gemaakt te worden. Een te groot drukverschil (meer dan 60Pa) kan eventuele beschadigingen aanbrengen aan bijvoorbeeld luchtdichtheidsfolies of dergelijke. Bij grote gebouwen (groter dan 4000m³) is deze eis echter te streng. In deze scriptie worden geen gebouwen getest van deze grootte.

De minimale druk waarbij gemeten moet worden is 10 Pa of 5 keer het natuurlijk drukverschil Δp_{01} . Hier dient de grootste waarde van de twee gekozen te worden. Tussen twee meetpunten mag het drukverschil maximaal 10 Pa bedragen. Daarnaast wordt nog aangeraden om zowel een overdruk- als een onderdrukmeting uit te voeren. Volgens STS-P-71-3 is dit echter verplicht voor het uitvoeren van metingen in het Vlaams Gewest sinds 1 januari 2015. Per meetpunt worden 100 'samples' genomen om een exacter resultaat te verkrijgen.

Berekening $\dot{V}_{\Delta p}$

Het lekdebiet doorheen de gebouwschil per meetpunt wordt bepaald aan de hand van de formule:

$$\dot{V}_{env} = C_{env} \cdot (\Delta p)^n \text{ [m}^3/\text{h]}$$

Met

$\dot{V}_{env}$	=	gemeten lekdebiet door gebouwschil	[m ³ /h]
C_{env}	=	stromingscoëfficiënt	[m ³ /(h.Pa ⁿ)]
Δp	=	drukverschil	[Pa]
n	=	stromingsexponent	[-]

De kleinstekwadratenmethode zorgt ervoor dat de stromingscoëfficiënt en de stromingsexponent gekend zijn. De stromingscoëfficiënt moet echter aangepast worden naar de normomstandigheden (20 ± 1 °C; 1,013 · 10⁵ Pa). Om dit te kunnen realiseren moeten volgende aanpassingen gebeuren:

Bij een overdrukmeting:

$$C_L = C_{env} \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_0}\right)^{1-n} \text{ [m}^3/\text{(h} \cdot \text{Pa}^n\text{)]}$$

Bij een onderdrukmeting

$$C_L = C_{env} \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_0}\right)^{1-n} [\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)]$$

Met

C_L	=	genormeerde stromingscoëfficiënt	$[\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)]$
C_{env}	=	stromingscoëfficiënt	$[\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)]$
ρ_i	=	massadichtheid van de binnenlucht	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_e	=	massadichtheid van de buitenlucht	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ρ_0	=	massadichtheid lucht bij normomstandigheden	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
n	=	stromingsexponent	$[-]$

Het lekdebiet bij drukverschil Δp kan dan als volgt berekend worden:

$$\dot{V}_{\Delta p} = C_L \cdot (\Delta p)^n [\text{m}^3/\text{h}]$$

Met

$\dot{V}_{\Delta p}$	=	Lekdebiet bij drukverschil Δp	$[\text{m}^3/\text{h}]$
C_L	=	genormeerde stromingscoëfficiënt	$[\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)]$
Δp	=	drukverschil	$[\text{Pa}]$
n	=	stromingsexponent	$[-]$

Over- en onderdruk

De woning kan getest worden in onder- of overdruk. Om tot het meest betrouwbare resultaat te komen, beveelt de norm het uitvoeren van beide metingen aan. Wanneer er, via de ventilator, lucht in de woning geblazen wordt, ontstaat er overdruk. Terwijl de onderdrukmeting net wordt uitgevoerd door lucht uit de woning te zuigen. Op die manier wordt telkens een bepaald luchtlekdebiet bekomen.

Beide waarden kunnen echter minimaal van elkaar afwijken door de vorm en eigenschappen van de verschillende gaten en kieren. Sommige kleppen (met terugslag) kunnen namelijk opengeduwd worden tijdens een overdrukmeting en vervolgens toegezogen worden tijdens een meting in onderdruk.

De norm verplicht slechts één van beide metingen (onderdruk of overdruk), dit is echter minder waarheidsgetrouw. Daarom raadt de norm steeds aan om zowel in onder- als bovendruk te testen. Voor metingen in het Vlaams gewest dient de STS-P-71-3 gevolgd te worden, volgens deze technische specificatie dienen beiden metingen uitgevoerd te worden. Om dan het uiteindelijke luchtlekdebiet te kennen, wordt het gemiddelde van beide meetresultaten genomen:

$$\dot{V}_{50} = \frac{\dot{V}_{50, \text{ onderdruk}} + \dot{V}_{50, \text{ overdruk}}}{2} [\text{m}^3/\text{h}]$$

Foutenmarge

Uiteraard is het gemeten luchtlekdebiet niet de exacte waarde. Er dient rekening gehouden te worden met een aantal onnauwkeurigheden.

Een eerste onzekerheid is de precisie van het meetinstrument. Deze onnauwkeurigheid wordt opgegeven door de fabrikant. Over het algemeen ligt deze waarde tussen 4% en 7%. In deze scriptie wordt de DG-700 drukmeter gebruikt.

Een tweede onnauwkeurigheid is de fout op de drukmeting van het gebouw. Op basis van de zero flow pressure wordt deze berekend. De foutmarge ligt tussen 1% en 5%.

De meetonzekerheid op basis van windinvloeden is afhankelijk van de windsterkte, de beschutting van het gebouw en het aantal genomen referentiepunten. Op basis van deze gegevens kan in een tabel de maximale meetfout afgeleid worden.

Daarnaast dient nog een correctie toegepast te worden op de massadichtheid van de lucht. Wanneer de luchtdruk gemeten wordt, mag een foutmarge van 2% gerekend worden. Wanneer de luchtdruk niet gekend is, wordt gerekend met een fout van 5%.

Tot slot dient er nog een correctie toegepast te worden indien slechts 1 meting (enkel overdruk of enkel onderdruk) uitgevoerd wordt. Deze fout bedraagt 7%. Wanneer beide metingen uitgevoerd worden, zowel een overdrukmeting als een onderdrukmeting, dient deze fout niet in rekening gebracht te worden.

Wanneer de wortel genomen wordt van de som van al deze gekwadrateerde gegevens (onnauwkeurigheid meettoestel, fout op natuurlijk drukverschil, fout door windinvloed en fout op massadichtheid lucht) kan de meetonzekerheid in % bepaald worden. Deze methode werd ontwikkeld door FliB (FliB, 2008).

Wanneer het luchtlekdebiet gedeeld wordt door een bepaald gebouwvolume of verliesoppervlak dient nog een extra meetonzekerheid toegevoegd te worden. Namelijk de foutmarge op het gemeten volume of oppervlak. Deze onnauwkeurig loopt op van 3% tot 12%. Dit is afhankelijk van het feit of het volume/oppervlak bepaald wordt op basis van digitale plannen, plannen op papier of ter plaatse wordt gemeten.

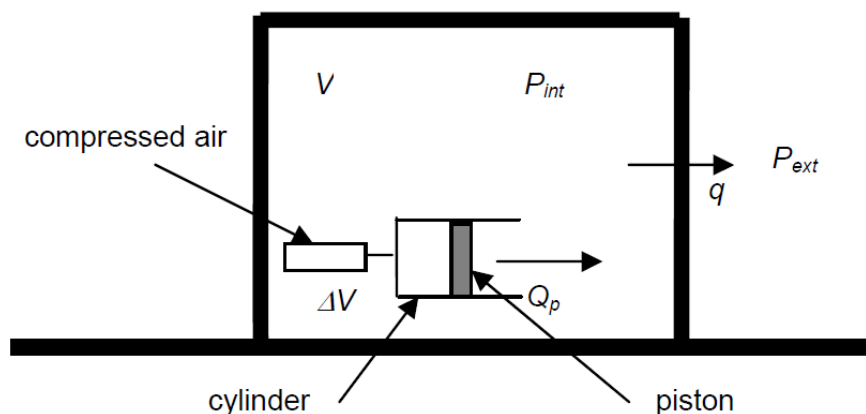
3.3 Pulse

De nieuwe meetmethode, sinds kort commercieel beschikbaar, wordt PULSE genoemd. Er werd reeds enige tijd onderzoek gedaan naar een meetmethode bij lage drukken. De methode die tot Pulse leidt, werd sinds 2007 uitgewerkt. De methode werd ontwikkeld door de Universiteit van Nottingham. Het commercieel toegankelijk toestel kwam er in samenwerking met Building Test Solutions.

Het doel van deze methode is om de luchtdichtheid te begroten bij een lager (meer natuurlijk) luchtdrukverschil. Een aantal onzekerheden/tekortkomingen van de blowerdoor test vervallen door deze methode.

3.3.1 Principe

Het toestel bevat een luchtdrukvat van 60 liter, dat dient opgeladen te worden door middel van een compressor. Na het doorlopen van een aantal instellingen (onder meer beschermd volume en verliesoppervlakte) wordt een gekend volume lucht uitgestuurd gedurende anderhalve seconde. Dit zorgt voor een korte stijging (puls) in de luchtdruk. Deze drukstijging zorgt voor een luchtstroom doorheen de luchtlekken. Na verloop van tijd zal het drukverschil opnieuw gestabiliseerd worden.



Figuur 9: principeschets Pulse - bron: (Cooper & Etheridge, 2007a)

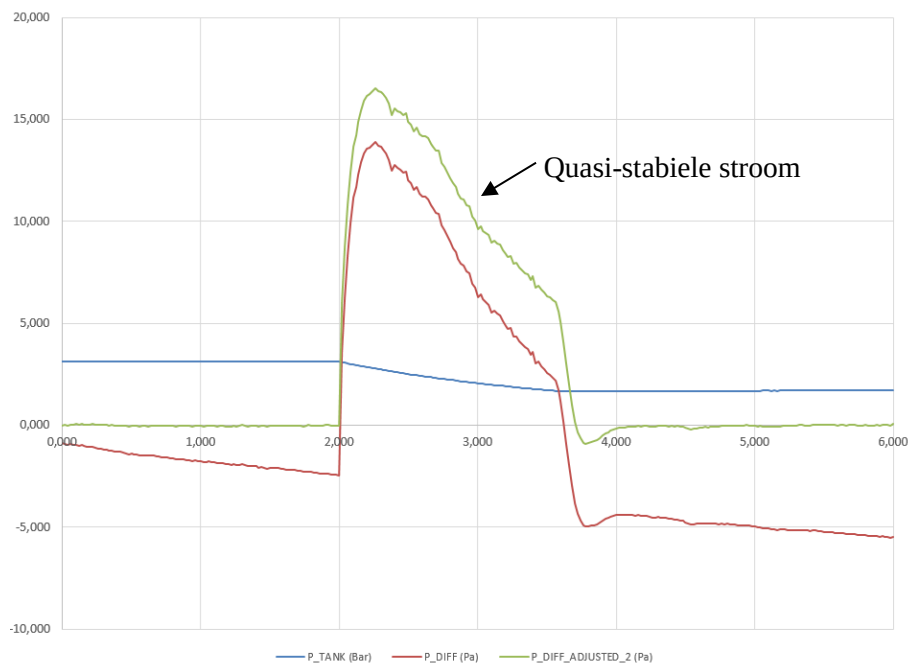
Het drukverschil, gedurende twee seconden voor en na de luchtdruk puls, wordt ook door het toestel geregistreerd. Na de test dient het vat opnieuw gevuld worden. Het meetresultaat wordt berekend bij een drukverschil van 4 Pa. De reden waarom het resultaat gemeten wordt bij 4 Pa wordt in volgend hoofdstuk (hoofdstuk 3.3.3) nader toegelicht. Het drukbereik dat gehaald wordt is niet voor iedere test gelijk. Het is afhankelijk van het vat en het volume van het gebouw. Volgens de ontwikkelaars volstaat een vat van 60 liter voor de meeste residentiële gebouwen. Voor grote gebouwen zal eventueel een tweede vat vereist zijn om een voldoende hoog luchtdrukverschil (minimaal 4 Pa) te verkrijgen.

3.3.2 Drukverloop

Het drukverloop van de test heeft een typische, herkenbare vorm. De rode grafiek (zie Figuur 10) drukt het gemeten drukverschil uit (ten opzichte van een referentiedruk) over een bepaald tijdsverloop. De eerste twee seconden dienen, net als de twee laatste seconden, om de ‘achtergronddruk’ te bepalen. Dit is het drukverschil in de woning, voor en na de drukpuls, ten opzichte van de referentiedruk. Aan de hand van dit drukverschil kan een correctie toegepast worden om windeffecten te elimineren (groene grafiek). Deze correctie wordt in paragraaf 3.3.4 nog verder besproken.

De puls is duidelijk herkenbaar in de grafiek. De volumeverandering zorgt voor een zeer snelle drukstijging in het binnenvolume. Deze duidelijk zichtbare drukstijging komt door de traagheid van de luchtstroom doorheen de gebouwschil. Er is enige vertraging voordat de luchtstroom op gang komt, dit zorgt voor de snelle drukstijging. Na deze vertraging is er wel een luchtstroom doorheen de luchtlekken, dit zorgt voor een afname van het drukverschil. Dit duurt ongeveer anderhalve seconde. Waarna opnieuw de achtergronddruk geregistreerd wordt.

Een opmerkelijk punt in dit verloop is het negatieve drukverschil tussen 3,7 en 4 seconden. De reden voor deze verschijning is opnieuw het momentum van de luchtstroom. Het principe is hetzelfde als bij het starten van de puls, maar dan omgekeerd. Na het stoppen van de drukpuls is er gedurende een korte periode nog een luchtstroom doorheen de luchtlekken. Dit zorgt voor een drukval in het binnenvolume, wat het negatieve drukverschil (ten opzichte van de referentiedruk) verklaart.



Figuur 10: drukverloop Pulsetest



Figuur 11: meetopstelling Pulse

3.3.3 Natuurlijk drukverschil

De meting bij een drukverschil van 50 Pa volgens de norm is in feite een compromis, omwille van de perceptie dat luchtdichtheidsmetingen bij lage drukverschillen grote fouten met zich meebrengen. In hoofdzaak worden de drukverschillen veroorzaakt door de wind (zie hoofdstuk 2.2.2). Deze drukverschillen zullen in natuurlijke omstandigheden echter nooit 50 Pa bedragen, tenzij in zeer extreme gevallen. Omwille van die reden werd onderzoek gedaan naar meetmethodes bij die lage drukken. Om op die manier de luchtdichtheidstest uit te voeren bij meer realistische/natuurlijke drukken. Zo kunnen bepaalde tekortkomingen van de Blowerdoortest weggewerkt worden en kunnen de verliezen bepaald worden in werkelijke omstandigheden.

De Pulsetest wordt uitgevoerd bij deze zogenaamde lage drukken. Afhankelijk van het gebouwvolume worden drukverschillen tot maximaal 25 Pa gehaald. Dit is een aanzienlijk verschil in vergelijking met de Blowerdoortest. Het resultaat wordt uitgedrukt bij een drukverschil van 4 Pa. 4 Pa wordt aangenomen als een typisch natuurlijk drukverschil tussen binnen en buiten waarbij infiltratie optreedt.

3.3.4 Onzekerheden/correctie

Er werd reeds onderzoek gedaan naar bepaalde onzekerheden bij het testen van de luchtdichtheid bij lage druk. Deze onzekerheden werden gekoppeld aan de Pulsemethode en oplossingen hiervoor werden uitgewerkt door Cooper. Hieronder volgt een korte samenvatting van de bevindingen.

In het eerste deel van de paper worden een aantal onzekerheden aangehaald voor het bepalen van het luchtlekdebiet bij 4 Pa. Er wordt ervan uitgegaan dat de meting gebeurt volgens het principe van de Blowerdoor. De onzekerheden hierbij zijn de wind (zowel de externe wind, als de wind gecreëerd door

de luchtstroom doorheen de ventilator), de extrapolatie van hoge druk tot een waarde van 4 Pa en de reeds bestaande onzekerheden bij metingen van hoge drukken.

Uit het onderzoek blijkt onder meer dat bij een drukverschil van 4 Pa de luchtstroom door een gekende opening veel preciezer gemeten kan worden dan bij een drukverschil van 50 Pa. Dit gegeven wordt reeds aangetoond in veldtesten (Xiaofeng, Cooper, Mazzon, Wallis, & Wood, 2017). De precisie van de meting wordt echter wel sterk beïnvloed door de wind. Vanaf windsnelheden van 2 m/s stijgt de foutenmarge bij 4 Pa zeer snel.

Als besluit wordt gesteld dat de Blowerdoormethode blootgesteld is aan grote onzekerheden omdat ze steunen op data van luchttekverliezen bij hoge drukverschillen. Deze onzekerheden kunnen bij een meting bij 4 Pa met een factor van 3 verlaagd worden. Daarnaast toont de studie theoretisch aan hoeveel de onzekerheid bedraagt wanneer de Blowerdoormeting omgezet wordt naar een waarde van 4 Pa. De foutenmarge bedraagt in dat geval 38%. Van de Pulsemethode wordt aangetoond dat bij een drukverschil van 4 Pa de foutenmarge 10% bedraagt. Wanneer het meetresultaat van de Blowerdoor bij 50 Pa geëxtrapoleerd wordt, ligt de fout tussen -38% en +28%.

In het tweede deel van het onderzoek wordt een oplossing uitgewerkt voor de snel stijgende foutenmarge onder invloed van de wind. Verschillende theoretische modellen worden onderzocht voor de optimale oplossing. De oplossing voor het probleem is toegepast bij de geteste Pulse. Het principe is te zien op Figuur 10. Door, zowel voor als na de puls, de achtergrondruk op te meten (gedurende 2 seconden) wordt het effect van de wind tot een minimum herleid.

Een bijkomend probleem bleek de ‘uitzetting’ van de gebouwschil tijdens de metingen. Het uitzetten van de gebouwschil houdt in dat ramen of deuren bewegen omwille van de drukstijgingen. Dit zorgt voor een verandering in volume, waardoor een drukdaling ontstaat. Deze daling kan verkeerdelijk geïnterpreteerd worden als een luchtstroom. Om die reden worden enkel bij de quasi-stabiele stroom meetpunten genomen. In de quasi-stabiele stroom zouden deze fluctuaties eerder beperkt zijn. (Cooper & Etheridge, 2007b; Cooper, Etheridge, & Smith, 2007). Uit het verder verloop van deze scriptie blijkt dit echter niet zo vanzelfsprekend te zijn.

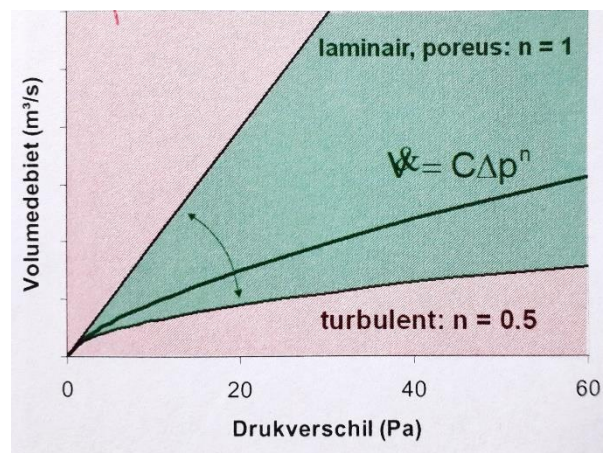
De quasi-stabiele periode bevindt zich na het hoogst bereikte drukverschil en voor het sluiten van het ventiel na 1,5 seconden.

3.3.5 Parameters goede meting

Om een meetresultaat als betrouwbaar te kunnen veronderstellen, dient aan een aantal voorwaarden voldaan te worden. In hoofdzaak zijn dit dezelfde parameters waaraan een Blowerdoortest moet voldoen.

Een eerste voorwaarde waaraan voldaan moet worden is de determinatiecoëfficiënt R^2 . De determinatiecoëfficiënt drukt uit hoe dicht de gemeten waarden de werkelijkheid benaderen. Bij luchtdichtheidsmetingen dient de R^2 -waarde minimaal 0,98 te bedragen. Een voldoende hoge R^2 -waarde wordt gehaald wanneer de verschillende meetpunten zo goed mogelijk de lineaire regressielijn benaderen. Hoe meer deze determinatiecoëfficiënt 1 benadert, hoe betrouwbaarder voorspellingen (interpoleren of extrapoleren) op basis van de lineaire regressielijn zijn.

De n-waarde is een tweede voorwaarde waaraan voldaan dient te worden. Deze waarde dient minimaal 0,5 en maximaal 1,0 te bedragen. De n-waarde is de stromingsexponent. Zoals eerder vermeld beschrijft de n-waarde het stromingsregime (laminair of turbulent) doorheen de luchtlekken. Bij grote openingen benadert de stromingsexponent 0,5 en dus turbulente stroming. Bij kleine openingen is de stroming eerder laminair, hier benadert de stromingsexponent 1,0. Fysisch ligt de stromingsexponent steeds tussen 0,5 en 1.



Figuur 12: stromingsexponent

Daarnaast is het ook belangrijk dat het drukinterval het drukverschil van 4 Pa bevat. De resultaten bij de Pulse worden namelijk berekend bij een drukverschil van 4 Pa. Wanneer het interval deze waarde immers niet bevat is er mogelijk een significante foutmarge bij extrapolatie.

3.3.6 Opmerking

Uit een studie van de bestaande literatuur blijkt dat in hoofdzaak Edward Cooper onderzoek doet naar desbetreffend onderwerp. Dit heeft een specifieke reden. Cooper is werkzaam voor de Universiteit van Nottingham. Sinds enige jaren doen zij onderzoek naar het testen van luchtdicht bij lage drukverschillen, wat resulteerde tot de Pulsemethode. Het toestel is nog volop in ontwikkeling. Dit doet de Universiteit van Nottingham in samenwerking met Building Test Solutions. Bij het schrijven van deze scriptie waren slechts drie toestellen ontwikkeld. Twee daarvan zijn eigendom van Universiteit Nottingham. Het derde toestel werd aangekocht door Universiteit Gent.

Omwille van bovenstaande reden is nog weinig literatuur van verschillende onderzoekers terug te vinden. Op die manier is het niet mogelijk om de bevindingen van Cooper over de vergelijking tussen de Blowerdoor en Pulse te koppelen aan ander onderzoek. Wat dan weer het nut van deze scriptie bevestigt.

4. Theoretische vergelijking

Aangezien de resultaten van de Blowerdoor beïnvloed worden door de weersomstandigheden is het belangrijk om beide testen op (ongeveer) hetzelfde ogenblik te kunnen uitvoeren. Op die manier kan de invloed van de weersomstandigheden voor beide testen uitgesloten worden. Ideaal zou zijn om, gedurende het verloop van de metingen, verschillende weerdata (zoals wind, temperatuur, ...) te registreren, om eventueel op die manier een verband te vinden tussen de resultaten van de Blowerdoortest aan de ene kant, en de Pulsemethode aan de andere kant.

Het vergelijken van twee verschillende methodes is niet altijd eenvoudig. Zo moet het mogelijk zijn een verband te leggen tussen de resultaten van beide testen. De resultaten van de blowerdoor test worden over het algemeen uitgedrukt bij een drukverschil tussen binnen en buiten van 50 Pa (Q_{50}). De Pulse methode kan deze hoge drukverschillen niet behalen, en wordt uitgedrukt bij een waarde van 4 Pa (Q_4). Om deze resultaten te kunnen vergelijken, dient een van de twee waarden geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd te worden. Extrapolatie draagt steeds een onnauwkeurigheid met zich mee. Zo kan het zijn dat kleine afwijkingen van de meettoestellen uitvergroot worden. Om die reden wordt niet verwacht dat de metingen van de Blowerdoor en de Pulse dezelfde waarden bekomen. Er wordt gelet of de metingen per gebouw eenzelfde trend volgen. Dat de resultaten van de twee methodes niet perfect kunnen overeenkomen is reeds gebleken bij andere onderzoeken die twee methodes voor het meten van de luchtdichtheid vergelijken (Cooper e.a., 2016; Patel, Mitsingas, Miller, & Newell, 2011).

Wanneer de Blowerdoor en de Pulse op basis van de meetmethode vergeleken worden, kunnen reeds een paar verschillen aangeduid worden. Het eerste verschil, dat reeds beschreven werd, is de grootteorde van het drukbereik. Een tweede verschil is het feit dat de Pulse de gebouwschil ongewijzigd laat, in tegenstelling tot de Blowerdoor. Deze laatste dient opgesteld te worden in een deur- of raamopening in de gebouwschil. In feite zorgt deze opstelling ervoor dat het verliesoppervlak niet correct gemeten wordt. De meetopstelling mag nog perfect opgesteld zijn en goed aansluiten op het raamkader, dit kan nooit de werkelijkheid simuleren. De vraag is natuurlijk of dat gegeven een positief of negatief effect heeft op de luchtdichtheid. Om die reden wordt volgens de technische specificatie STS-P-71-3 aangeraden om de Blowerdoor in de meest luchtdichte opening te plaatsen. Het verlies of de winst van de opstelling kan eventueel met de Pulse begroot worden. Omdat de Blowerdoor in de grens tussen binnen en buiten geplaatst wordt, moet er ook rekening gehouden worden met het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur. Hiervoor wordt een correctie op de meetresultaten toegepast. De Pulse wordt volledig binnenin een gebouw geplaatst. Er dient dus enkel rekening gehouden te worden met de binnentemperatuur.

Daarnaast is de referentieluchtdruk bij de Pulse reeds in het toestel verwerkt. Dit zorgt ervoor dat er geen referentiepunt buiten genomen dient te worden. Bij de Blowerdoor is dit wel het geval, en bij slechte weersomstandigheden (veel wind) maakt dit het niet altijd mogelijk een meting uit te voeren.

Een derde verschil is de tijd van uitvoering. Volgens de fabrikant kan de Pulse veel sneller uitgevoerd worden dan de Blowerdoormeting. Uiteraard blijft de voorbereiding van het gebouw voor beide metingen dezelfde. De Pulsemeting op zich duurt ongeveer 10 seconden. Een Blowerdoormeting duurt al snel 10 minuten, als er niet fout gaat. Hierbij dient wel nog vermeld te worden dat het luchtvat van de Pulse opgeladen moet worden voor iedere meting. Het volledig opladen, tot de maximale druk, duurt 10 à 11 minuten.

Tot slot meet de Pulse enkel in overdruk. Dit is een belangrijk verschil en dient zeker vermeld te worden. De norm raadt namelijk aan om zowel een over- als onderdrukmeting uit te voeren. Het is echter geen verplichting volgens de norm. Wanneer de luchtdichtheidsmetingen uitgevoerd worden in het kader van de EPB-eisen zijn beide metingen wel verplicht. Omdat in België zo goed als alle luchtdichtheidsmetingen binnen dit kader uitgevoerd worden, is dit een belangrijk nadeel van de Pulse.

5. Experimenteel onderzoek

Uit de literatuurstudie blijkt dat de Blowerdoor en de Pulse meting reeds in een gecontroleerde omgeving en in het veld getest en vergeleken werden. Het betrof woningen met een lage luchtdichtheidsscore in Engeland. Het feit dat slechts één onderzoek uitgevoerd werd in het veld, door de persoon die het toestel ontwikkelde, toont aan dat er voldoende basis is om nogmaals een aantal praktische testen uit te voeren met beide methodes in parallel. Uiteraard worden niet alle parameters dezelfde genomen. Bij voorkeur worden nieuwbouwwoningen getest. Dit zijn namelijk de woningen in Vlaanderen, en met uitbreiding België, waar luchtdichtheidsmetingen worden uitgevoerd. Er wordt verondersteld dat deze gebouwen goed scoren op gebied van luchtdichtheid.

Naast de vergelijking van de Blowerdoor en de Pulse wordt ook het drukverschil in een andere ruimte van het gebouw geregistreerd. Op die manier kan nagegaan worden of de Pulsemeting, die bij relatief lage drukverschillen uitgevoerd wordt, in de volledige woning merkbaar is en op die manier een resultaat kan bepalen over het volledige volume.

Informatie over de geteste woningen is terug te vinden in de volgende paragraaf. De metingen per gebouw worden zoveel als mogelijk binnen eenzelfde tijdspanne uitgevoerd, om de externe invloeden zoveel mogelijk als gelijk te beschouwen.

5.1 Testwoningen

In deze paragraaf wordt een korte omschrijving gegeven van de verschillende woningen waar de metingen werden uitgevoerd. De volumes en verliesoppervlaktes werden op basis van de plannen bepaald. Daarnaast werd ook de globale inplanting bestudeerd, dit om de invloed van wind op het gebouw te kunnen inschatten. Tot slot werd het verwarmings- en ventilatiesysteem nagekeken. Van iedere woning zijn alle gedetailleerde gegevens terug te vinden in de volgende paragrafen.

De woningen werden specifiek gekozen om metingen uit te voeren in een breed scala van verschillende woningtypes. Zo werd onder meer gelet op het volume en de constructiewijze. De focus ligt in hoofdzaak bij nieuwbouwwoningen. Deze keuze voor nieuwbouwwoningen vloeit voort uit het feit dat zo goed als alle luchtdichtheidsmetingen in Vlaanderen uitgevoerd worden in het kader van de EPB-eisen. Zoals in de inleiding vermeld is, zijn deze eisen er hoofdzakelijk voor nieuwbouw en grondige renovaties.

Van ieder gebouw waar metingen uitgevoerd werden, is op basis van de architectuurplannen het volume (zowel het beschermd volume als het binnenvolume) en verliesoppervlak bepaald. Het beschermd volume (en bijgevolg het testoppervlak) wordt bepaald aan de hand van de regels voor EPB. Het binnenvolume en het samenhangend verliesoppervlak worden bepaald volgens de norm voor luchtdichtheidsmetingen. Deze gegevens zijn nodig om het luchtlekdebiet in de verschillende grootheden te kunnen uitdrukken. Op die manier kunnen verschillende woningen onderling vergeleken worden.

5.1.1 Testwoning 1

De eerste testen gebeurden in een standaard vrijstaande woning. De woning is gebouwd in 1996, in een residentiële woonwijk. De woning is op klassieke wijze gebouwd, dit wil zeggen met wanden/spouwmuren uit metselwerk en een houten dakconstructie. Er werd reeds een minimum aan isolatie voorzien. Ventilatievoorzieningen zijn nog niet aanwezig. In België zijn tal van gelijkaardige woningen terug te vinden (Winters e.a., 2015). Dit verklaart ook de keuze voor deze woning als testwoning. In verdere bepalingen en bijlagen wordt deze woning gecodeerd als W1.



Figuur 13: situeringsplan W1 - bron: Google



Figuur 14: gevelaanzicht W1

Om de luchtdichtheid te kunnen uitdrukken in de verschillende eenheden, zoals aangehaald in hoofdstuk 3.1, dienen een aantal gegevens van de woning bepaald te worden. Deze gegevens werden bepaald aan de hand van 3D-modellen, getekend op basis van de architectuurplannen, volgens de norm. Bij deze woning is de garage meegerekend in het beschermd volume.

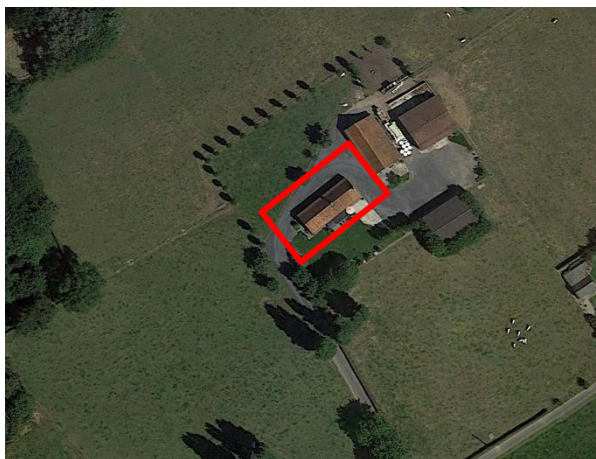
Tabel 2: volumes en oppervlaktes W1

Beschermd Volume		578,35	m ³
Testoppervlakte	A_t	456,39	m ²
Binnenvolume	V_{int}	467,42	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A_E	399,22	m ²

5.1.2 Testwoning 2

De tweede woning die getest werd, betreft een renovatie. De woning werd reeds gebouwd rond 1930. In 1998 werd de woning voor een groot deel gerenoveerd. Naast een volledige nieuwe inrichting werden de buitenmuren geïsoleerd en voorzien van een nieuwe gevelsteen, alle buitenschrijnwerk werd vernieuwd en er werd een deel uitgebreid. De bestaande dakconstructie werd niet gewijzigd.

De woning bevindt zich in een agrarisch gebied, bovenop een heuvel. Er is dus een grote blootstelling aan wind met weinig omgevingselementen in de nabije omgeving.



Figuur 15: situeringsplan W2 – bron: Google



Figuur 16: gevelaanzicht W2

Voor het beschermd volume werd het volume van de volledige benedenverdieping genomen. Omdat de vloeroppervlakte onder het hellend dak niet gebruikt wordt, en de tussenvloer geïsoleerd is, wordt de hoogte van het beschermd volume beperkt tot het plafond van het gelijkvloers.

Tabel 3: volumes en oppervlaktes W2

Beschermd Volume		505,98	m ³
Testoppervlakte	A _t	517,94	m ²
Binnenvolume	V _{int}	354,39	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A _E	430,31	m ²

5.1.3 Testwoning 3

De derde woning waarbij metingen werden uitgevoerd is een halfopen bebouwing. De woning is gelegen in een stedelijke omgeving. Het bouwjaar is 2017, het betreft dus een zeer recente woning. Als bouwconcept werd gestreefd naar een passiefwoning. Er is veel aandacht besteed aan het energieconcept, en bijgevolg ook aan de luchtdichtheid.



Figuur 17: situeringsplan W3 – bron: Lapeirre



Figuur 18: gevelaanzicht W3

De gesloten woningen hebben het passiefhuiscertificaat. De geteste woning heeft dit certificaat niet, omwille van het feit dat het een halfopen bebouwing is. Er wordt daardoor niet voldaan aan de opgelegde maximale n_{50} -waarde van 0,6 1/h. De woning blijft echter wel zéér goed scoren op gebied van luchtdichtheid. De woning is gelegen in een vrij dicht bebouwde voorstedelijke omgeving. De invloed van de wind is hier bijgevolg eerder beperkt.

Deze woning werd gekozen als testwoning omwille van het beperkte volume, en de benadering van het passiefconcept. Het beschermd volume omvat de volledige woning.

Tabel 4: volumes en oppervlaktes W3

Beschermd Volume		367,49	m ³
Testoppervlakte	A_t	261,28	m ²
Binnenvolume	V_{int}	280,69	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A_E	260,89	m ²

5.1.4 Testwoning 4

De woning met als code W4 in het verdere vervolg van deze scriptie betreft een open bebouwing. De woning werd volledig herbouwd in 2015 op klassieke bouwwijze (spouwmuren en houten hellend dak). De woning voldoet aan alle EPB-eisen, die in die periode van toepassing waren. Het E-peil bedraagt E43. Bij de EPB-aangifte werd geen luchtdichtheidstest uitgevoerd. Voor de ventilatievoorziening wordt gewerkt met het systeem D.



Figuur 19: situeringsplan W4 - bron: Lapeirre



Figuur 20: gevelaanzicht W4 – bron: Lapeirre

De woning situeert zich in een open agrarisch gebied. In de nabije omgeving zijn weinig gebouwen terug te vinden. Op die manier heeft de wind vrij spel rondom de woning.

Het binnenvolume van het gebouw bedraagt 639,49 m³. Het is dus een ruime woning. Zo kan gecontroleerd worden of de Pulsetest op grote, recente woningen kan toegepast worden. In Tabel 5 zijn de volumes en verliesoppervlaktes van deze woning terug te vinden. Deze waarden worden gebruikt om de verschillende grootheden te bepalen.

Tabel 5: volumes en oppervlaktes W4

Beschermd Volume		854,82	m ³
Testoppervlakte	A _t	654,52	m ²
Binnenvolume	V _{int}	639,49	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A _E	533,25	m ²

5.1.5 Testwoning 5

Ook de vijfde woning is een vrijstaand gebouw. Zoals eerder vermeld is het doel om recente woningen te testen, ook deze woning voldoet aan deze vooropgestelde vereiste. Het bouwjaar is 2017. De woning bevindt zich langs een gemeenteweg en maakt zo deel uit van lintbebouwing. Het gebouw is opgetrokken in een houtskeletconstructie, met plat dak.

De bouwheer wou met deze woning een statement maken, en voor een E-peil van E0 gaan. Omwille van dit concept is veel aandacht besteed aan energiezuinigheid. Bij een houtskeletbouw dient extra aandacht besteed te worden aan de luchtdichtheid. Omwille van het doel om een laag E-peil te halen was er bij deze woning zeker voldoende aandacht voor de luchtdichtheid. Net zoals bij de voorgaande nieuwbouwwoningen is ook hier een ventilatiesysteem D voorzien.



Figuur 21: situeringsplan W5 – bron: Google



Figuur 22: gevelaanzicht W5 - bron: Dewaele

Tabel 6: volumes en oppervlaktes W5

Beschermd Volume		762,77	m ³
Testoppervlakte	A _t	596,13	m ²
Binnenvolume	V _{int}	545,61	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A _E	498,99	m ²

5.1.6 Testwoning 6

Dit gebouw werd getest in het kader van een andere opdracht door collega-studenten. Omdat zowel een Blowerdoormeting als Pulsemeting uitgevoerd zijn, werd het gebouw ook opgenomen in deze scriptie.

Testwoning 6 betreft een halfopen nieuwbouwwoning gebouwd in 2015. De woning bevindt zich in een kleine dorpskern met in hoofdzaak vrijstaande woningen in de dichte omgeving. De woning is uitgevoerd met spouwmuren en metselwerk als afwerking. Het hellend dak is uitgevoerd met houten spanten. Bij de EPB-aangifte werd reeds een luchtdichtheidsmeting uitgevoerd door een erkend luchtdichtheidsmeter. Het gemeten luchtlekdebiet bij 50 Pa bedroeg toen 2135 m³/h. Voor dit gebouw kwam dit overeen met een n₅₀-waarde van 1,71 l/h.

Het beschermd volume omvat zowel het gelijkvloers, de 1^{ste} verdieping als de kelder. De zolderverdieping hoort niet bij het beschermd volume.

Tabel 7: volumes en oppervlaktes W6

Beschermd Volume		onbekend	m ³
Testoppervlakte	A _t	1259,00	m ²
Binnenvolume	V _{int}	1245,00	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A _E	onbekend	m ²

5.1.7 Testwoning 7

Net zoals woning W6 werden de metingen hier uitgevoerd door andere studenten in het kader van een opdracht betreffende ventilatie. Hierbij werden ook luchtdichtheidsmetingen uitgevoerd.

De zevende testwoning is een vrijstaande eengezinswoning. Het bouwjaar is 2012. Ook deze woning is op klassieke wijze gebouwd: spouwmuren met een houten dakconstructie. De woning bevindt zich in de buitenrand van een kleine stad. In de dichte omgeving zijn in hoofdzaak sociale woonwijken en residentiële woningen terug te vinden. Bij de oplevering werd reeds een luchtdichtheidsmeting (met Blowerdoor) uitgevoerd. Het infiltratievoud bij 50 Pa bedroeg toen 0,47 1/h. Het betreft bijgevolg een zeer luchtdichte woning.

Het beschermd volume omvat het gelijkvloers en de 1^{ste} verdieping, met uitzondering van de garage en de zolder.

Tabel 8: volumes en oppervlaktes W7

Beschermd Volume		onbekend	m ³
Testoppervlakte	A _t	onbekend	m ²
Binnenvolume	V _{int}	710,65	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A _E	518,69	m ²

5.1.8 Testwoning 8

Deze testwoning is een halfopen bebouwing. Het precieze bouwjaar is niet gekend, maar afgaande op de bouwstijl is de woning in de jaren 50 à 60 gebouwd. In 2012 werd de woning grondig gerenoveerd en omgebouwd tot kantoor. Naast het vernieuwen van het schrijnwerk en de gebouwindeling werd ook een deel bijgebouwd. Hier is niet meteen extra aandacht besteed aan luchtdichtheid, zoals bij nieuwbouwwoningen tegenwoordig wel het geval is.

Omwille van het feit dat het buitenschrijnwerk vervangen werd, diende volgens de EPB-normen ventilatie voorzien te worden. Er werd gekozen om een systeem D te installeren.

Het gebouw bevindt zich langs een drukke gewestweg met een mix van residentiële woningen en verschillende kmo's in de dichte omgeving.



Figuur 23: situeringsplan W8 – bron: Google



Figuur 24: gevelaanzicht W8

Het beschermd volume omvat het gelijkvloers en 1^{ste} verdieping, met uitzondering van de zolderverdieping.

Tabel 9: volumes en oppervlaktes W8

Beschermd Volume		670,32	m ³
Testoppervlakte	A _t	475,98	m ²
Binnenvolume	V _{int}	486,60	m ³
Oppervlakte gebouwschil	A _E	478,01	m ²

5.2 Meetapparatuur

5.2.1 Blowerdoor

De testen werden uitgevoerd met een Minneapolis Blower Door. Het meetinstrument is een DG-700 Pressure & Flow Gauge (serienummer: 16730-107). Het meetinstrument werd gekalibreerd op 15/03/2016 door Energy Conservatory Calibration. De gegevens werden verwerkt door middel van Tectite Express 4.1 software.

De metingen werden uitgevoerd volgens de voorgeschreven normen.

5.2.2 Pulse

Het Pulsemeettoestel is de Pulse 60. Het getal 60 verwijst naar het luchtvat. De capaciteit bedraagt namelijk (in theorie) 60liter. Na onderzoek van de fabrikant bleek dat het luchtvat slechts 58,5 liter bevat. De software was geschreven voor het vat van 60liter. Op die manier zat er een foutenmarge van 2,5% op de resultaten. Het gegeven van volumeverminderingen is door de schrijver aangepast bij de software van het huidige toestel. De fout werd pas ontdekt nadat reeds 4 woningen uit deze masterproef getest waren. De resultaten van deze metingen werden gecorrigeerd.

Omdat voor het meten van de luchtdichtheid nog geen specifieke norm uitgewerkt is, wordt voor de voorbereiding de huidige norm NBN EN ISO 9972:2015 gevolgd.

5.2.3 Registratie drukverschil

Om het effect van de Pulse meting in de woning te registreren werd de drukmeter van de Blowerdoor gebruikt (zie paragraaf 5.2.1). Dit is de DG-700 (serienummer: 16730-107). Het loggen van het drukverschil werd opgeslagen door middel van de software TECLOG 3.

Configuration Settings (Saved when Storing Configuration File)

Acquisition

Sample Interval: 0.1 seconds
Pressure Autozero Interval: 1.00 minutes

Graph

Graph Memory during Recording: 18000 points
Auto Time Interval: 10.0 minutes
Auto-scroll Mode: 25% Scroll
☐ White Background
☒ Horizontal Grid
☐ Vertical Grid
Event Marker Color: ■ Period Of Record Color: ■
Baseline POR Length: 120 seconds
Fan-On POR Length: 30 seconds

Advanced

Startup y-max value: 100.0
Startup y-min value: -100.0
☐ Automatic File Capture
☒ Dynamic Time Scrollbar
☐ Daily File Save
Skip this port during device search: None

Device Settings

Device Type	Serial #	Device Label	link
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒
☐ select			☒

Scan for Ports/Devices View and Edit Channel Settings Configure WiFi Link Settings

Airtightness Test Settings

Test Standard: ☐ ASTM E779 ☒ EN 13829 ☐ CGSB
☐ USACE Compliant ☐ Weighted Regression
Temperature Units: ☐ Degrees F ☒ Degrees C
Flow Units: ☐ CFM ☐ L/s ☒ m³/h
Length Units: ☐ Feet, inches ☒ Meters, cm

☐ SAVE AS DEFAULT CONFIGURATION

Changes made to this screen will be applied to the already running program if you click OK. All of the configurable settings are on this screen. If you would like these settings to also be automatically applied next time you run Teclog click on SAVE AS DEFAULT CONFIGURATION before clicking OK.

Restore Factory Settings (U.S.) Restore Factory Settings (Europe) OK Cancel

Figuur 25: configuratie TECLOG 3

Een nadeel van deze software is het tijdsinterval waarmee de drukverschillen geregistreerd worden. Het interval tussen de metingen bedraagt 0,1 seconde. Terwijl de Pulse een meting uitvoert om de 0,02 seconden. Bij de verwerking van de resultaten wordt de start van de drukstijging door de Pulse gesynchroniseerd. Door het verschil in tijdsinterval dienen de meetpunten van de Pulse ook om de 0,1 seconde genomen te worden.

Het doel van deze registratie is om na te gaan of de Pulse in de volledige woning merkbaar is. Om die reden wordt het drukverschil geregistreerd in een ruimte in de woning die relatief ver gelegen is van het Pulse toestel.

5.3 Metingen volgens norm

Alle metingen in het kader van deze scriptie worden uitgevoerd volgens de voorgeschreven normen. Ook de voorbereidingen worden uitgevoerd volgens de norm, aangevuld met de technische specificatie STS-P-71-3 (FOD Economie, 2014). Onder de voorbereidingen van het gebouw wordt onder meer het uitzetten van het ventilatiesysteem, het afdichten van de toe- en afvoermonden en het sluiten van de bewust gemaakte openingen verstaan.

De Blowerdoormetingen worden uitgevoerd volgens de norm NBN EN ISO 9972:2015, deze norm vervangt sinds kort de vorige norm NBN EN 13829:2000 (Belgisch instituut voor normalisatie (BIN), 2015).

6. Meetresultaten

Bij de Blowerdoor worden de waarden bij een drukverschil van 50 Pa en 4 Pa weergegeven. Deze waarden worden afgeleid uit de Tectite 4.1 software.

Voor de afkortingen en specifieke uitleg over het berekenen van de verschillende grootheden wordt verwezen naar hoofdstuk 3.1. Het infiltratievoud, de luchtdoorlatendheid van de gebouwschil, de EPB-waarde en de luchtdoorlatendheid per eenheid van vloeroppervlakte worden berekend. Om de resultaten te vergelijken worden in hoofdzaak het luchtlekdebiet $\dot{V}_{\Delta p}$ en het infiltratievoud $n_{\Delta p}$ gebruikt. Het luchtlekdebiet wordt gebruikt omdat dit de gemeten waarde is via de meettoestellen, zonder dat er een berekening op basis van oppervlaktes of volumes van gebouwen aan te pas komt. Het infiltratievoud wordt dan weer internationaal het meest gebruikt om de luchtdichtheid van verschillende gebouwen met elkaar te vergelijken.

Belangrijk is nog te vermelden dat binnen één Pulsemeting 1, 2 of 3 verschillende drukstijgingen gecreëerd kunnen worden. In de beschrijvingen van de metingen wordt één Pulsemeting gezien als het totaal van deze drukstijgingen. Per Pulse (bestaande uit 1, 2 of 3 drukstijgingen) wordt eventueel verwezen naar de 1^{ste}, 2^{de} of 3^{de} meting. In de meeste gevallen worden per Pulse 2 metingen (dus 2 drukverschillen) uitgevoerd.

6.1 Testwoning 1

De metingen van deze woning werden vooral gebruikt om ervaring op te doen met het meettoestel. Dit is onder meer van belang om een goede balans tussen het volume en de luchtdruk in het vat te vinden.

6.1.1 Blowerdoor

In deze paragraaf worden de meetresultaten van de Blowerdoor weergegeven. Omdat het de eerste woning betreft die getest wordt, worden zowel de volledige woning als een aantal aparte ruimtes (kleinere volumes) getest. De grafieken van iedere Blowerdoormeting zijn terug te vinden in bijlage.

Omdat in de woning geen ventilatievoorzieningen aanwezig zijn, werden geen maatregelen genomen om 'bewuste gemaakte openingen' af te sluiten.



Figuur 26: opstelling W1 - BD

Tabel 10: meetresultaten W1 - BD – OO - volledige woning

W1	Volledige woning			
	Over- en onderdrukmeting			
		50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	3962,0	801,0	m ³ /h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	8,48	1,71	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	9,92	2,01	m ³ /(h.m ²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	8,68	1,76	m ³ /(h.m ²)
	$w_{\Delta P}$	38,33	7,75	m ³ /(h.m ²)

Bovenstaande tabel geeft het resultaat weer van de over- en onderdrukmeting van de volledige woning. Uit de resultaten kan afgeleid worden dat de woning (met inbegrip van de garage) vrij goed scoort gezien

de leeftijd van de woning. Omdat de Pulse enkel overdruk meet, wordt dat resultaat weergegeven in Tabel 11.

Tabel 11: meetresultaten W1 - BD – O - volledige woning

W1	Volledige woning			
Overdrukmeting				
		50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	3959,0	825,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	8,47	1,77	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	9,92	2,07	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	8,67	1,81	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	38,30	7,98	m³/(h.m²)

Omdat een garage vaak grote luchtverliezen vertoont, wordt de Blowerdoor ook uitgevoerd zonder de garage binnen het beschermd volume. De resultaten van deze metingen zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 12: meetresultaten W1 - BD – OO – volume 2

W1	Volume 2							
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2775,0	578,0	2662,0	561,0	2718,5	569,5	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	6,70	1,40	6,43	1,36	6,57	1,38	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	7,19	1,50	6,89	1,45	7,04	1,47	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	6,25	1,30	6,00	1,26	6,12	1,28	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	33,87	7,05	32,49	6,85	33,18	6,95	m³/(h.m²)

De meetresultaten van de meting in overdruk zijn in onderstaande tabel terug te vinden.

Tabel 13: meetresultaten W1 - BD - O – volume 2

W1	Volume 2							
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2898,0	608,0	2754,0	586,0	2826,0	597,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	7,00	1,47	6,65	1,42	6,83	1,44	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	7,50	1,57	7,13	1,52	7,32	1,55	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	6,53	1,37	6,20	1,32	6,37	1,34	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	35,37	7,42	33,61	7,15	34,49	7,29	m³/(h.m²)

Bij het vergelijken van de resultaten is er een duidelijk verschil te zien tussen de meting met de garage binnen het beschermd volume, en de garage erbuiten. Er is, zoals verondersteld, inderdaad een groot luchtlekverlies in de garage.

Om dat luchtlekverlies te begroten, wordt voor de garage apart nog een meting uitgevoerd. Deze resultaten zijn in Tabel 14 terug te vinden.

Tabel 14: meetresultaten W1 - BD – OO – volume 3

W1	Volume 3							
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	1579	300	1546,0	296,0	1562,5	298,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	29.49	5,60	28,87	5,53	29,18	5,56	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	17,29	3,28	16,93	3,24	17,11	3,26	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	73,79	14,02	72,24	13,83	73,01	13,93	m³/(h.m²)

Met een n_{50} -waarde van 29,49 1/h bevat de garage duidelijk een groot lek. De oorzaak hiervan is onder meer een verluchtingsrooster voor de verwarmingsinstallatie en de doorvoer van de rookafvoer doorheen het plafond (zie onderstaande afbeelding). Door het hoge drukverschil in een beperkt volume kan wel verondersteld worden dat dit resultaat een overschatting is van het werkelijk verlies.



Figuur 27: luchtlek garage - W1

Omwille van het feit dat er Pulsemetingen uitgevoerd werden in een kleiner volume, worden van deze volumes ook Blowerdoormetingen uitgevoerd. Het beperkte volume omvat de woonkamer en de keuken. De deuren die deze ruimtes afsluiten worden gesloten.

Tabel 15: meetresultaten W1 - BD – OO – volume 1

W1	Volume 1							
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	871,0	190,0	926,0	209,0	898,5	199,5	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	7,64	1,67	8,12	1,83	7,88	1,75	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	5,16	1,13	5,49	1,24	5,33	1,18	m³/(h.m²)
	$V_{\Delta P}$ (EPB)	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	19,10	4,17	20,30	4,58	19,70	4,37	m³/(h.m²)

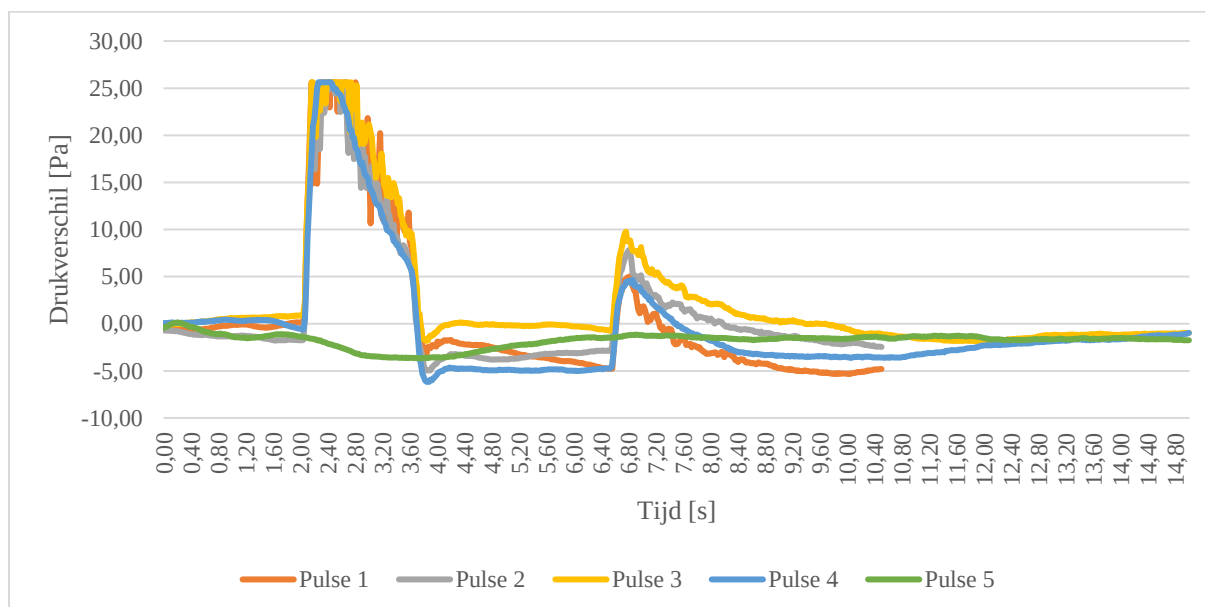
Tabel 16: meetresultaten W1 - BD – O – volume 1

W1	Volume 1							
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	942,0	198,0	944,0	203,0	943,0	200,5	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	8,26	1,74	8,28	1,78	8,27	1,76	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	5,58	1,17	5,59	1,20	5,59	1,19	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	20,65	4,34	20,70	4,45	20,68	4,40	m³/(h.m²)

6.1.2 Pulse

Omdat het de eerste woning betreft waar metingen uitgevoerd werden, zijn verschillende volumes getest. In totaal werden 40 metingen uitgevoerd.

Bij de eerste vijf metingen blijkt er een technisch probleem te zijn. De druk in het luchtvat wordt niet gemeten of geregistreerd. Dit maakt het niet mogelijk om het registreerde drukverschil om te zetten in een luchtlekdebiet. Een tweede probleem dat opduikt is het feit dat het luchtvat niet opnieuw opgeladen kan worden.

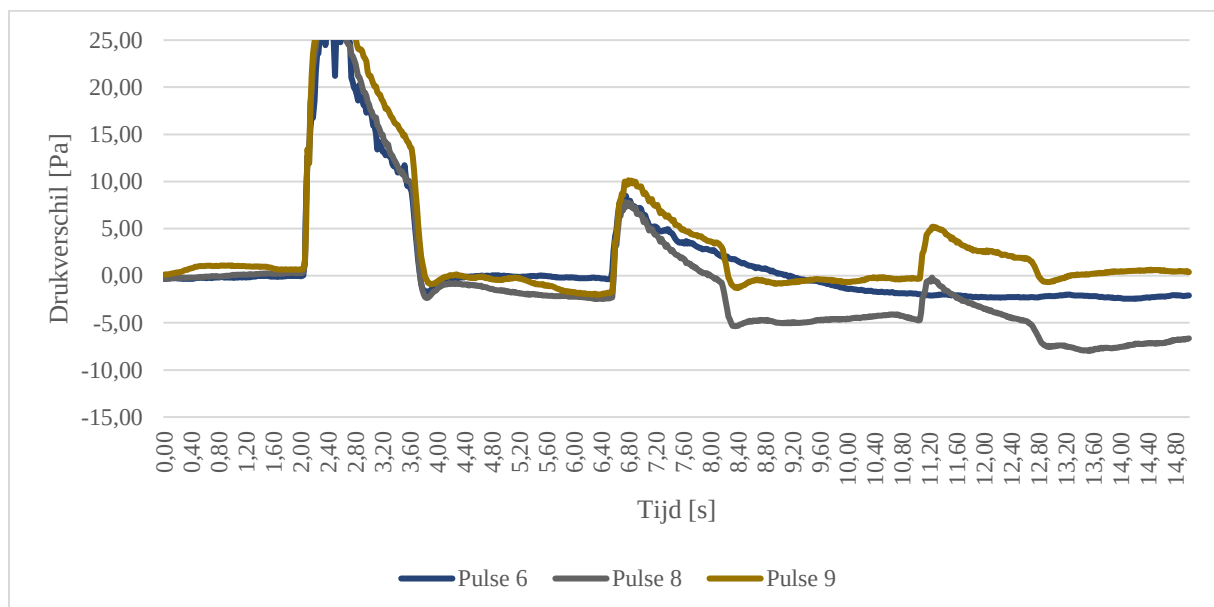


Figuur 28: Pulsemetingen – W1

Volume 1

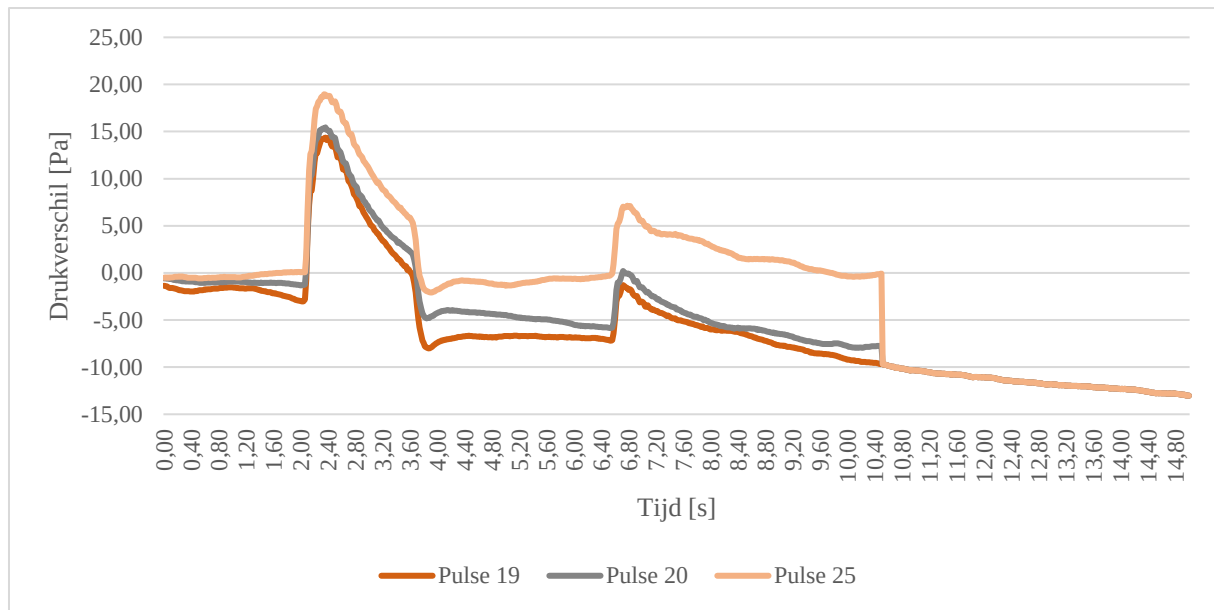
Eenmaal de problemen opgelost waren, werd het eerste volume getest. Hiervoor werden de woonkamer en de keuken samengenomen. Alle deuren die deze ruimtes afsluiten werden gesloten. Omdat er geen ventilatievoorzieningen of andere ‘bewust gemaakte openingen’ in deze ruimtes aanwezig waren, dienden hiervoor geen maatregelen genomen te worden.

Op Figuur 29 en Figuur 30 zijn Pulsemetingen voorgesteld die voldoen aan alle voorwaarden en op die manier een betrouwbaar meetresultaat opleveren. Ondanks het feit dat Pulse 6, Pulse 8 en Pulse 9 het maximum meetbereik van de drukmeter bereiken, kan een resultaat berekend worden. Het luchtlekdebiet van Pulse 6 bedraagt 236,52 m³/h, van Pulse 8 is dat 166,32 m³/h. Bij Pulse 9 wordt een luchtlekdebiet van 155,88 m³/h gemeten. Deze waarde werden berekend bij een drukverschil van 4 Pa. Het luchtlekdebiet bij Pulse 6 ligt duidelijk hoger dan bij de andere twee metingen.



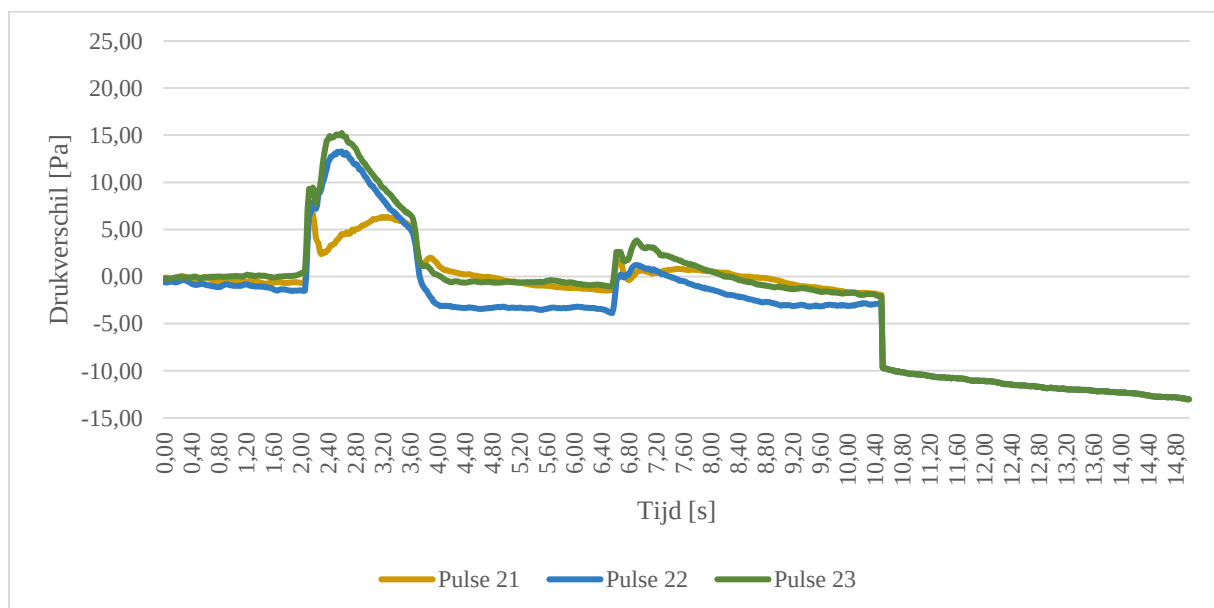
Figuur 29: Pulsemetingen - W1 - 1 (1)

Bij Pulse 19 wordt bij 4 Pa een luchtlekdebiet van 114,12 m³/h gemeten. Bij Pulse 20 bedraagt $\dot{V}_4$ 118,08 m³/h. En bij Pulse 25 bedraagt het luchtlekdebiet 102,24 m³/h. Opvallend is dat deze waarden opnieuw lager liggen dan bij de metingen van Pulse 6, Pulse 8 en Pulse 9. Een verklaring hiervoor is niet meteen te vinden.



Figuur 30: Pulsemetingen - W1 - 1 (2)

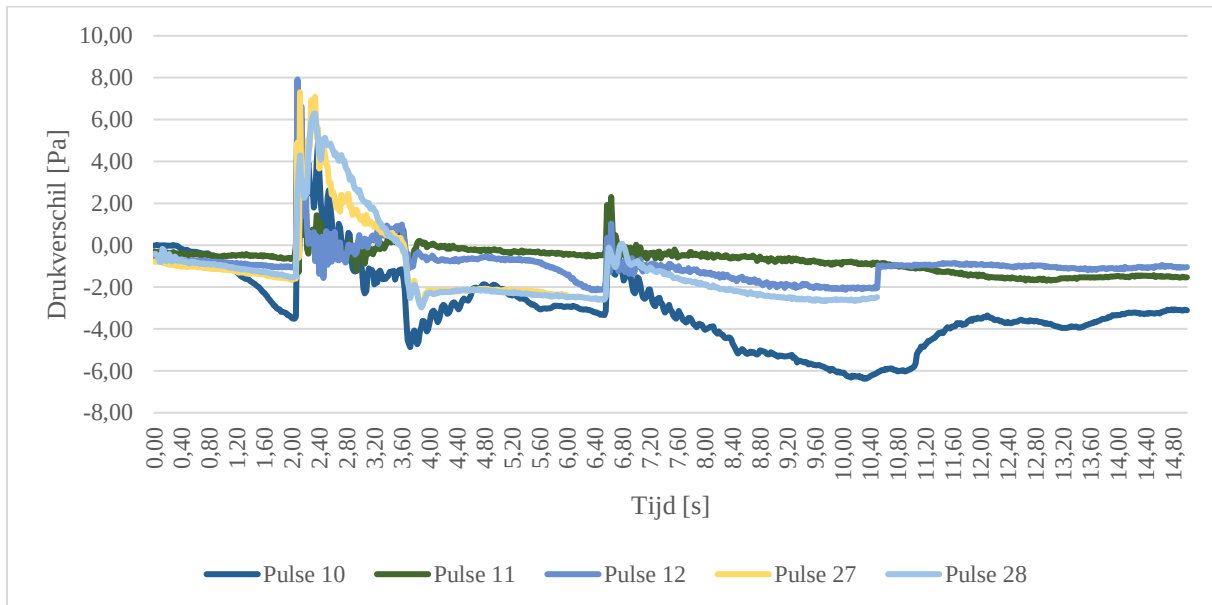
Op onderstaande grafieken zijn metingen te zien waarbij de meetopstelling van de Blowerdoor zich nog in de deuropening bevindt. Wanneer het doek voldoende aangespannen is kunnen goede metingen bekomen worden. Bij Pulse 21 is bij de eerste meting een duidelijke drukval te zien. De tweede meting verloopt wel goed, zodat weldegelijk een resultaat gemeten kan worden. Het gemeten luchtdebiet bedraagt 119,52 m³/h. Dit is echter wel beduidend lager dan de meetresultaten van Pulse 22 (199,80 m³/h) en Pulse 23 (230,76 m³/h). Bij deze laatste twee metingen wordt net niet voldaan aan de voorwaarden bij meting 1, terwijl bij de eerste meting van Pulse 21 de R²-waarde 0,1176 bedraagt en de n-waarde -0.4479. De R²-waarde dient minimaal 0,98 te bedragen, terwijl de n-waarde zich tussen 0,50 en 1,00 dient te bevinden. Het verschil kan eventueel hierdoor verklaard worden. Alle deze parameters van alle metingen zijn overigens terug te vinden in bijlage.



Figuur 31: Pulsemetingen - W1 - 1 (3)

Volume 2

Op onderstaande afbeeldingen zijn alle Pulsemetingen te zien die uitgevoerd werden in volume 2. Dit is het volledig beschermd volume, met uitzondering van de garage. Op Figuur 32 is het drukverloop per meting, die niet voldoet aan de voorwaarden, te zien.



Figuur 32: Pulsemetingen - W1 - 2 (1)

Figuur 33 toont het drukverloop van de metingen die wel voldoen aan de voorwaarden. Het verschil met de voorgaande grafieken is duidelijk. Het drukverloop dient relatief constant te verlopen en de theoretisch gesuggereerde vorm te benaderen.



Figuur 33: Pulsemetingen - W1 - 2 (2)

Het gemeten luchtlekdebiet bij Pulse 26 bedraagt 306,72 m³/h. Bij Pulse 29 is dat 522,36 m³/h en bij Pulse 30 is $\dot{V}_4 = 549,72$ m³/h. Opmerkelijk is het grote verschil tussen het gemeten luchtlekdebiet van Pulse 26 ten opzichte van Pulse 29 en Pulse 30. Het verschil is ook te zien op de grafieken. Pulse 29 en Pulse 30 verlopen zeer gelijkaardig, terwijl Pulse 26 een snellere drukdaling bevat. Het enige verschil tussen de metingen is de positie van het Pulse toestel in het gebouw. Bij Pulse 26 staat het toestel op het gelijkvloers, terwijl deze bij Pulse 29 en 30 op de 1^{ste} verdieping staat. De meetresultaten van Pulse 29 en Pulse 30 liggen dicht bij de meetresultaten van de Blowerdoor, terwijl het luchtlekdebiet van Pulse 26 ruw geschat ongeveer de helft bedraagt.

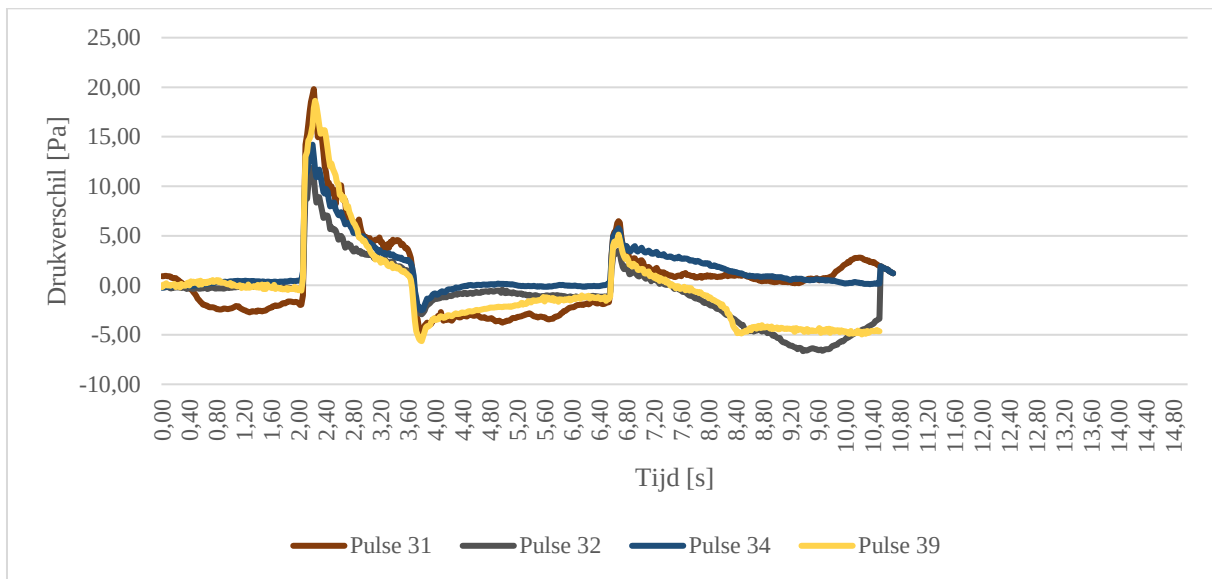
De combinatie van de relatief beperkte luchtdichtheid met het relatief groot volume zorgt ervoor dat de drukstijging eerder beperkt is. Bij deze metingen wordt een maximaal drukverschil van iets minder dan 8 Pa behaald. Het luchtvat wordt maximaal opgeladen. Dit gegeven zorgt ervoor dat het niet mogelijk is om de volledige woning (met garage) te testen. De garage bevat namelijk een groot luchtlek en zorgt daarbij nog voor een extra toevoeging aan het te meten volume. Op die manier is het niet mogelijk om het vereiste drukverschil van 4 Pa te behalen.



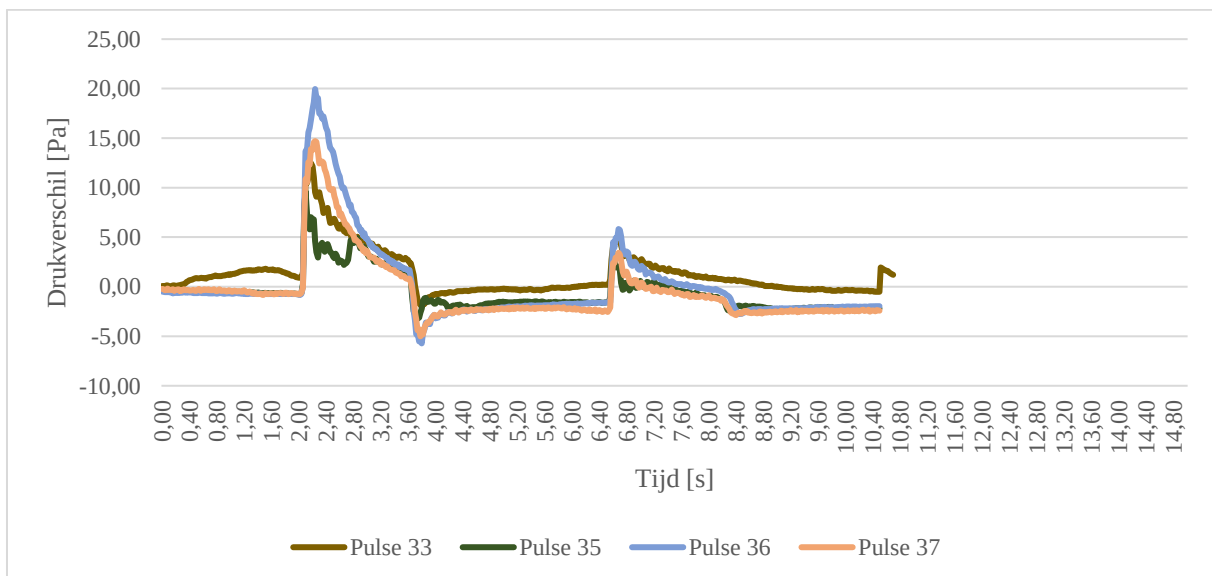
Figuur 34: meetopstelling Pulse - W1

Volume 3

Het derde gemeten volume bedraagt 53,55 m³. Uit blowerdoormetingen blijkt de garage een groot luchttek te bevatten. Op Figuur 35 is de grafiek terug te vinden met de metingen waarvan geen correct meetresultaat bepaald kon worden. Dit omdat niet voldaan werd aan de voorwaarden. In de meeste gevallen wordt nét niet aan de voorwaarden voldaan en is het verschil minimaal). Voor bepaalde metingen is het verschil met de goede metingen wel zichtbaar (zie Figuur 36). De metingen in de grafiek op Figuur 36 vertonen een constanter verloop.



Figuur 35: Pulsemetingen - W1 - 3 (1)

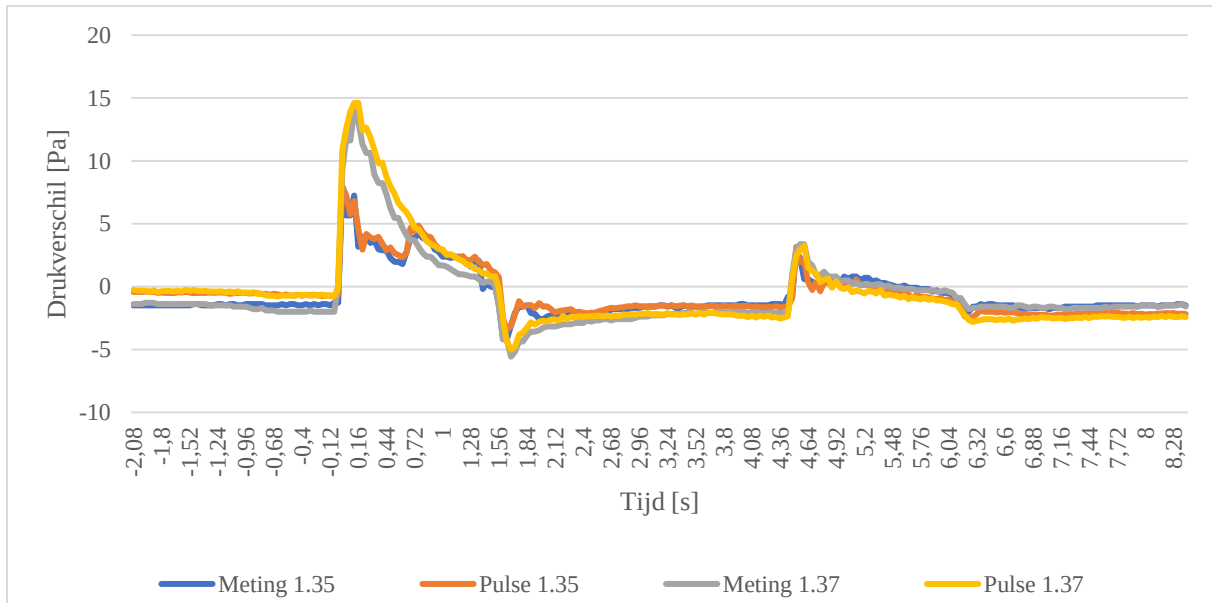


Figuur 36: Pulsemetingen - W1 - 3 (2)

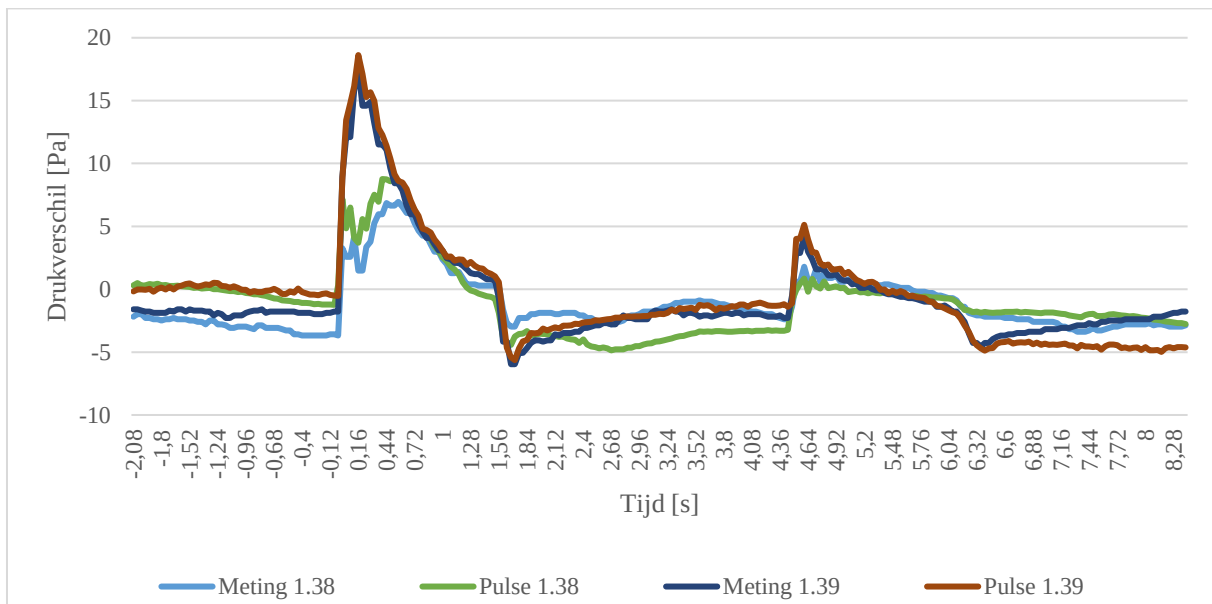
Bij Pulse 33 voldoen zowel de eerste als de tweede meting per puls aan de voorwaarden. De eerste meting meet een luchttekdebiet bij 4 Pa van 138,24 m³/h, de tweede een luchttekdebiet van 139,68 m³/h. Bij Pulse 35 (176,04 m³/h), Pulse 36 (149,40 m³/h) en Pulse 37 (159,48 m³/h) voldoet telkens één meting.

6.1.3 Drukverschil

Bij Pulsemetingen 35 tot 39 wordt het drukverschil in volume 3 (garage) ook door een ander meettoestel geregistreerd (DG-700). In principe zijn deze metingen bedoeld om het drukverschil in andere ruimtes (ver van het Pulsetoestel) op te meten. Hierbij wordt echter in dezelfde ruimte gemeten. De drukverlopen zouden bijgevolg perfect overeen dienen te komen. Er wordt enkel een ander referentiepunt genomen, waardoor een eventuele asverschuiving mogelijk is



Figuur 37: registratie drukverschil 1 - W1



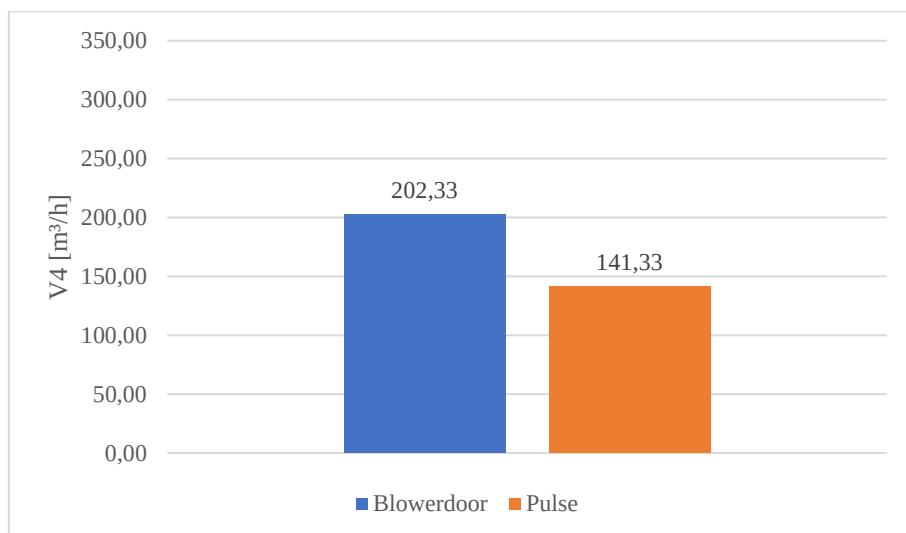
Figuur 38: registratie drukverschil 2 - W1

Op bovenstaande grafieken is zichtbaar wat reeds verondersteld werd. Het drukverloop gemeten door de verschillende meetinstrumenten komt volledig overeen. Enkel bij meting 1.38 zijn de verschillen groter. Dit komt omdat deze meting uitgevoerd werd met de Blowerdoor meetopstelling in de deuropening.

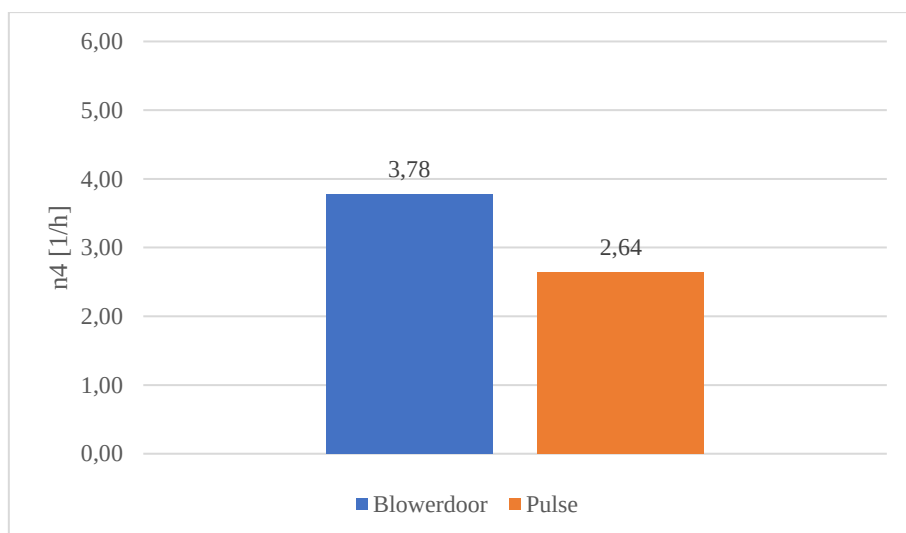
6.1.4 Vergelijking

Volume 1

Het eerste gemeten volume bevat de woonkamer en de keuken. Het binnenvolume hiervan bedraagt 114,03 m³. Het gemiddeld gemeten luchtlekdebiet (bij 4 Pa) van de Blowerdoor bedraagt 202,33 m³/h. Bij de Pulsemeting wordt een gemiddeld debiet van 141,33 m³/h gemeten. Voor dit volume komt dit overeen met een infiltratievoud van 2,64 m³/h. De waarden van de Pulse bedraagt bijgevolg 69,85% van de waarden die bij de Blowerdoor verkregen werden.

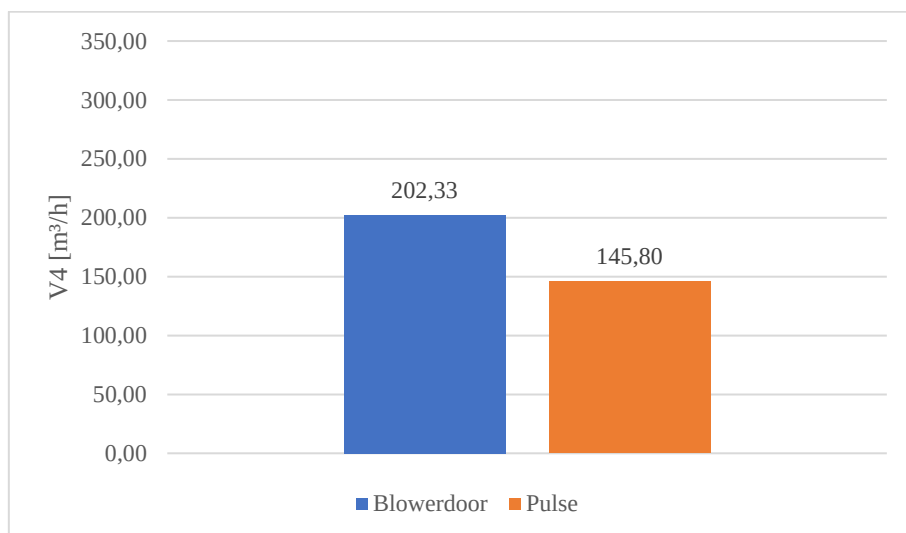


Figuur 39: vergelijking V_4 -waarde volume 1 (a) - W1

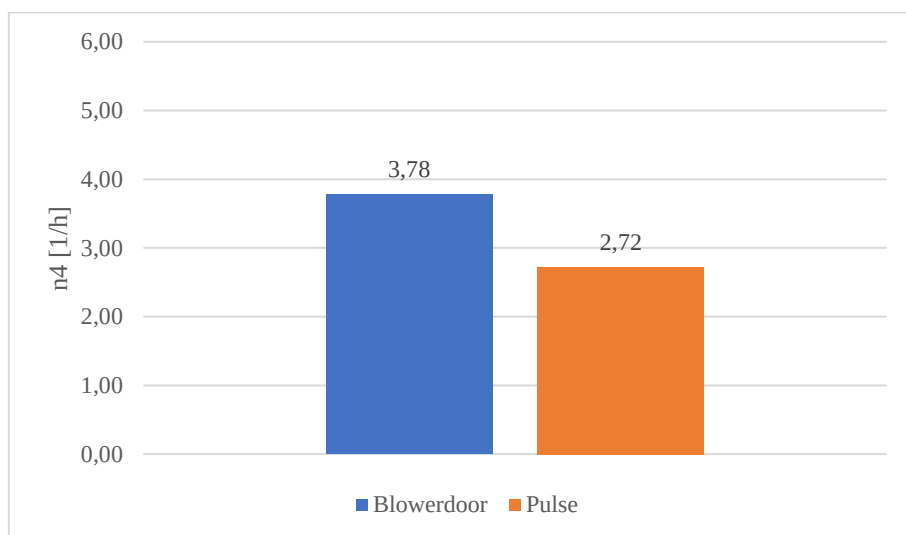


Figuur 40: vergelijking n_4 -waarde volume 1 (a) - W1

Bij een aantal Pulsemetingen werd de meting uitgevoerd met de opstelling van de Blowerdoor nog in de deuropening. Doel van deze metingen is het verlies van de Blowerdooropstelling na te gaan. Het gemiddelde luchtlekdebiet en infiltratievoud (bij 4 Pa) zijn terug te vinden op Figuur 41 en Figuur 42. Deze liggen iets hoger dan bij de meting zonder Blowerdooropstelling ($n_4 = 2,64$ 1/h). Hieruit kan niet meteen besloten worden wat het exacte verlies is van de meetopstelling, maar het indiceert dat er weldegelijk een verlies is. Uiteraard is er, om deze eventuele conclusie te staven, extra onderzoek nodig.



Figuur 41: vergelijking V_4 -waarde volume 1 (b) - W1

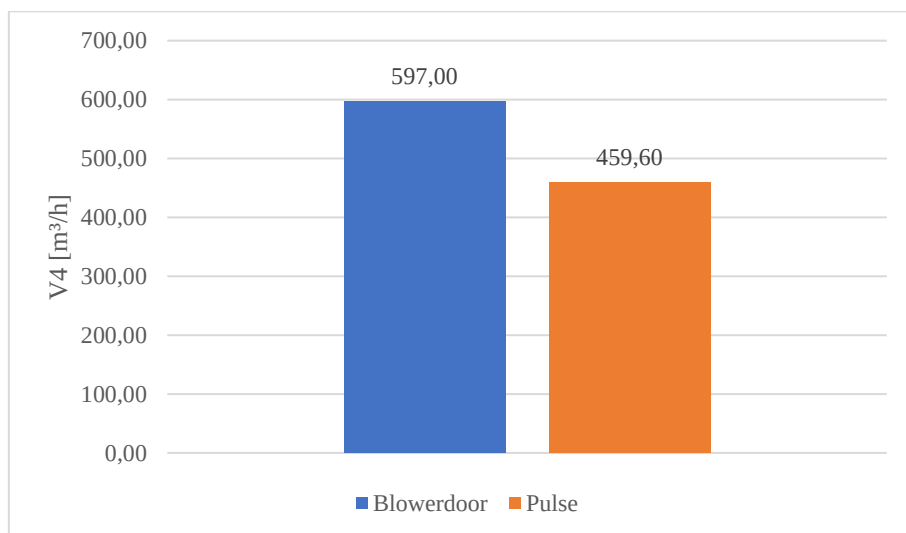


Figuur 42: vergelijking n_4 -waarde volume 1 (b) - W1

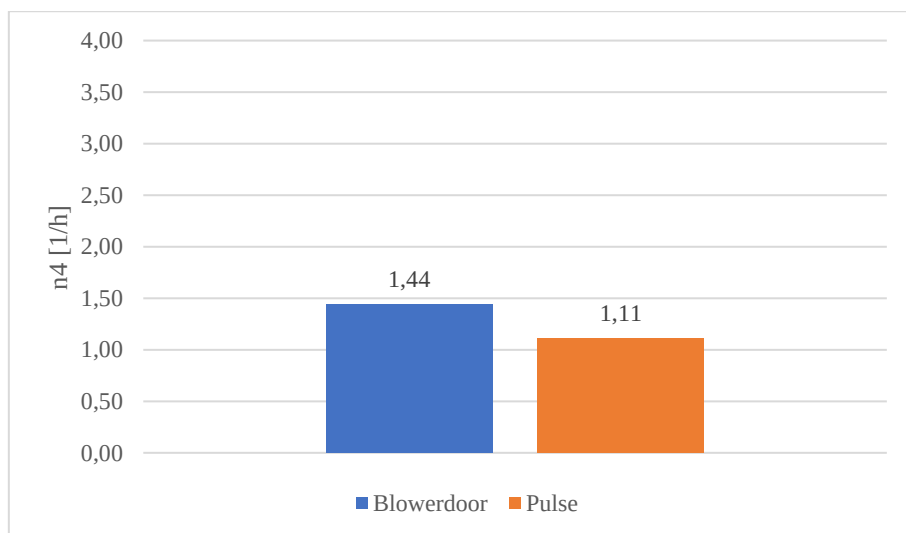
Volume 2

Het tweede gemeten volume omvat het volledig beschermd volume met uitzondering van de garage. Door het grote luchttekverlies in de garage blijkt het niet mogelijk om de volledige woning W1 te meten.

Van drie, van de in totaal acht metingen in dit volume, wordt een betrouwbaar resultaat gemeten. Het gemiddelde luchttekdebiet ($V_4 = 459,60 \text{ m}^3/\text{h}$) en infiltratievoud ($n_4 = 1,11 \text{ m}^3/\text{h}$) worden naast de resultaten van de Blowerdoor geplaatst. Er is te zien dat de resultaten een beperkt verschil hebben. De Pulsemetingen verhouden zich met 76,98% tot de Blowerdoormetingen.



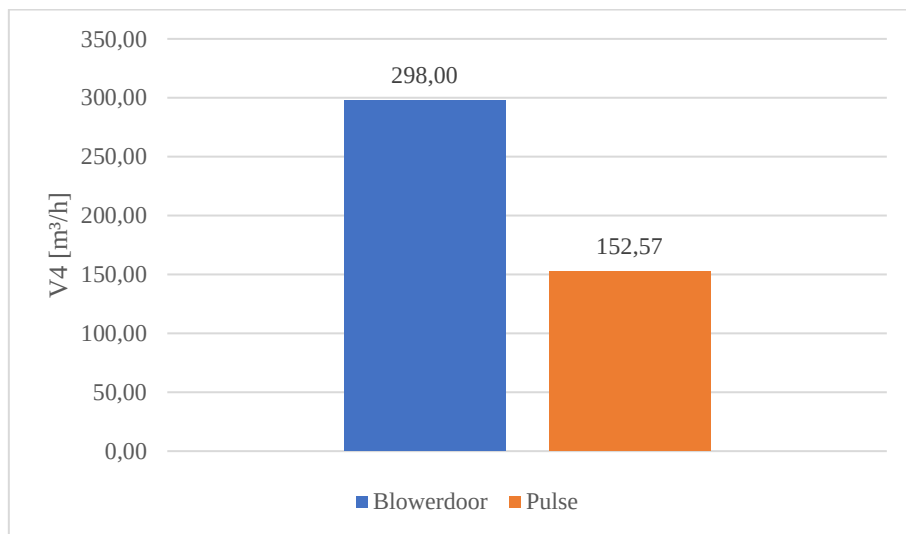
Figuur 43: vergelijking V_4 -waarde volume 2 - W1



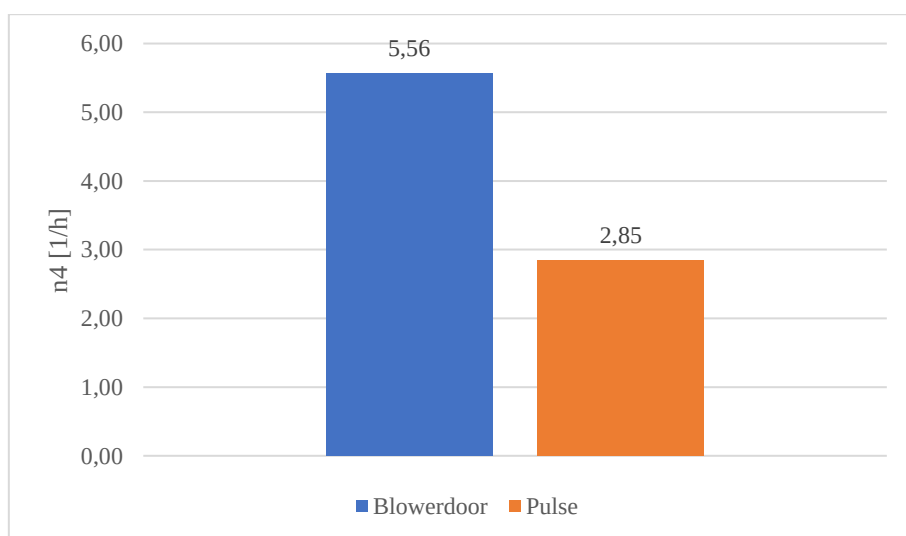
Figuur 44: vergelijking n_4 -waarde volume 2 - W1

Volume 3

Ook de garage (volume 3) wordt apart gemeten. Bij dit volume worden vier van de acht metingen als goede meting aanvaard. Het gemiddeld luchtlekdebiet van deze metingen bedraagt 152,57 m³/h. Deze waarde is gemeten bij een drukverschil van 4 Pa. Deze waarde ligt beduidend lager dan het gemeten luchtlekdebiet van de Blowerdoor ($V_4 = 298,0$ m³/h), namelijk 51,19% in verhouding tot de Blowerdoor. Dit is een duidelijk verschil met de verschillen bij voorgaande metingen. Het verschil is mogelijks te verklaren door het grote luchtlekverlies in de garage. Het luchtlek is duidelijk zichtbaar (zie Figuur 45). Mogelijks maakt de Blowerdoor een overschatting van de werkelijkheid door het meten bij grote drukverschillen.



Figuur 45: vergelijking V_4 -waarde volume 3 - W1



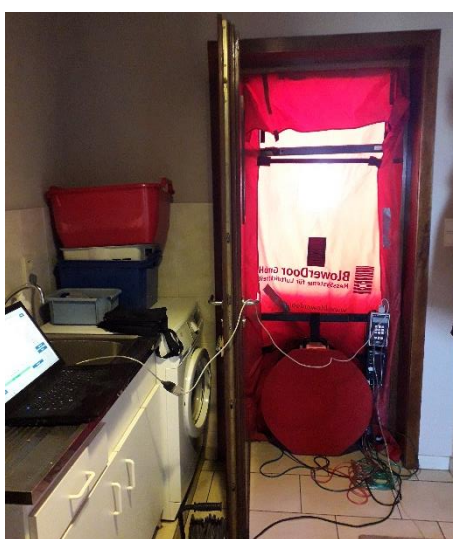
Figuur 46: vergelijking n_4 -waarde volume 3 - W1

6.2 Testwoning 2

6.2.1 Blowerdoor

Bij de tweede testwoning zijn in totaal vier over- en onderdrukmetingen uitgevoerd. Twee ervan omvatten het volledig beschermd volume. Om net zoals bij woning W1 een beperkter volume te testen zijn er ook een aantal metingen uitgevoerd zonder de garage. Om de garage buiten het gemeten volume te houden, werd de deur gesloten.

Bij deze woningen zijn in het toilet en de badkamer afvoeropeningen gemaakt volgens het systeem A. Deze roosters werden afgesloten. Er dienden geen andere maatregelen genomen te worden om de blowerdoortest correct uit te voeren. De blowerdoor werd in de achterdeur geplaatst.



Figuur 47: meetopstelling W2 - BD

Tabel 17: meetresultaten W2 – BD – OO – volledige woning

W2	Volledige woning							
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2532,0	533,0	2530,0	538,0	2531,0	535,5	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	7,14	1,50	7,14	1,52	7,14	1,51	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	5,88	1,24	5,88	1,25	5,88	1,24	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	4,89	1,03	4,88	1,04	4,89	1,03	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	17,58	3,70	17,56	3,73	17,57	3,72	m³/(h.m²)

Tabel 18: meetresultaten W2 - BD - O - volledige woning

W2		Volledige woning						
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2551,0	515,0	2516,0	540,0	2533,5	527,5	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	7,20	1,45	7,10	1,52	7,15	1,49	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	5,93	1,20	5,85	1,25	5,89	1,23	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	4,93	0,99	4,86	1,04	4,89	1,02	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	17,71	3,57	17,46	3,75	17,59	3,66	m³/(h.m²)

Met een n_{50} -waarde van 7,00 1/h scoort de woning op basis van het bouwjaar zeer goed. De woning werd, zoals vermeld in hoofdstuk 5.1.2, gerenoveerd in 1998. De combinatie van de bestaande volle muren met nieuwe isolatie en een nieuw buitenspouwblad kan de luchtdichtheidsscore verklaren. Daarnaast valt de dakconstructie buiten het beschermd volume. Hier zijn bij andere gebouwen dikwijls luchtlekken terug te vinden.

Tabel 19: meetresultaten W2 - BD - OO - zonder garage

W2	Zonder garage							
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2255,0	474,0	2280,0	498,0	2267,5	486,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	8,29	1,74	8,38	1,83	8,34	1,79	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	6,64	1,40	6,71	1,47	6,67	1,43	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	5,54	1,16	5,60	1,22	5,57	1,19	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	20,40	4,29	20,62	4,50	20,51	4,40	m³/(h.m²)

Tabel 20: meetresultaten W2 - BD - O - zonder garage

W2	Zonder garage							
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2256,0	466,0	2277,0	476,0	2266,5	471,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	8,30	1,71	8,37	1,75	8,33	1,73	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	6,64	1,37	6,70	1,40	6,67	1,39	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	5,54	1,14	5,59	1,17	5,57	1,16	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	20,41	4,21	20,60	4,31	20,50	4,26	m³/(h.m²)

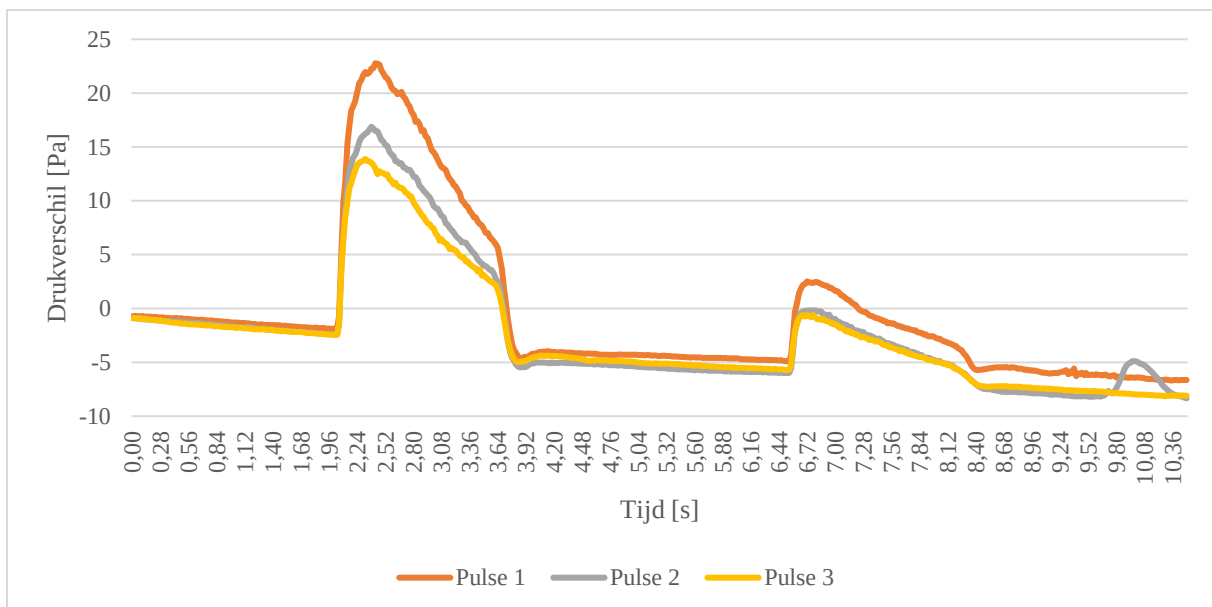
De metingen van het gebouw, zonder de garage binnen het gemeten volume, resulteren in een hogere n_{50} -waarde dan de metingen met de garage binnen het gemeten volume. Op zich is dat een opmerkelijk resultaat, aangezien in de meeste gevallen de luchtlekken zich in de garage bevinden. In dit geval bevinden de meeste luchtlekken zich niet in de garage.

6.2.2 Pulse

Na de ervaringen met een aantal testen in de eerste woning (W1) werd beslist om meerdere ruimtes te testen. Er werd gestart met een beperkt volume. Wanneer bleek dat er een resultaat (met correcte meetvoorwaarden) berekend kon worden, werd het volume uitgebreid. Dit gebeurde door telkens een extra ruimte bij het gemeten volume toe te voegen. Er werd niet van elk volume apart een Blowerdoormeting uitgevoerd. De volumes en verliesoppervlaktes per ruimte zijn terug te vinden in bijlage. In totaal zijn 11 Pulsemetingen uitgevoerd, telkens van 2 metingen per puls.

Volume 1

Het eerste volume waarvan metingen werden uitgevoerd is de garage. Het volume van de garage bedraagt 55,63 m³. Hiervan werden drie Pulsemetingen uitgevoerd. De grafiek van het drukverschil, uitgezet ten opzichte van de tijd, is terug te vinden op onderstaande afbeelding.



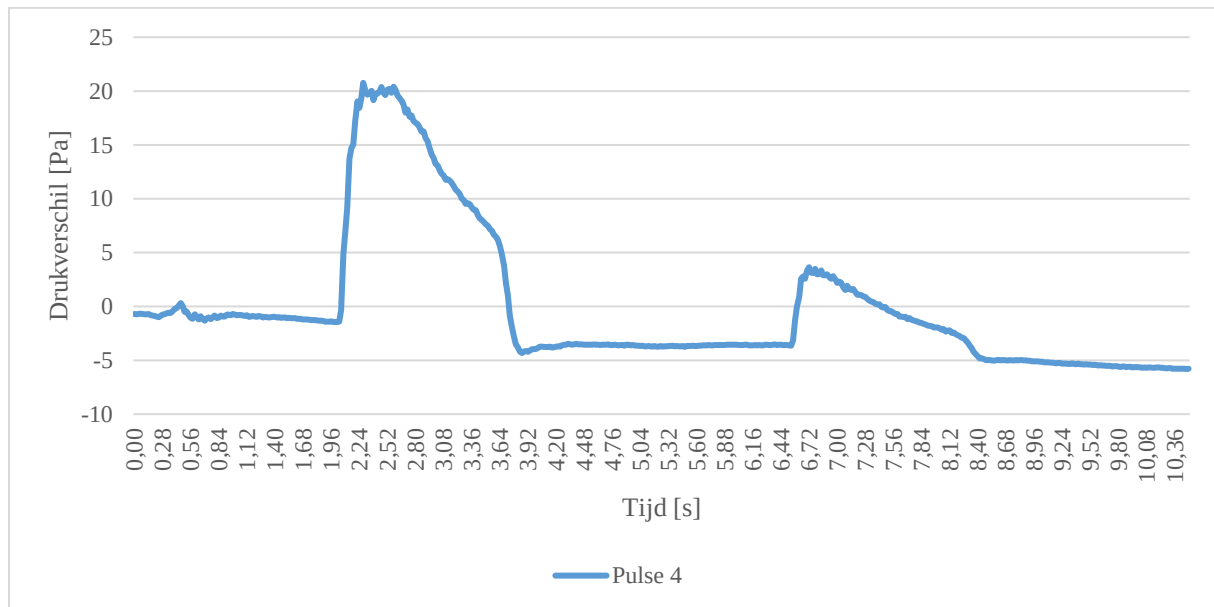
Figuur 48: Pulsemetingen - W2 – 1

De eerste meting werd uitgevoerd bij de maximale druk (5,6 bar). Dit is ietwat aan de hoge kant, maar wel nog aanvaardbaar. Bij de 2^e en 3^e meting werd een lagere druk ingesteld. Bij meting 2 van Pulse 1 en Pulse 3 is aan alle parameters voldaan om een correct resultaat te bepalen. Bij Pulse 2 is na 9,6 seconden nog een plotse drukstijging te zien. Dit zorgt ervoor dat de n-waarde van minimaal 0,50 en maximaal 1,00 niet gehaald wordt. De oorzaak hiervoor kan niet meteen verklaard worden.

Het luchtlekdebiet bij Pulse 1 bedraagt 73,44 m³/h, bij Pulse 3 wordt een $\dot{V}_4$ -waarde van 67,32 m³/h gemeten. Bij Pulse 1 komt dit overeen met een infiltratievoud van 1,32 1/h, bij Pulse 3 is de n_4 -waarde 1,21 1/h.

Volume 2

Door de goede resultaten van de metingen werd een extra ruimte toegevoegd aan het te meten volume. Het volume bedraagt op die manier 76,43 m³.

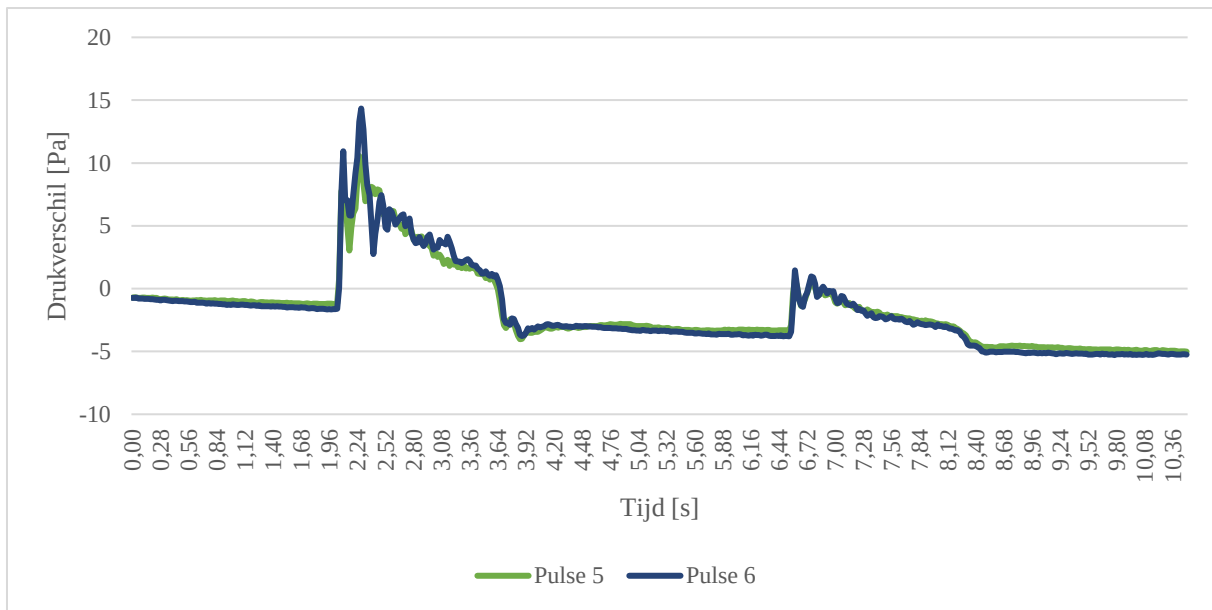


Figuur 49: Pulsemetingen - W2 – 2

Ook bij deze meting kan het luchtlekdebiet bij 4 Pa ($\dot{V}_4$) bepaald worden. De parameters van de tweede meting van de puls vallen binnen de vereisten. Op de grafiek is te zien dat deze de theoretische curve benadert. Als resultaat werd een luchtlekdebiet bij 4 Pa van 75,96 m³/h behaald. Wanneer het luchtlekdebiet gedeeld wordt door het binnenvolume wordt de n_4 -waarde berekend. Bij deze meting bedraagt de n_4 -waarde 0,99 1/h.

Volume 3

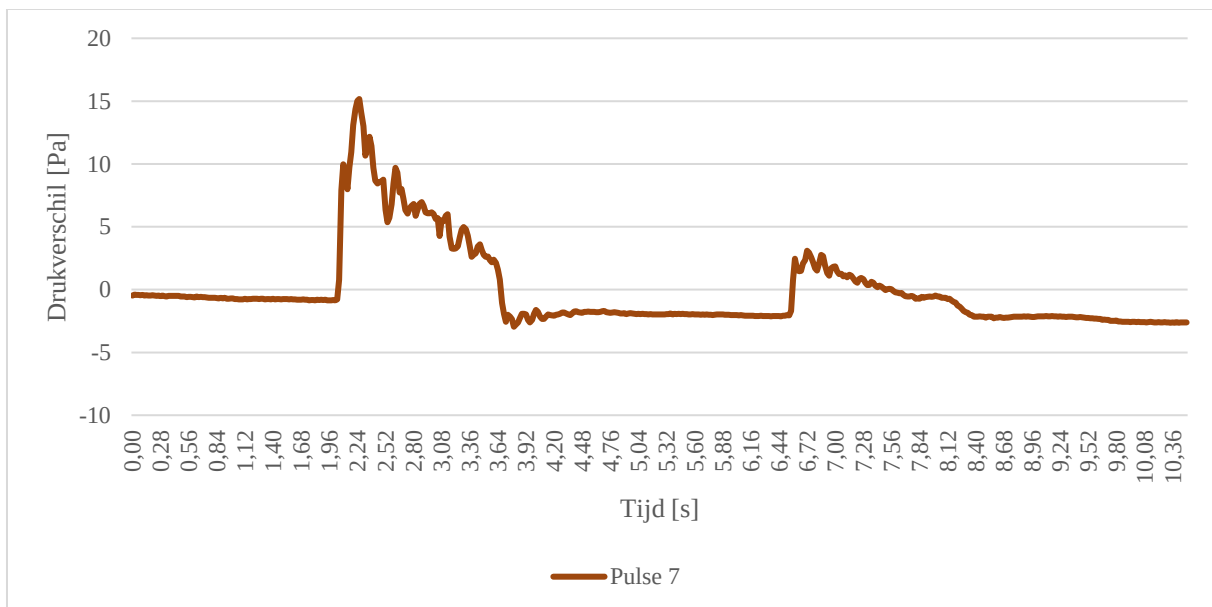
Het binnenvolume van het derde te meten gebouwdeel bedraagt 197,15 m³. Van dit volume werden twee verschillende Pulsemetingen uitgevoerd. Op onderstaande grafiek is te zien dat beide drukverlopen zeer gelijkaardig zijn. Er zijn echter wel grote fluctuaties in het drukverschil merkbaar. Door deze continue drukstijgingen en -dalingen kan geen resultaat berekend worden. Er werd net niet aan de vereiste voorwaarden voldaan.



Figuur 50: Pulsemetingen - W2 – 3

Volume 4

Om die reden werd het volume opnieuw beperkt. Ditmaal tot 129,77 m³. De grafiek van het drukverloop is terug te vinden op Figuur 51. Ook hier zijn ongeveer dezelfde fluctuaties te zien. Bij deze meting blijkt dat er wel aan alle voorwaarden werd voldaan.



Figuur 51: Pulsemetingen - W2 – 4

Het gemeten luchtlekdebiet bij 4 Pa bedraagt 348,48 m³/h. Voor de ruimtes komt dit overeen met een n₄-waarde van 2,68 1/h.

Volume 5

De volgende metingen die uitgevoerd werden omvatten het volume waarvan Blowerdoormetingen zijn gebeurd. Er werden drie pulsen (met telkens 2 metingen per puls) gedaan in het volledige gebouw (met inbegrip van de garage), en één puls zonder de garage binnen het gemeten volume.



Figuur 52: Pulsemetingen - W2 - 5

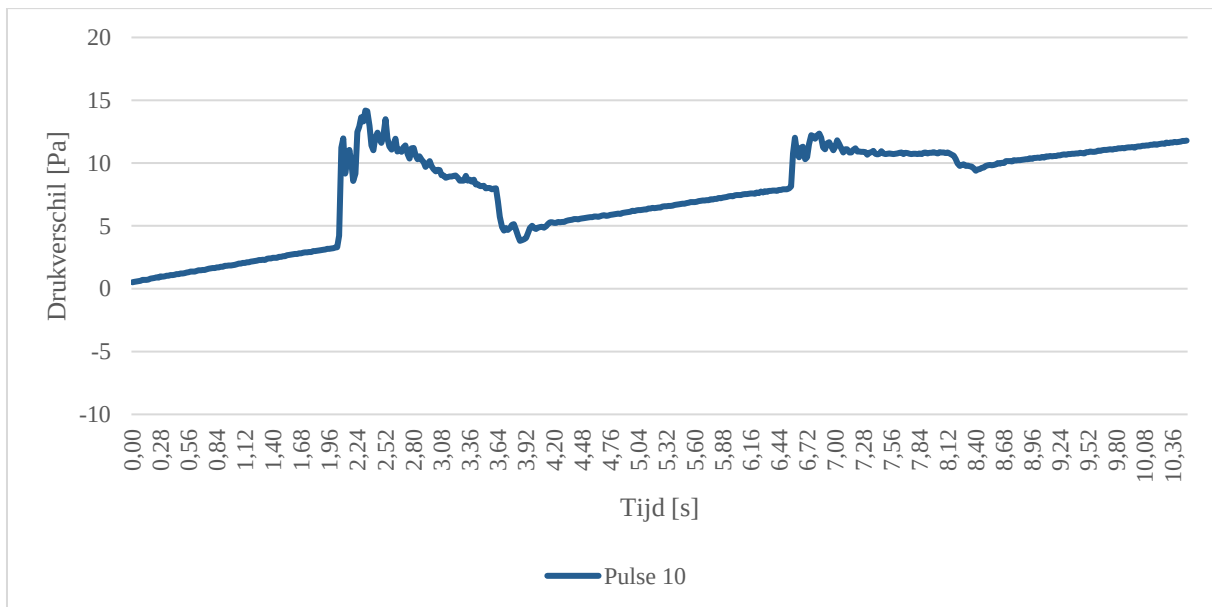
In vergelijking met vorige metingen is het drukverschil op het einde niet gelijkaardig aan het drukverschil bij het begin van de meting. Om een luchtlekdebiet te berekenen wordt nog een windcorrectie toegepast. Na het toepassen van deze correctiefactor blijkt het drukverschil bij het begin en bij het einde wel ongeveer gelijk te zijn. Deze stijging heeft dus geen invloed op eventuele meetresultaten. Positief is het feit dat dit zichtbaar is bij iedere uitgevoerde meting binnen een tijdsperiode van een aantal uur.

Alle parameters bij Pulse 8 voldoen voor beide metingen aan de minimale of maximale vereisten. Op die manier is dit een perfecte test. Bij de eerste meting bedraagt het luchtlekdebiet bij 4 Pa 292,68 m³/h, bij de tweede meting is dat 303,12 m³/h. Het gemiddelde van deze metingen bedraagt bijgevolg 297,90 m³/h. Het infiltratievoud van dit gemeten volume bedraagt 0,84 1/h.

Bij Pulse 9 werd niet voldaan aan de voorwaarden. Terwijl bij meting 2 van Pulse 11 wel werd voldaan. De $\dot{V}_4$ -waarde bedraagt hier 289,80 1/h. Dit komt overeen met een n_4 -waarde van 0,82 1/h. Dit waarden liggen in dezelfde lijn met de resultaten van Pulse 8.

Volume 6

Het zesde en laatste volume dat gemeten werd heeft een binnenvolume van 271,97 m³. Dit is de volledige woning, met uitzondering van de garage. Om de garage buiten het gemeten volume te houden werd de deur gesloten. De vorm van de grafiek is gelijkaardig aan deze van de vorige metingen. De meting werd namelijk ook uitgevoerd binnen dezelfde tijdsperiode.

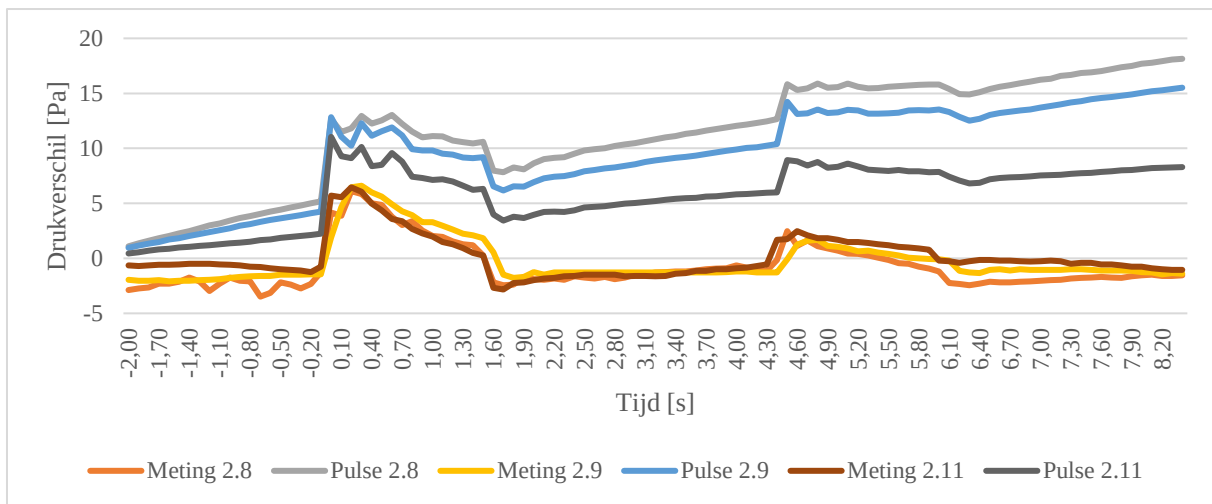


Figuur 53: Pulsemetingen - W2 - 6

Ook bij deze Pulsemeting werd bij de tweede meting aan alle voorwaarden voldaan. Op die manier is het gemeten luchtlekdebiet betrouwbaar. De $\dot{V}_4$ -waarde bedraagt 231,12 m³/h. De overeenkomstige n_4 -waarde bij dit volume bedraagt 0,85 1/h.

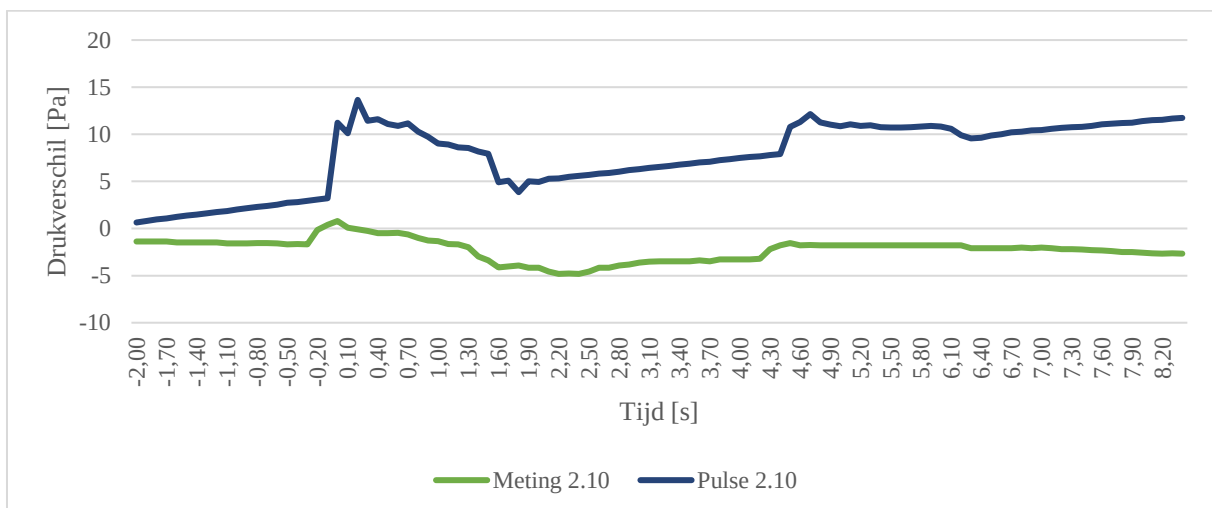
6.2.3 Drukverschil

Bij de laatste vier Pulsemetingen (Pulse 8 tot en met Pulse 11) van gebouw W2 werd de druk in een andere ruimte geregistreerd. De resultaten hiervan zijn op onderstaande grafieken terug te vinden.



Figuur 54: registratie drukverschil 1 - W2

Het is duidelijk dat ook in andere ruimtes de drukstijging vrijwel meteen wordt waargenomen. Het relatieve drukverschil in de grafieken is te wijten aan het feit dat een verschillend referentiepunt genomen wordt. Niet tegenstaande dat de blijvende drukstijging bij het Pulsetoestel waargenomen wordt, waar dit bij de registratie in de andere ruimte niet gemeten werd. Daarnaast blijkt ook dat het gemeten drukverschil van het Pulsetoestel veel meer schommelingen in het drukverloop bevat. Het zijn net deze schommelingen die ervoor zorgen dat er niet altijd een correct gemeten resultaat bepaald kan worden.



Figuur 55: registratie drukverschil 2 - W2

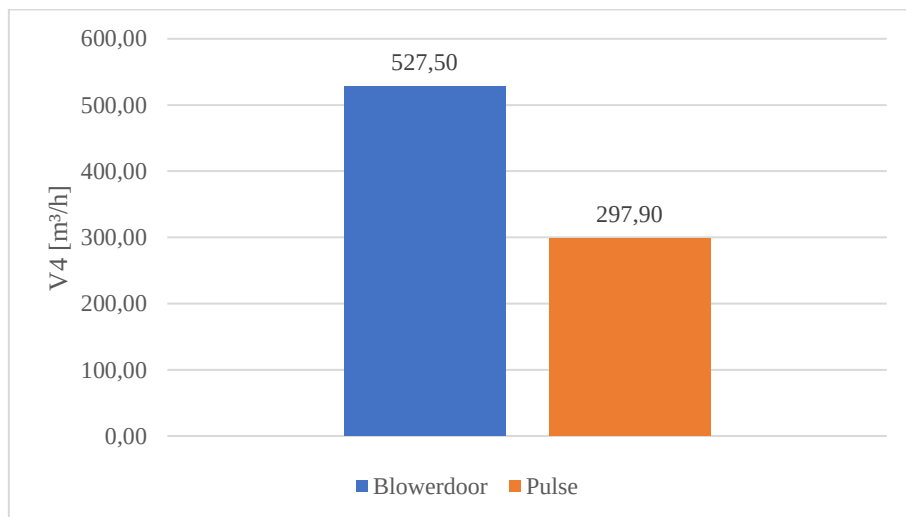
Bij Pulse 10 werd de garage buiten het gemeten volume gehouden. De drukmeter, die gebruikt werd voor de registratie in een andere ruimte, bevindt zich in de garage. Het is duidelijk dat, bij een ruimte buiten het gemeten volume, de drukstijging slechts beperkt voelbaar is. Dit gegeven is ter illustratie.

6.2.4 Vergelijking

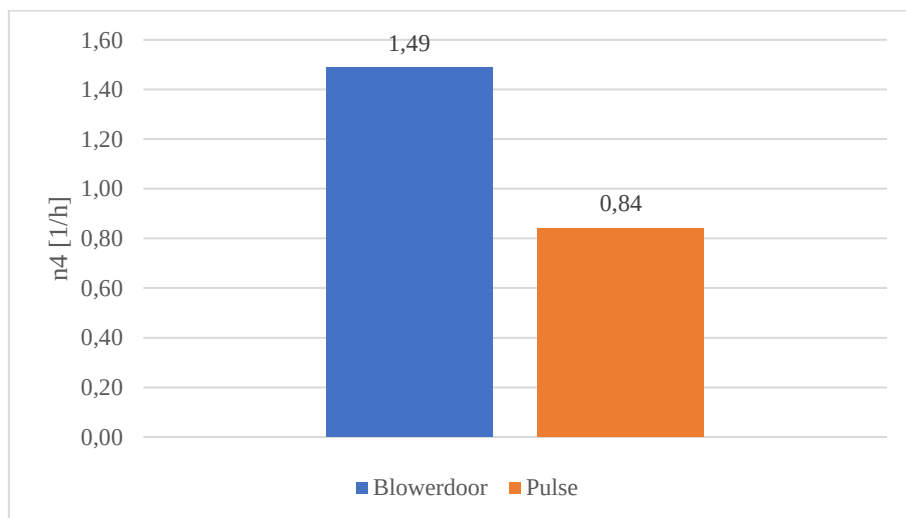
In deze paragraaf worden de meetresultaten van de Blowerdoor vergeleken met deze van de Pulse. Hiervoor worden de $\dot{V}_4$ -waarde en de n_4 -waarde gebruikt van de verschillende metingen. De Blowerdoor resultaten (enkel overdruk meting) bij 50 Pa worden geëxtrapoleerd naar 4 Pa. Uiteraard brengt dat de nodige onzekerheden met zich mee. Voor deze vergelijking worden enkel volume 5 en volume 6 gebruikt, aangezien enkel van deze volumes Blowerdoormetingen uitgevoerd zijn.

Volume 5

Voor volume 5 zijn er in totaal twee metingen die als betrouwbaar beschouwd kunnen worden. Hiervan wordt het gemiddelde bepaald om te vergelijken met het gemiddelde meetresultaat van de Blowerdoor. Op de grafieken is zichtbaar dat de meetwaarden van de Pulse duidelijk lager liggen dan deze van de Blowerdoor. De verhouding van het luchtlekdebiet bij de Pulse bedraagt 56,47% ten opzichte van de Blowerdoor.



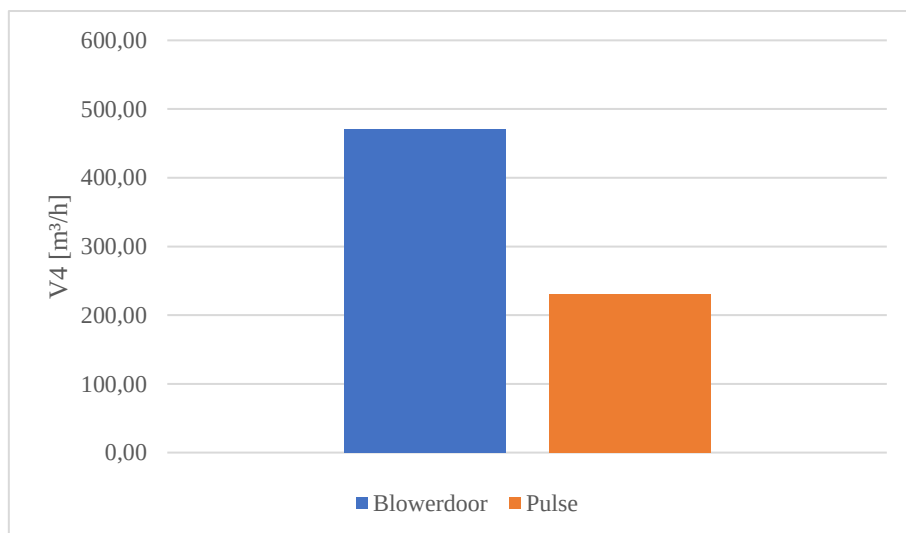
Figuur 56: vergelijking V_4 -waarde volume 5 - W2



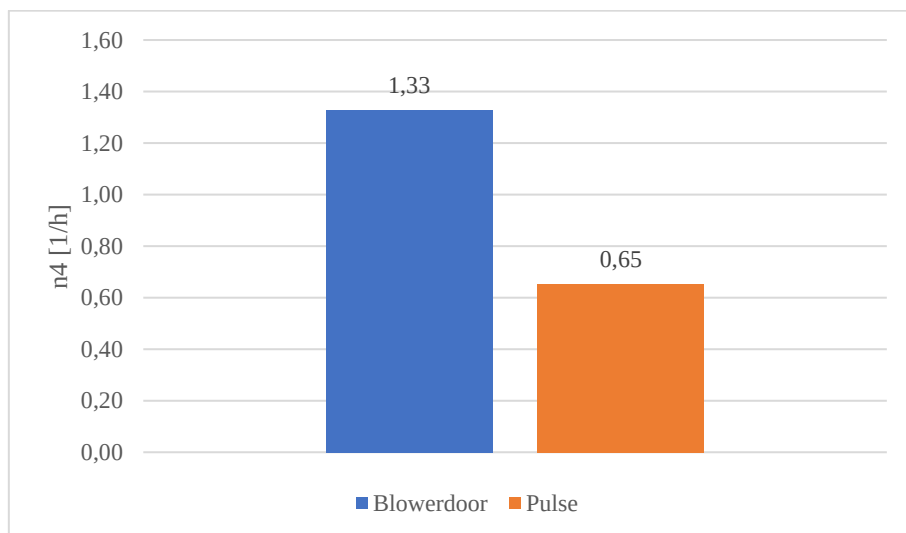
Figuur 57: vergelijking n_4 -waarde volume 5 - W2

Volume 6

Het gemeten luchtlekdebiet bij 4 Pa van de ruimtecombinaties met een binnenvolume van 271,97 m³ bedraagt 231,12 m³/h. Bij de Blowerdoor wordt een $\dot{V}_4$ -waarde gemeten van 471,0 m³/h. Het resultaat van de Pulsemeting verhoudt zich met 57,74% ten opzichte van de Blowerdoor. Deze verhouding ligt in de lijn met de vergelijking van het vorige volume (volume 5).



Figuur 58: vergelijking V_4 -waarde volume 6 - W2

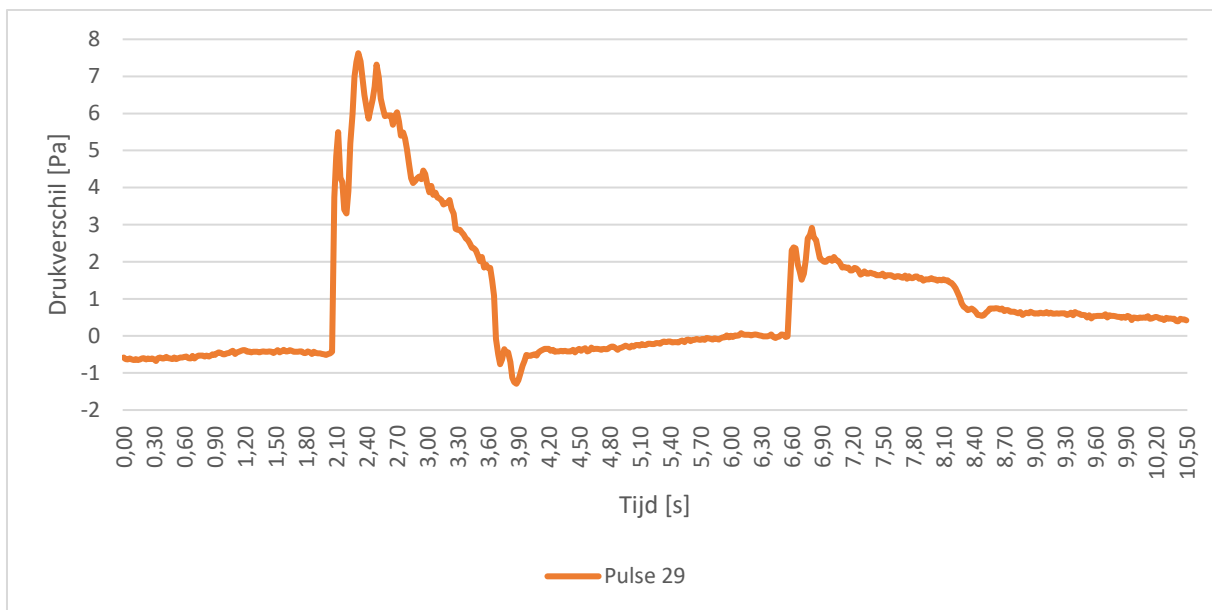


Figuur 59: vergelijking n_4 -waarde volume 6 - W2

6.3 Tussenevaluatie 1

Uit de meetresultaten van de Pulse in het volledige volume van woning W1 blijkt het niet eenvoudig om een meetresultaat te bekomen. Het infiltratievoud bij 50 Pa van 8,48 1/h in combinatie met het binnenvolume van 578,35 m³ zorgt ervoor dat het luchtvat van 60 liter (werkelijk 58,5 liter) onvoldoende capaciteit heeft om het drukverschil van 4 Pa te bereiken. Ook de schommelingen zorgen ervoor dat het niet eenvoudig is om te voldoen aan de voorwaarden.

Uiteraard is het bij luchtdichtheidsmetingen van gebouwen de bedoeling om het volledig beschermd volume met 1 meting nauwkeurig te kunnen meten.



Figuur 60: tussenevaluatie 1

Op basis van de literatuurstudie en het feit dat luchtdichtheidstesten bij gebouwen in België over het algemeen uitgevoerd worden in het kader van de EPB-eisen, wordt gezocht naar luchtdichte nieuwbouwwoningen. Voor nieuwbouwwoningen werd sinds kort namelijk het S-peil ingevoerd. Deze eis blijkt niet eenvoudig om te halen. De luchtdichtheid van een woning speelt hierbij een grote rol. Het uitvoeren van een luchtdichtheidstest kan het S-peil snel doen dalen. De laatste jaren wordt meer aandacht besteed aan de luchtdichtheid, waardoor zo goed als zeker lager gescoord wordt dan de waarde bij ontstentenis van 12 m³/(hm²).

Voor de volgende vergelijkende testen zal omwille van bovenstaande redenen gezocht worden naar meer luchtdichte nieuwbouwwoningen (bouwjaar vanaf 2012). Een korte beschrijving van die woningen is terug te vinden in hoofdstuk 5.1. De resultaten van deze woningen worden in volgende hoofdstukken beschreven.

6.4 Testwoning 3

6.4.1 Blowerdoor

In deze paragraaf zijn de resultaten terug te vinden van de Blowerdoormeting van testwoning 3 (halfopen bebouwing te Sint-Amandsberg). In totaal zijn er drie verschillende over- en onderdrukmetingen uitgevoerd.

De woning is voorzien van een ventilatiesysteem D. Voor het uitvoeren van de metingen werd het systeem uitgeschakeld. De mechanische toe- en afvoermonden werden afgedicht, zoals te zien op Figuur 61. Alle deuren werden geopend om de volledige woning te testen, alleen de deur van het toilet werd gesloten. De Blowerdoor werd in een raamopening aan de achterzijde van de woning geplaatst.



Figuur 61: afdichting ventilatie W3



Figuur 62: meetopstelling W3 - BD

Tabel 21: meetresultaten W3 - BD - OO - volledige woning

W3		Volledige woning						
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Meting 3		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	246,0	44,0	246,0	45,0	243,0	43,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	0,88	0,16	0,88	0,16	0,87	0,15	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	0,94	0,17	0,94	0,17	0,93	0,16	m³/(h.m²)
	$\frac{V_{\Delta P}}{(EPB)}$	0,94	0,17	0,94	0,17	0,93	0,16	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	4,65	0,83	4,65	0,83	4,59	0,81	m³/(h.m²)

Tabel 22: meetresultaten W3 - BD - O - volledige woning

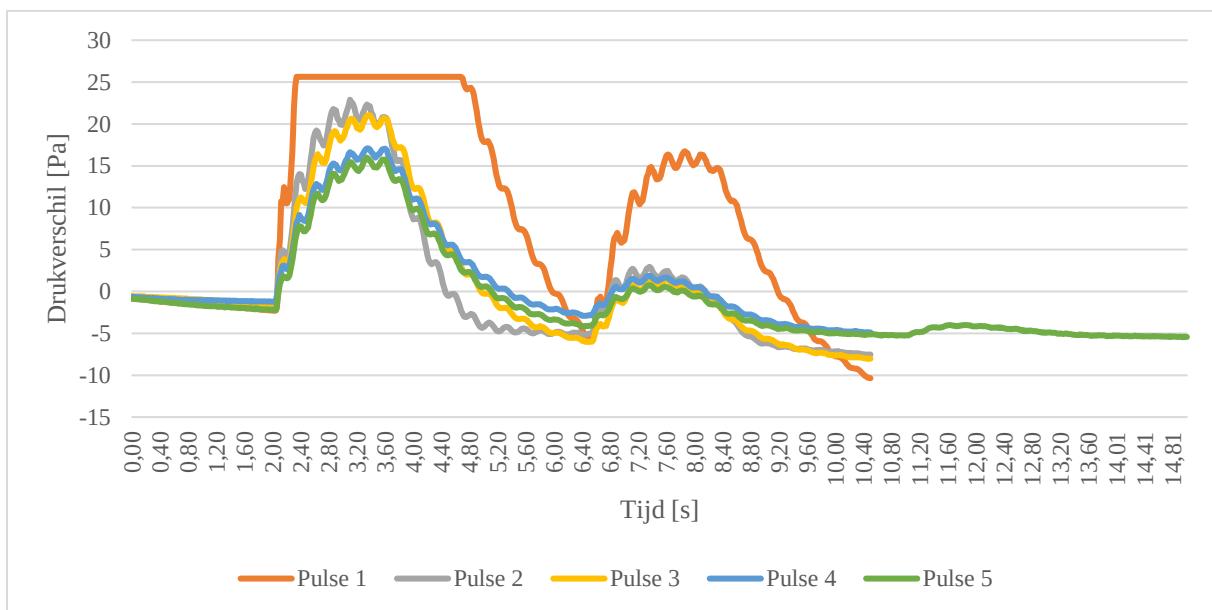
W3		Volledige woning						
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Meting 3		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	255,0	48,0	256,0	53,0	255,0	49,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	0,91	0,17	0,91	0,19	0,91	0,17	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	0,98	0,18	0,98	0,20	0,98	0,19	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	0,98	0,18	0,98	0,20	0,98	0,19	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	4,81	0,91	4,83	1,00	4,81	0,93	m³/(h.m²)

Zoals te zien is bij de meetresultaten scoort deze woning zeer goed op gebied van luchtdichtheid. Het benadert de passiefnorm, zoals door de ontwerper vooropgesteld was. Op basis van de ervaringen van de eerste testen zou dit geen problemen mogen geven voor de Pulsetest.

6.4.2 Pulse

In totaal zijn 17 metingen uitgevoerd. De voorbereiding van het gebouw voorloopt volledig gelijk als voor een blowerdoormeting.

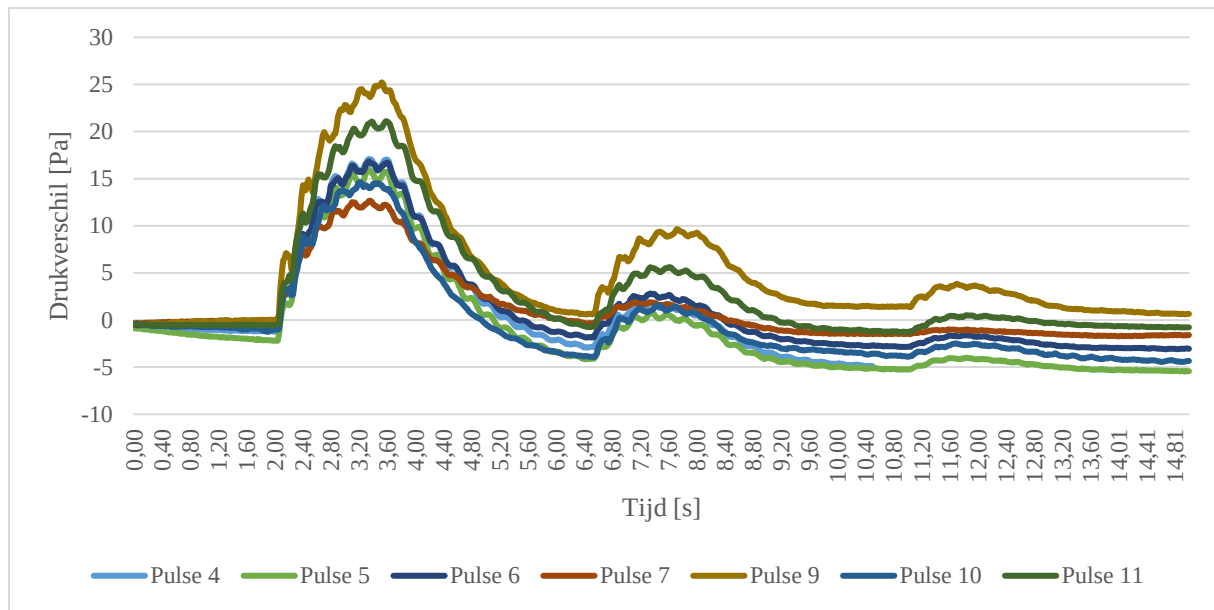
De eerste meting werd gebruikt om een inschatting te maken voor de druk in het luchtvat. Het vat werd volledig opgeladen (tot 5,6 bar). Dit is duidelijk te zien op de grafiek. De vlakke lijn is te verklaren door het maximale meetbereik van de meetapparatuur, 25 Pa.



Figuur 63: Pulsemetingen type 1 - W3

Omdat het de eerste testen in een zeer luchtdichte woning betreft, blijkt dat het opgebouwde drukverschil zeer traag daalt. Bij Pulse 1 en Pulse 2 is er een snellere daling zichtbaar. De oorzaak hiervan wordt verklaard door het feit dat de ventilatiekanalen bij deze twee metingen nog niet afgedicht zijn.

Bij Pulse 4 en Pulse 5 wordt de druk in het luchtvat ingesteld op 2 bar. Ook deze waarde blijkt nog te hoog. Na de eerst vijf metingen wordt het toestel op een ander positie in de woning geplaatst (op de 1^{ste} verdieping) en ingesteld op drie metingen per puls. De reden voor het uitvoeren van 3 metingen per puls is het feit dat de drukstijging constant te hoog blijkt, het interval van de drukstijging bevat namelijk de waarde van 4 Pa niet. Bij de tweede en derde meting zou dit wel het geval moeten zijn. De grafieken hiervan zijn terug te vinden op Figuur 64.



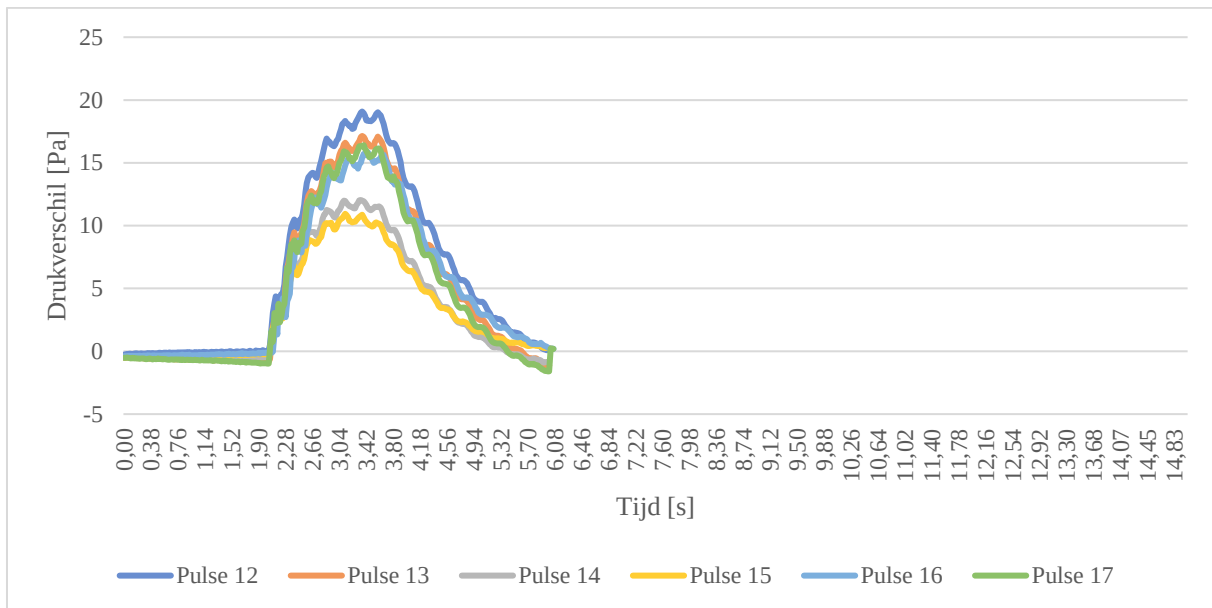
Figuur 64: Pulsemetingen type 2 - W3

Eén Pulse duurt 1,5 seconden, en start na 2,1 seconden. Bij minder luchtdichte woningen (W1 en W2) is te zien dat na 3,6 seconden (bij het einde van de drukstijging) het drukverschil meteen snel begint te dalen. Bij deze testen is dit niet geval. Uiteraard duidt dit de goede luchtdichtheid van het gebouw aan. Voor het berekenen van een luchtlekdebiet is dit echter nefast. De trage drukdaling (naar de startdruk) zorgt ervoor dat de daaropvolgende puls (binnen dezelfde meting) hierdoor beïnvloed wordt. Door de trage drukdaling is er binnen 1 meting ‘geen tijd’ om opnieuw een background pressure (duur: 2 seconden) te nemen. Op de grafieken is duidelijk te zien dat tussen 4 en 6 seconden (tijdsperiode waarbij background pressure geregistreerd wordt) het drukverschil nog steeds daalt. In theorie zou het drukverschil op dat moment ongeveer 0 bedragen.



Figuur 65: meetopstelling Pulse

Een oplossing voor het beïnvloeden van de opeenvolgende pulsen, is het beperken van de meting tot 1 puls bij een zeer lage druk. Op die manier kan in theorie een te beperkte drukstijging voldoende snel dalen om toch een background pressure te kunnen nemen.

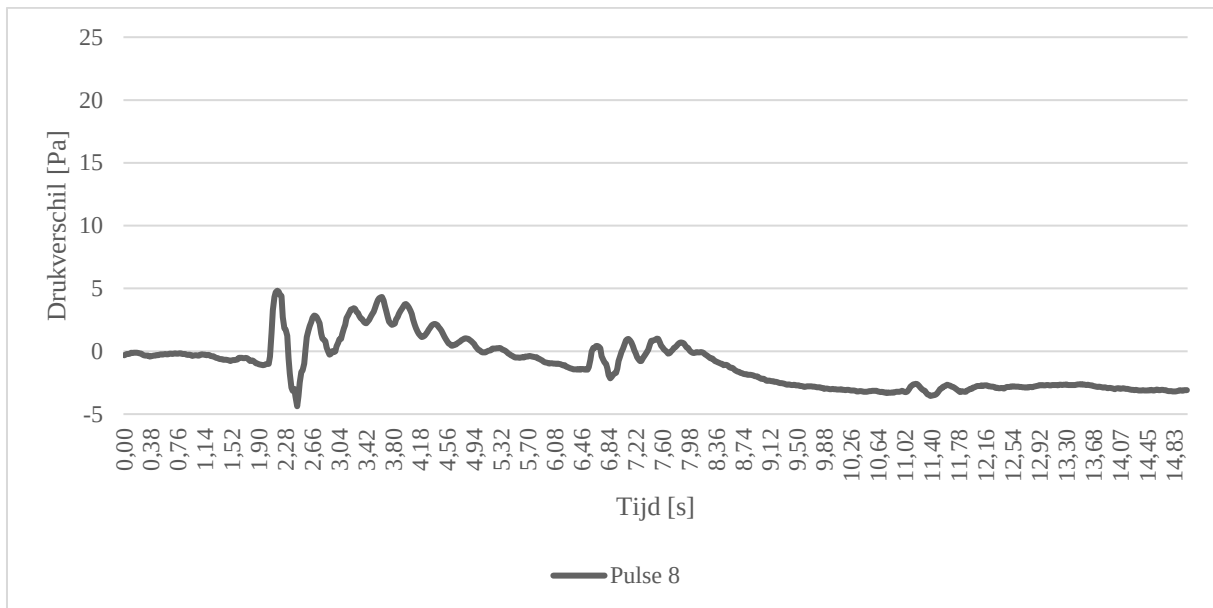


Figuur 66: Pulsemetingen type 3 – W3

Een druk in het luchtvat van ongeveer 2 bar (Pulse 12, Pulse 13, Pulse 16, Pulse 17) en 1,6 bar (Pulse 14, Pulse 15) blijkt nog steeds te hoog. De combinatie van de goede luchtdichtheid en het beperkte gebouwwolume zorgt ervoor dat er geen background pressure kan genomen worden om correcties op toe te passen. Op die manier is het onmogelijk om een correct gemeten lekdebiet bij 4 Pa ($\dot{V}_4$) te bekomen.

Dit blijkt ook wanneer de vereiste parameters voor een goede test (onder meer R^2 en n-waarde) gecontroleerd worden. De getallen waaraan deze parameters dienen te voldoen zijn terug te vinden in hoofdstuk 3.3.5. Alle factoren per meting zijn terug te vinden in bijlage.

Bij de metingen wordt ook getracht om een Pulsemeting uit te voeren wanneer de blowerdoor zich nog in een deuropening bevindt. Op die manier wordt getracht om voor de Blowerdoor en de Pulse dezelfde gebouwparameters te beogen.



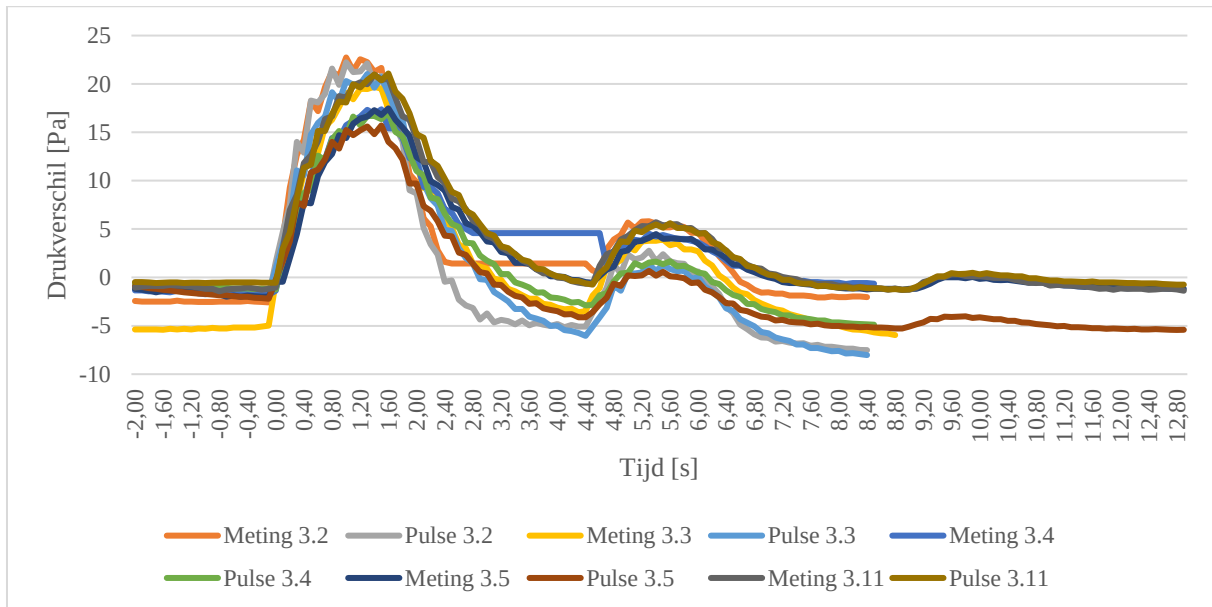
Figuur 67: Pulsemeting met Blowerdoor - W3

Het onregelmatige verloop van het drukverschil wordt verklaard door wijzigen in volume. Deze volumewijzigingen zorgen voor een daling in het drukverschil. De oorzaak van deze (kleine) wijziging is de opstelling van de Blowerdoor. Het doek dat opgespannen wordt in het kader wordt door de plotse drukstijging naar buiten geblazen. Dit zorgt ervoor dat het binnenvolume toeneemt, waardoor het drukverschil daalt. Door deze daling ontspant het doek zich opnieuw, waardoor het drukverschil opnieuw stijgt. Dit proces gaat zo door.

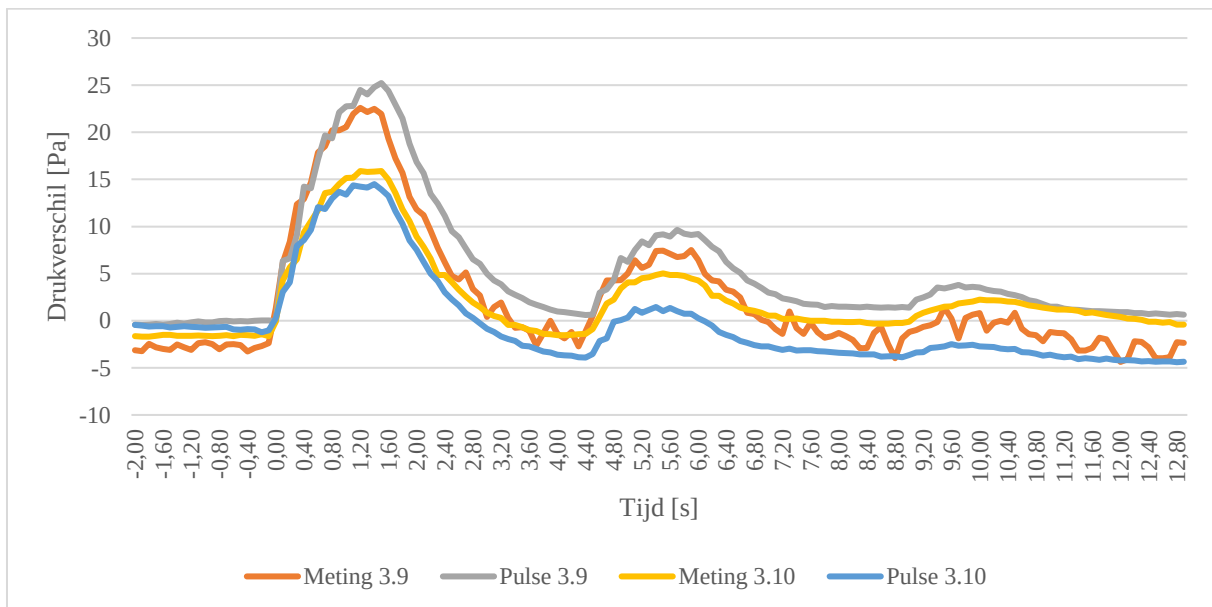
Ondanks het stevig opspannen van het doek is er steeds een kleine volumewijziging, en bijgevolg ook een drukdaling, zichtbaar. Dit maakt het onmogelijk om voldoende correlatie tussen de meetpunten te behalen.

6.4.3 Drukverschil

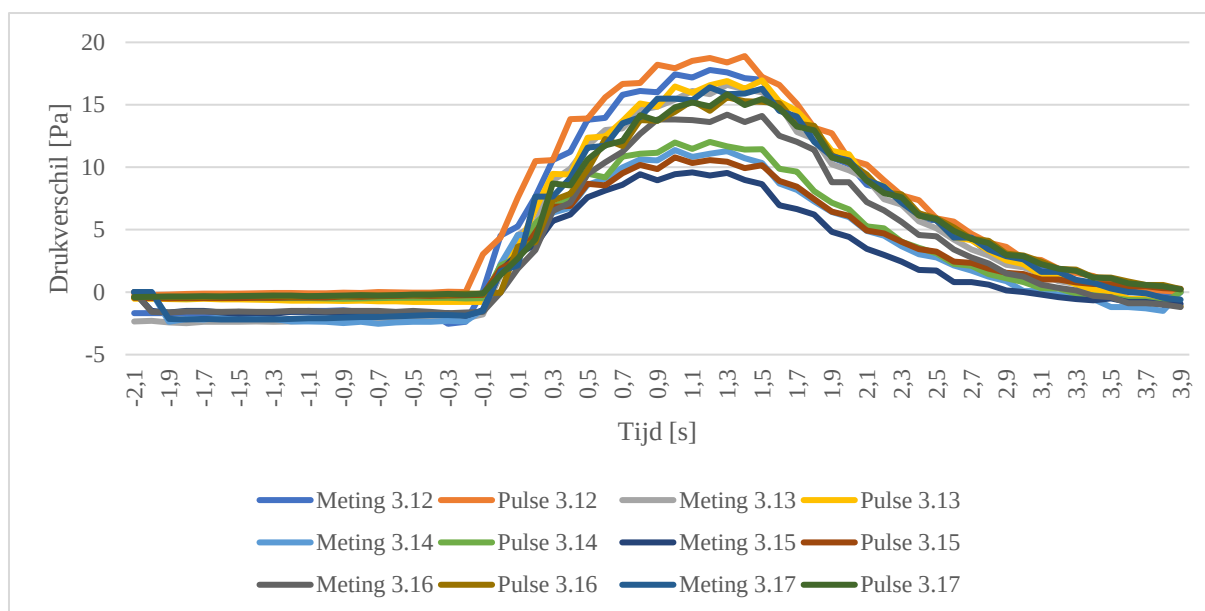
Om na te gaan of het gecreëerde drukverschil in het volledige gebouw merkbaar is, wordt de luchtdruk in een andere ruimte geregistreerd. Deze ruimte wordt zo ver als mogelijk van het Pulsetoestel genomen. De referentiedruk bij deze testen bevindt zich buiten. Omwille van goede weeromstandigheden ligt deze in de lijn van de referentiedruk van het Pulsetoestel.



Figuur 68: registratie drukverschil 1 - W3



Figuur 69: registratie drukverschil 2 - W3



Figuur 70: registratie drukverschil 3 - W3

Op alle grafieken is te zien dat het drukverloop over de volledige woning merkbaar is en gelijkaardig aan de meting door het Pulsetoestel. Hier zijn geen opvallende verschillen. Op Figuur 69 is de meting met de opstelling van de Blowerdoor in de deur te zien. In dat geval is het gemeten drukverschil onregelmatiger dan deze van de Pulse. Op de laatste figuur is nogmaals te zien dat de drukstijging veroorzaakt door de Pulse traag daalt. Binnen de opgenomen tijdsperiode is geen mogelijkheid om een background pressure te meten.

6.4.4 Vergelijking

Omwille van de problemen van het meettoestel met te luchtdichte woningen (in combinatie met een beperkt volume) kan geen resultaat bepaald worden bij de Pulsemetingen. Op die manier is een vergelijking van de Blowerdoor en de Pulse voor testgebouw W3 niet mogelijk.

6.5 Testwoning 4

6.5.1 Blowerdoor

Testwoning 4 is een open bebouwing met weinig tot geen andere gebouwen in de nabije omgeving. Ook hier werd ventilatiesysteem D uitgezet en de aan de toe- en afvoeropeningen afgedicht door middel van plakband. Alle deuren werden geopend, uitgezonderd de deuren van de twee toiletten.



Figuur 71: afdichting ventilatie W4

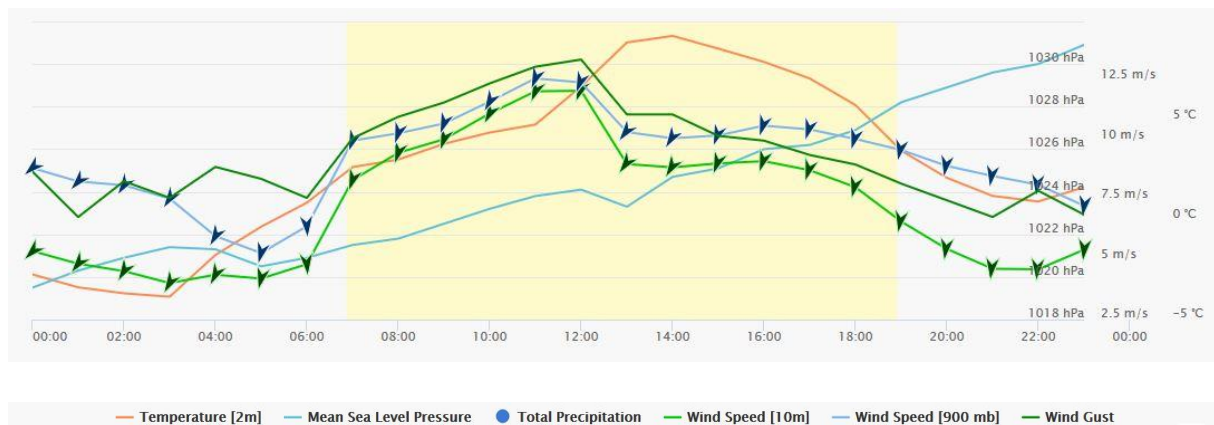


Figuur 72: meetopstelling W4 - BD

Tabel 23: meetresultaten W4 - BD - O

W4	Volledige woning							
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	1272,0	341,0	-	-	-	-	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,99	0,53					1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	2,39	0,64					m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	1,94	0,52					m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	10,25	2,75					m³/(h.m²)

Zoals eerder vermeld staat de woning in een open vlakte. Op het moment van de metingen stond er een krachtige wind (6 Beaufort), zoals te zien op onderstaande grafiek. Hierdoor zijn er veel schommelingen in de gebouwdruk. Dit maakt het niet eenvoudig om een Blowerdoor test uit te voeren. Er werd slechts 1 meting in overdruk uitgevoerd. 1 overdrukmeting maakt het moeilijk om een correcte weergave van de luchtdichtheid te krijgen, maar het geeft wel een richtwaarde.

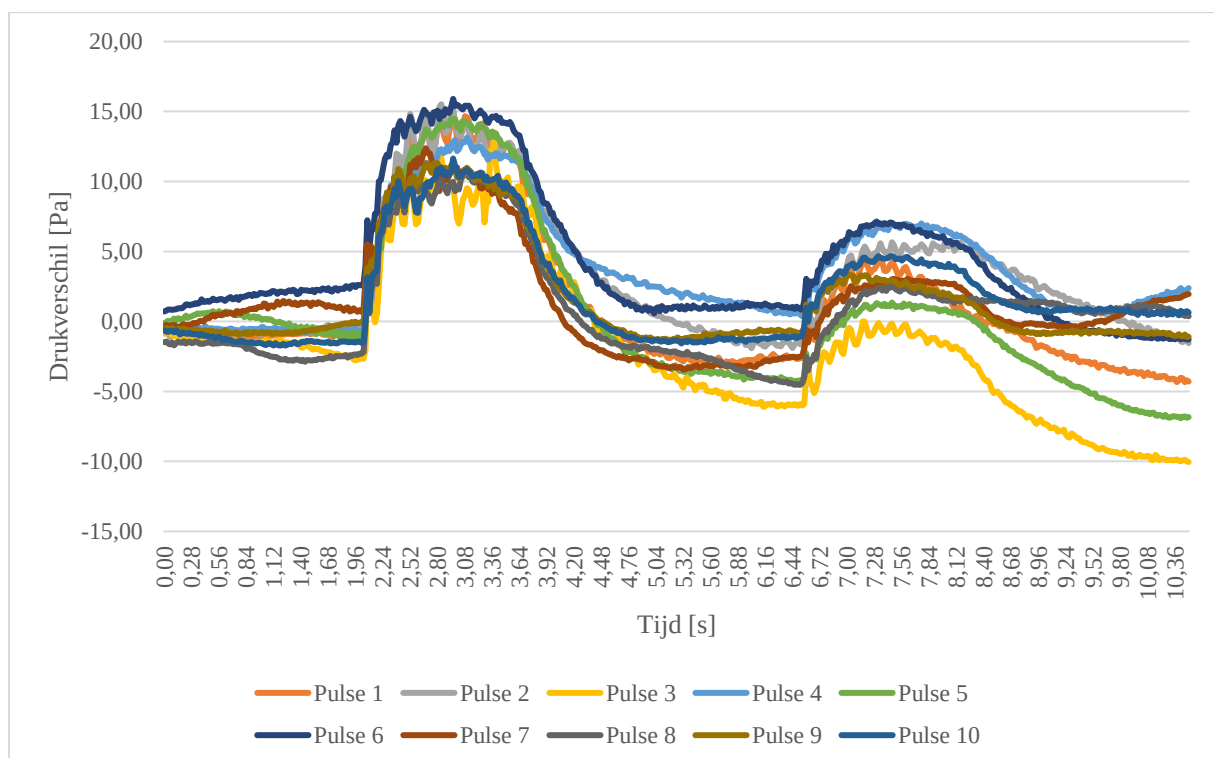


Figuur 73: weerdata Nevele testdag W4

Het voordeel van de weersomstandigheden is om na te gaan hoeveel invloed de Pulsetest ondervindt van de krachtige wind.

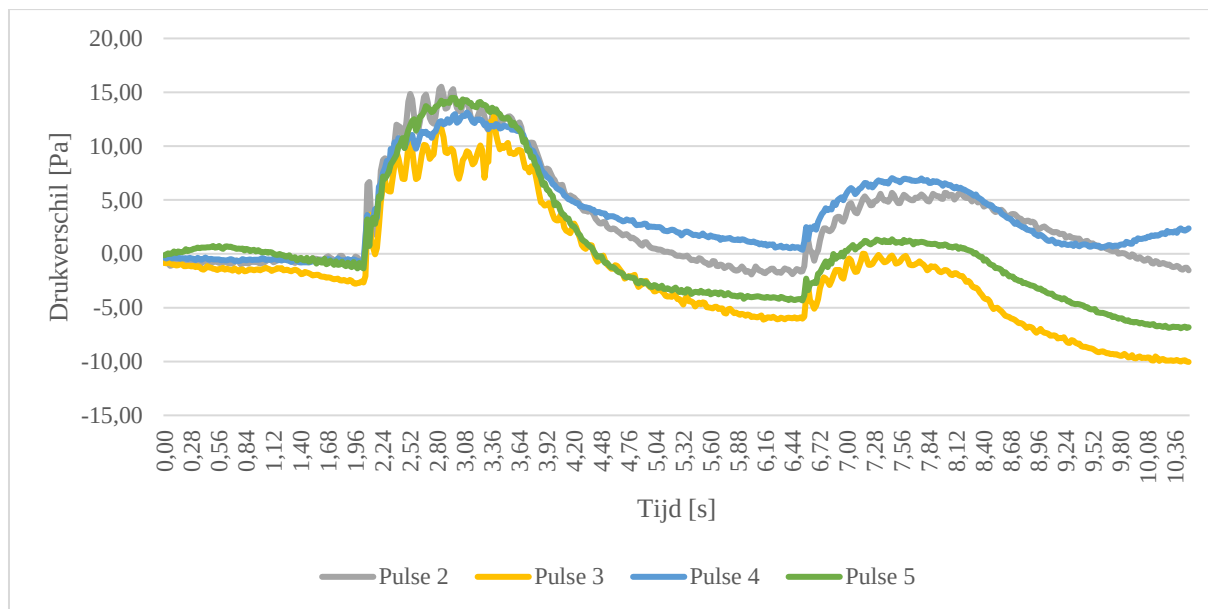
6.5.2 Pulse

Omwillen van het grote gebouwvolume werd de Pulse telkens volledig opgeladen. Dit komt overeen met een druk van ongeveer 5,60 bar. Uit de eerste meting blijkt dat het maximum meetbereik van de drumeter niet gehaald werd zoals bij W3 wel het geval was. Om die reden werd de druk niet verlaagd bij de daarop volgende metingen.



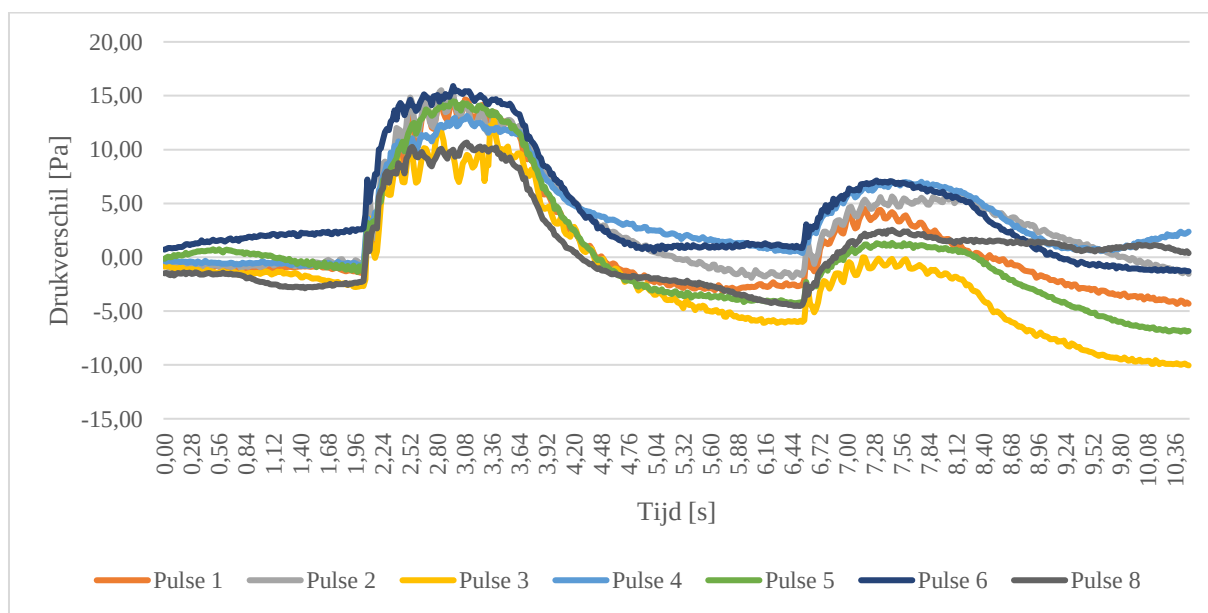
Figuur 74: Pulsemetingen - W4

Bij de eerste 3 Pulsen blijken er opnieuw grote schommelingen op het drukverloop te zitten. Uit ervaring met de vorige metingen werd beslist om het toestel op een andere locatie in de woning te plaatsen, dit vanaf Pulse 4. Er is een duidelijk verschil te zien in het drukverloop. Niet zozeer in het algemeen verloop, maar eerder in de grootte van fluctuaties. De tweede locatie is minder gevoelig voor bepaalde invloeden. Wat deze invloeden precies zijn kan niet meteen benoemd worden.



Figuur 75: Pulsemetingen locatie 1 & 2 - W4

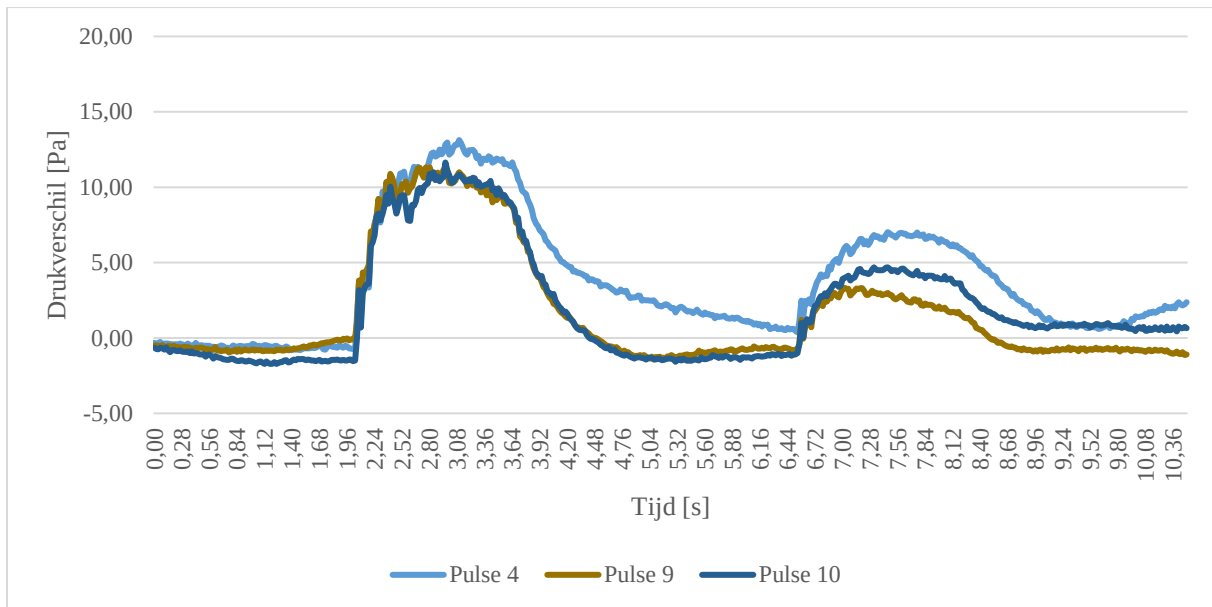
Op de grafieken is te zien dat ook de Pulse beïnvloed wordt door de sterke wind. Deze invloed is bij de ene meting duidelijker zichtbaar dan bij de andere. Vooral bij het meten van de background pressure na de twee metingen per puls is de invloed zichtbaar.



Figuur 76: Pulsemetingen invloed wind - W4

Net zoals bij gebouw W3 is een tragere daling van het drukverschil merkbaar. Dit toont de goede luchtdichtheid van het gebouw aan. Maar dit kan ook de tweede meting per puls beïnvloeden. Vooral

bij Pulse 4 is dit gegeven duidelijk zichtbaar. Dit in combinatie met de invloed van de wind zorgt ervoor dat er niet aan de minimale vereisten voor een correcte meting voldaan wordt. Onder meer de determinatiecoëfficiënt zit duidelijk onder de minimale waarde van 0,98. Zoals bij alle voorgaande metingen scoort de tweede meting per puls wel beter. Alle parameters per meting zijn terug te vinden in bijlage.



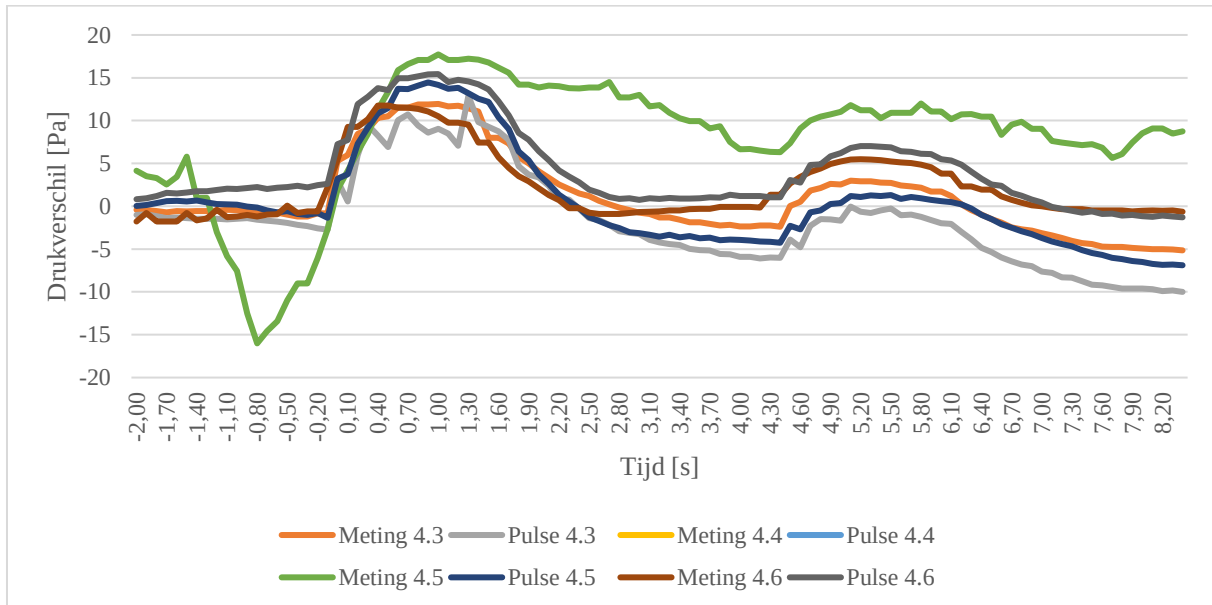
Figuur 77: Pulsemetingen goede test - W5

Twee metingen waar wel een betrouwbaar meetresultaat bepaald kan worden zijn Pulse 9 en Pulse 10. Het betreft telkens de tweede meting per puls die voldoet aan de vereisten. Ondanks dezelfde drukinstelling voor het luchtvat ligt het bereikte drukverschil lager. Ook het wegebben van het drukverschil doorheen de luchtlekken lijkt sneller te gaan. Op die manier wordt de tweede meting niet beïnvloed. Ook de invloed van de wind is beduidend beperkter dan bijvoorbeeld bij Pulse 4.

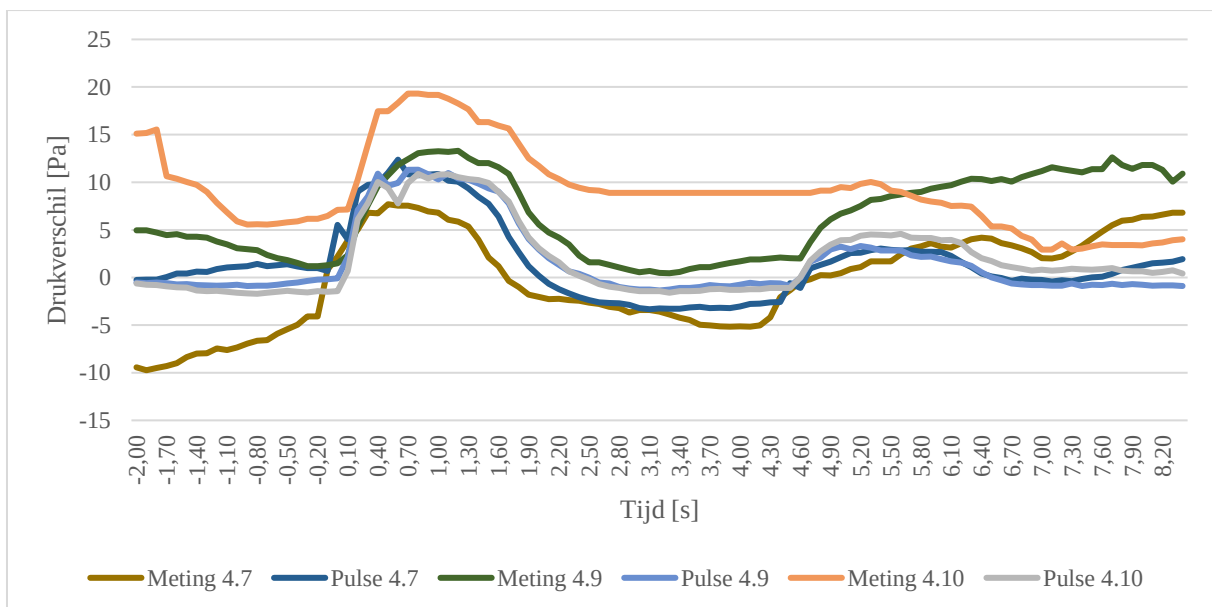
Het luchtlekdebiet bij 4 Pa van Pulse 9 bedraagt 141,84 m³/h. Bij Pulse 10 is $\dot{V}_4 = 121,32$ m³/h. Wanneer deze waarden uitgedrukt worden ten opzichte van het binnenvolume (n_4 -waarde) worden als resultaat 0,22 1/h (Pulse 9) en 0,19 1/h (Pulse 10) bekomen.

6.5.3 Drukverschil

Op onderstaande grafieken is het drukverloop in de woning ten opzichte van de tijd uitgezet. Dit zowel voor het drukverloop gemeten door het Pulsetoestel als voor het drukverloop gemeten door de DG-700 drukmeter in een andere ruimte van de woning.



Figuur 78: registratie drukverschil 1 - W4



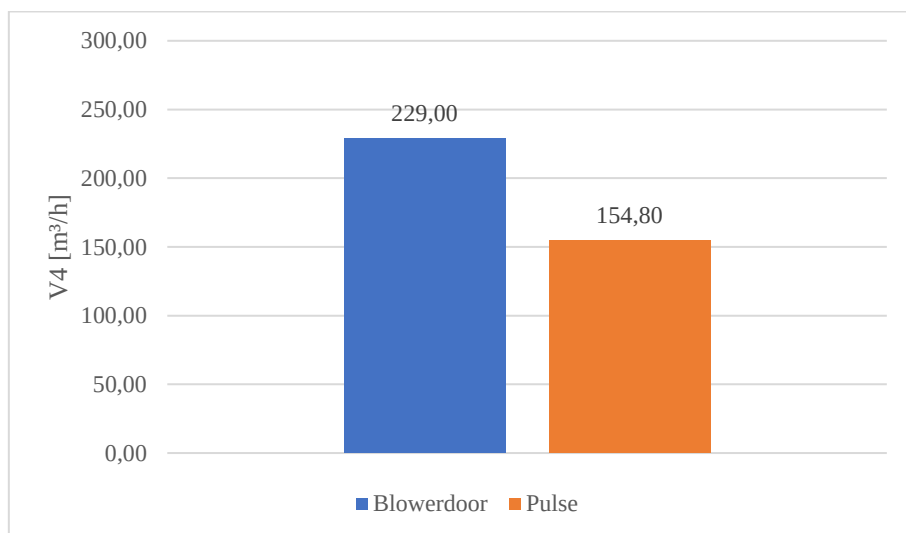
Figuur 79: registratie drukverschil 2 - W4

Op de grafieken van de metingen in de andere ruimte is de invloed van de sterke wind duidelijk zichtbaar. In de meeste gevallen was de drukstijging, gecreëerd door de 1^{ste} meting van de Pulse, nog merkbaar. Bij de tweede meting blijkt de winddruk meer invloed te hebben. Het drukverloop in de ruimte verloopt wel rechtlijniger/constanter dan bij de Pulsemeting. Daar zijn fluctuaties duidelijk zichtbaar.

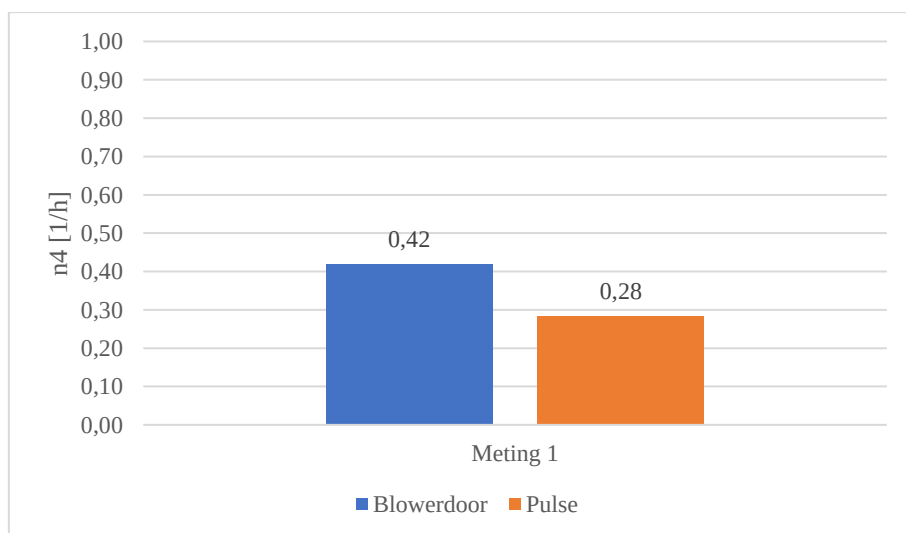
6.5.4 Vergelijking

Het gemeten luchtlekdebiet van de Blowerdoor overdrukmeting bedraagt 229,00 m³/h. Het gemiddelde van twee Pulsemetingen bedraagt 154,80 m³/h. Dit is gemeten bij een drukverschil van 4 Pa. Om het infiltratievoud te berekenen wordt het luchtlekdebiet gedeeld door het binnenvolume. Bij dit gebouw bedraagt het binnenvolume 545,61 m³.

De verhouding van het gemeten luchtlekdebiet van de Blowerdoormeting en de Pulsemeting bedraagt 67,70%.



Figuur 80: vergelijking V₄-waarde W4



Figuur 81: vergelijking n₄-waarde W4

6.6 Tussenevaluatie 2

De huidige softwareversie van de Pulse kent problemen met te luchtdichte woningen. Het probleem situeert zich bij de tijdsregistratie en de verwerking van de gegevens doormiddel van de achterliggende theorie. Omwille van het feit dat de woningen W3 en W4 goed scoren op gebied van luchtdichtheid (W3: $n_{50} = 0,87$ 1/h, W4 $n_{50} = 1,99$ 1/h), verlaat de drukstijging het gebouw relatief traag. Omdat de software ingesteld is op een tijdsduur van 1 puls op 6 seconden wordt de meting van een tweede puls beïnvloed. Wanneer ervoor gekozen wordt om bij een Pulse slechts 1 meting uit te voeren, wordt slechts over een periode van 6 seconden gemeten. Binnen deze tijdsperiode is het drukverschil in een luchtdichte woning nog niet volledig weggewerkt.

Een mogelijke oplossing is het uitvoeren van 1 puls bij een lage druk van het luchtvat. Dit gegeven hangt natuurlijk samen met het gebouwvolume. Hierbij kan wel het probleem optreden dat de lage druk ontoereikend is om bepaalde volumewijziging/fluctuaties op te vangen.

Bij gebouw W3 is het toepassen van een lage druk niet voldoende. Omwille van het beperkte volume en de goede luchtdichtheid is het niet mogelijk om een resultaat te bepalen bij een druk van het luchtvat van 1,7 bar. Een nog lagere druk is voor het luchtvat van 58,5 liter praktisch niet haalbaar.

Omwille van bovenstaande reden zijn de meetresultaten van gebouw W3 niet correct. Deze metingen kunnen bijgevolg niet gebruikt worden om te vergelijken met de resultaten van de Blowerdoor. Uiteraard zijn deze metingen wel van belang voor de fabrikant. Omwille van het feit dat het Pulsetoestel zeer recent ontwikkeld werd, zijn deze bevindingen belangrijk voor de verdere evolutie. Na navraag bij de fabrikant blijkt dat deze opmerking ook zeer recentelijk bij hen ontdekt werd.

6.7 Testwoning 5

6.7.1 Blowerdoor

Ter voorbereiding van de test werd het ventilatiesysteem uitgeschakeld en de bewust gemaakte openingen werden afgedicht. De meetopstelling werd in een zijdeur geplaatst. De resultaten van de meting zijn terug te vinden in onderstaande tabellen. Gedurende de blowerdoormetingen was het zonnig en er stond een lichte bries (2 Beaufort).

Tabel 24: meetresultaten W5 - BD - OO

W5	Volledige woning			
Over- en onderdrukmeting				
		50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	962,0	198,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,76	0,36	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	1,93	0,40	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	1,61	0,33	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	7,96	1,64	m³/(h.m²)

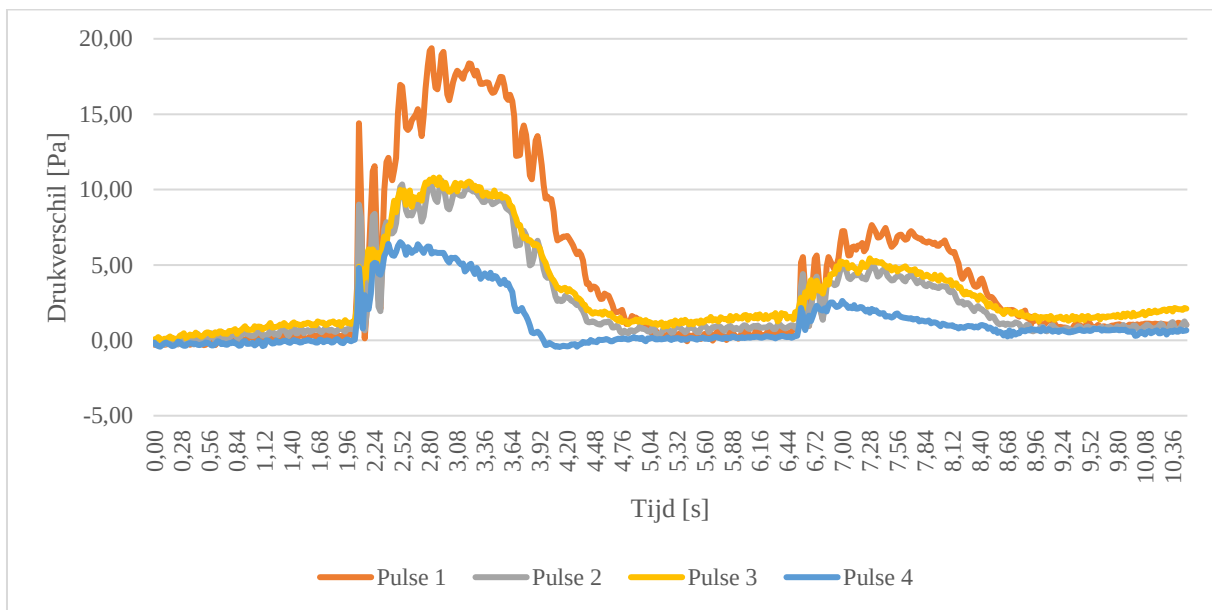
Tabel 25: meetresultaten W5 - BD - O

W5	Volledige woning			
Overdrukmeting				
		50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	1077,0	229,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,97	0,42	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	2,16	0,46	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	1,81	0,38	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	8,91	1,89	m³/(h.m²)

De resultaten tonen dat de woning goed scoort op gebied van luchtdichtheid. Zeker wat betreft houtskeletbouw. Bij deze bouwmethode dient echter extra aandacht besteed te worden aan de luchtdichtheid ten opzichte van een traditionele bouwwijze.

6.7.2 Pulse

In totaal zijn in woning W5 vier Pulsemetingen uitgevoerd, met telkens 2 pulsen per meting. De eerste meting werd gebruikt om een goede inschatting te kunnen maken van de vereiste druk in het opslagvat, om tot een optimaal drukbereik te komen. Dit is ook duidelijk te zien op de grafiek. Na evaluatie van gebouwen W3 en W4 is namelijk gebleken dat de Pulse problemen heeft bij luchtdichte woningen. Om die reden werd vervolgens getest bij een lage druk. Bij onderstaande grafiek is geen rekening gehouden met een correctiefactor voor de wind.



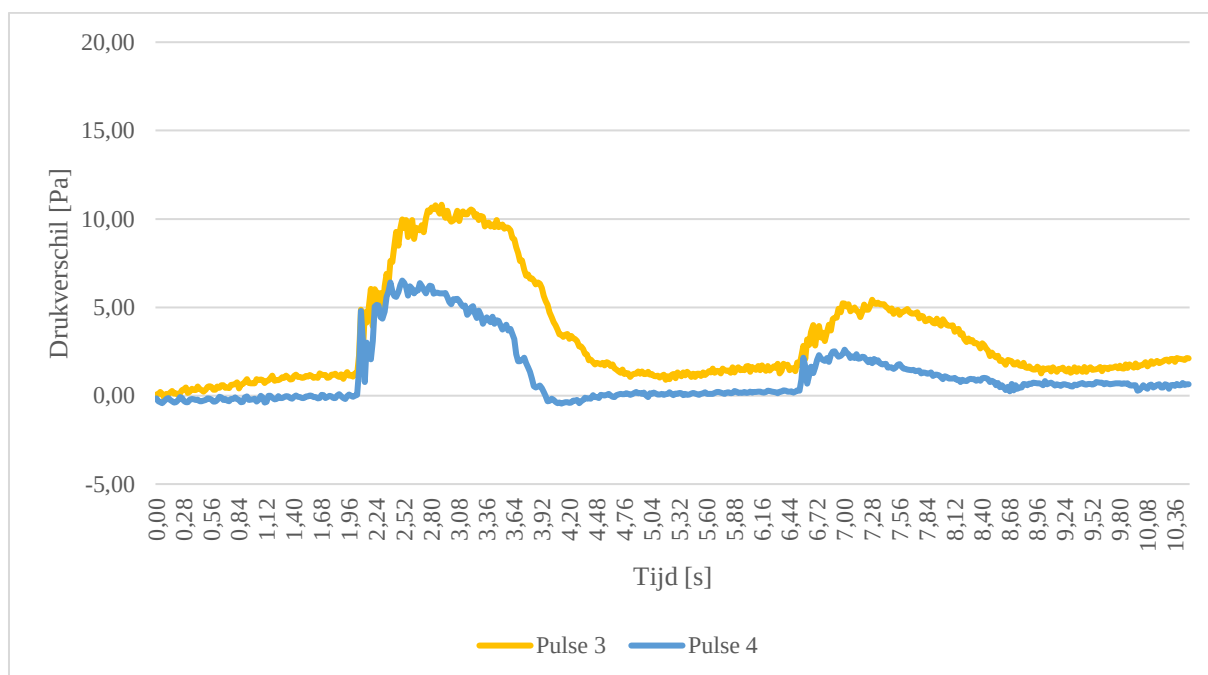
Figuur 82: Pulsemetingen W5

Zoals al bij de meeste testen gebleken is, is het drukbereik ook bij deze testen bij de 1^{ste} stap per meting te hoog. Dit wil zeggen dat het laagst gemeten drukverschil groter is dan het vereiste drukverschil van 4 Pa. Op die manier wordt geen resultaat berekend. Dit omdat een extrapolatie van de resultaten altijd een onnauwkeurigheid met zich meebrengt.

Vanaf de tweede meting is het drukbereik van de tweede stap van de meting wel optimaal. Bij Pulse 2 en Pulse 3 is er echter te veel fluctuatie om tot een goed resultaat te komen. Een teveel aan fluctuatie zorgt ervoor dat de correlatie tussen de verschillende meetpunten onvoldoende is.

Bij de tweede stap van Pulse 4 wordt wel aan alle voorwaarden voldaan. Op die manier geeft deze stap een resultaat, dat gebruikt kan worden, voor het luchtdebiet bij 4 Pa. Hierbij dient vermeld te worden dat bij Pulse 4 het toestel op een andere plaats in de woning gepositioneerd werd.

Het drukverschil tussen de testen is wel opvallend. Ondanks het feit dat het luchtvat bij Pulse 3 tot 3,13 bar is opgeladen en Pulse 4 tot 3,5 bar. Bij een iets lagere druk bij Pulse 3 wordt een hoger drukverschil behaald dan bij Pulse 4.



Figuur 83: vergelijking Pulse 3 & 4 - W5

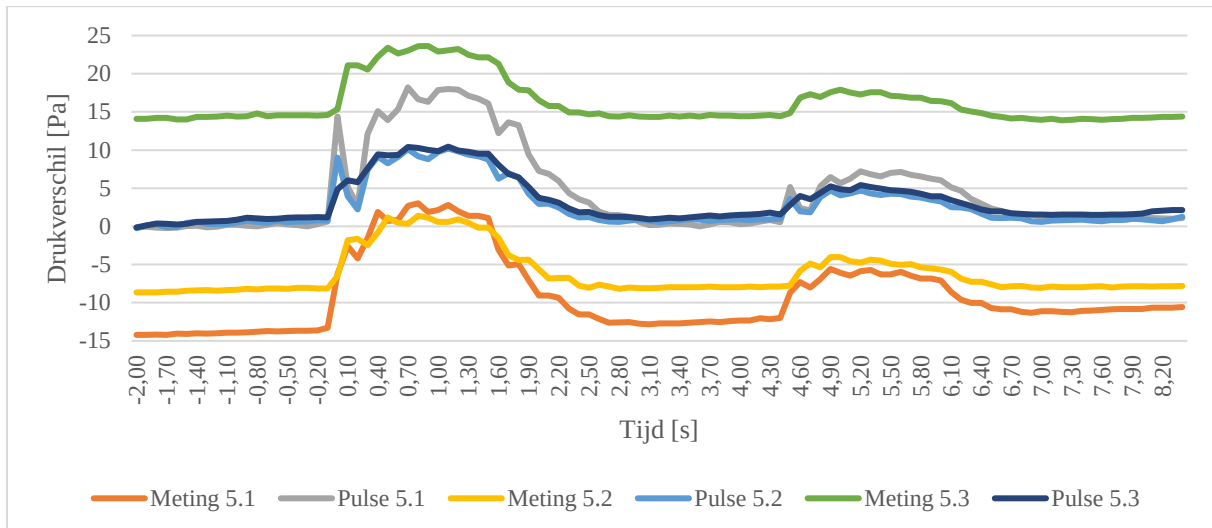
Bij de tweede meting van Pulse 4 wordt voldaan aan alle voorwaarden. Het lekdebiet bij 4 Pa bedraagt 154,80 m³/h. De berekende grootheden zijn terug te vinden in onderstaande tabel.

Tabel 26: meetresultaten W5 - P

W5	Volledige woning			
	Overdrukmeting (Pulse)			
		50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	-	154,8	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$		0,28	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$		0,31	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)		0,26	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$		1,28	m³/(h.m²)

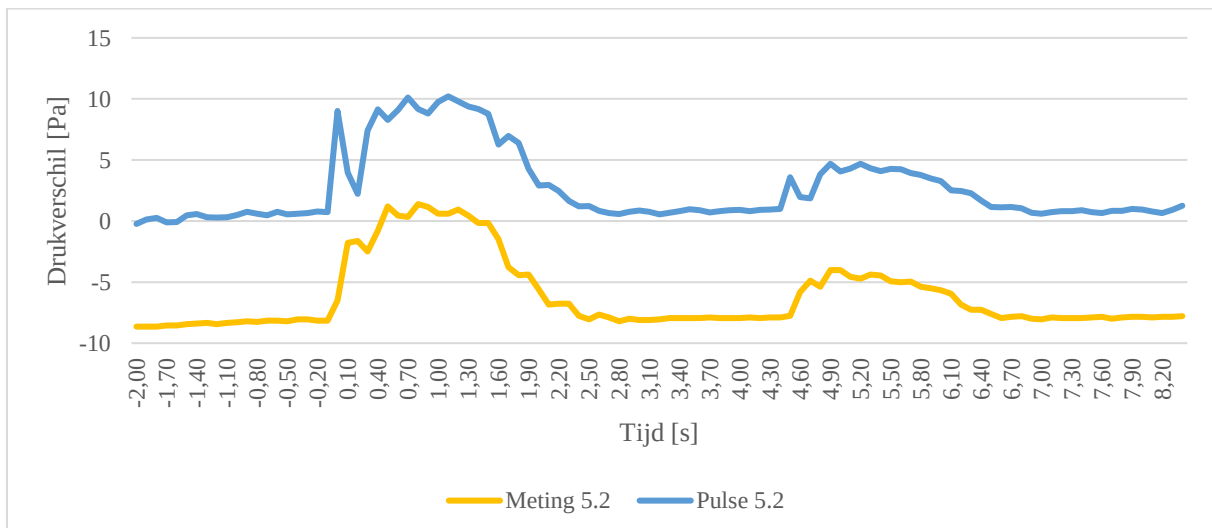
6.7.3 Drukverschil

Er werden drie metingen uitgevoerd waarbij het drukverschil in een andere ruimte geregistreerd werd door middel van de DG-700 drukmeter. De resultaten werden verwerkt door middel van de TECLOG 3 software. Wanneer beide metingen naast elkaar geplaatst worden, worden onderstaande grafieken bekomen.



Figuur 84: registratie drukverschil 1 – W5

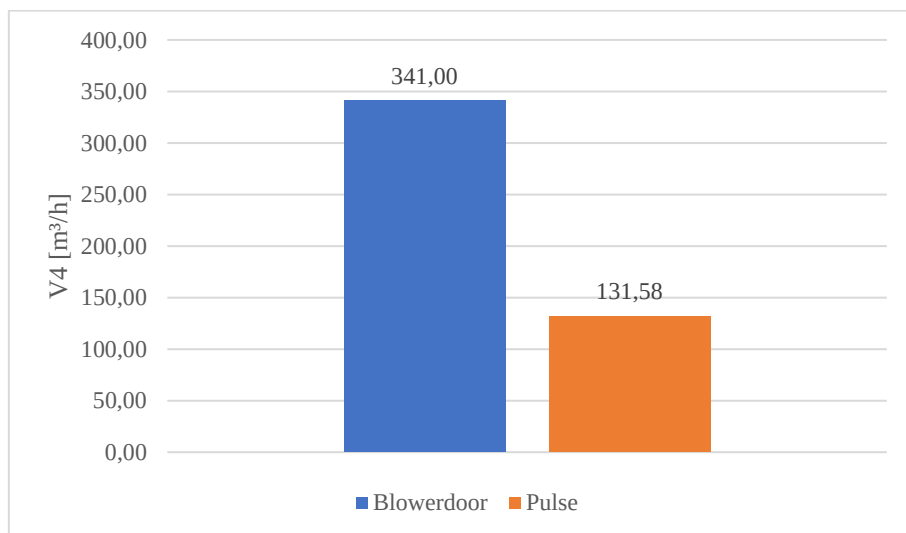
Wanneer Pulse 2 meer in detail bekeken wordt, is opnieuw zichtbaar dat het drukverloop in een andere ruimte minder invloed ondervindt van een plotse drukval. De drukdaling is wel zichtbaar, maar niet van de grootorde van deze gemeten door de Pulse.



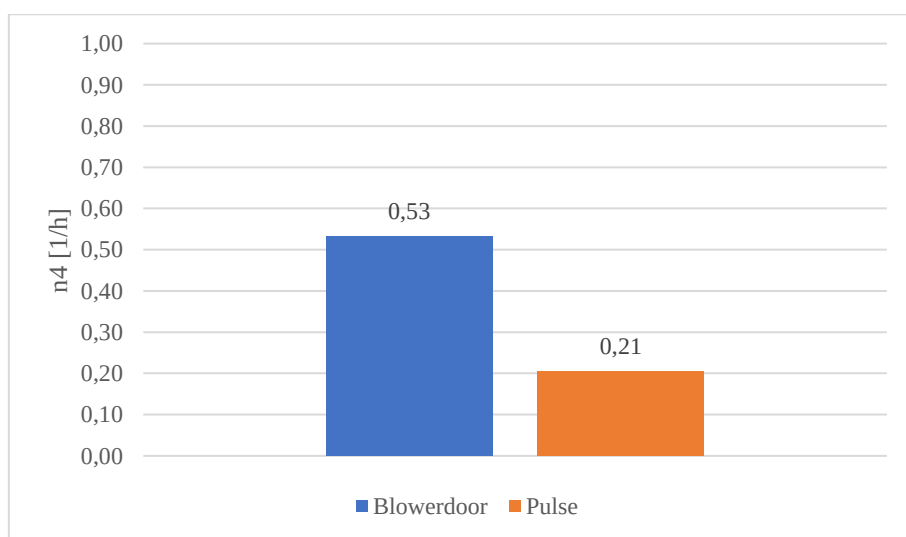
Figuur 85: registratie drukverschil 2 - W5

6.7.4 Vergelijking

Wanneer de resultaten van de Blowerdoormeting naast deze van de Pulsemeting geplaatst worden, wordt volgend resultaat verkregen (zie Figuur 87). De n_4 -waarde bij de Blowerdoor bedraagt 0,53 1/h, het infiltratievoud bij 4 Pa bij de Pulse is 0,21 1/h. Dit is een verhouding ten opzichte van elkaar van 39,62%.



Figuur 86: vergelijking V_4 -waarde W5



Figuur 87: vergelijking n_4 -waarde W5

7. Testwoning 6

7.1 Blowerdoor

Van dit gebouw werden twee Blowerdoormetingen uitgevoerd. Eénmaal zowel een over- als onderdruk meting en éénmaal enkel een overdrukmeting. De metingen werden uitgevoerd volgens de voorgeschreven norm. Bijgevolg werden de nodige maatregelen genomen om het gebouw meetklaar te maken.

De gemeten luchtlekdebieten en de daarbij berekende grootheden zijn terug te vinden in onderstaande tabellen.

Tabel 27: meetresultaten W6 - BD - OO

W6		Volledige woning						
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2212,99	-	-	-	-	-	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,76	-					1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	-	-					m³/(h.m²)
	$\dot{V}_{\Delta P}$ (EPB)	1,78	-					m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	-	-					m³/(h.m²)

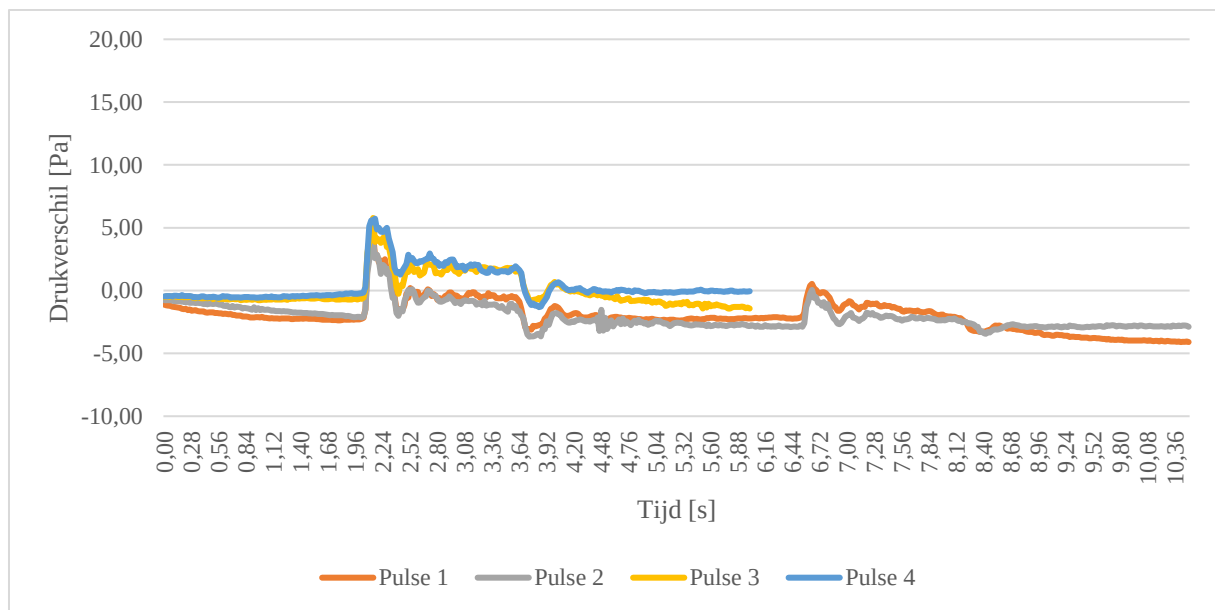
Tabel 28: meetresultaten W6 - BD - O

W6	Volledige woning							
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	2229,7	-	2074.5	-	2152,1	-	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,77	-	1,65	-	1,71	-	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)
	$V_{\Delta P}$ (EPB)	1,79	-	1,67	-	1,73	-	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)

7.2 Pulse

Bij deze woning werden vier Pulsemetingen uitgevoerd. Opnieuw duikt hier hetzelfde probleem op als bij de eerste testen bij W1. De druk in het luchtvat wordt niet geregistreerd. Op die manier kan geen meetresultaat berekend worden. De oorzaak van dit probleem kan niet meteen achterhaald worden.

Dit is echter niet het enige probleem. Omwille van het grote gebouwvolume (meer dan 1200 m³) wordt met moeite het vereiste drukverschil van 4 Pa gehaald. Enkel Pulse 3 en Pulse 4 slagen erin om een drukverschil van 5 Pa te behalen. Ook om die reden kan geen resultaat gemeten worden. Het luchtvat wordt nochtans opladen tot de maximale druk van 5,6 bar.



Figuur 88: Pulsemetingen W6

Uit deze metingen blijkt dat het luchtvat van 60 liter (werkelijk 58,5 liter) onvoldoende groot is om in het gebouw een drukverschil van 4 Pa te creëren. Dit komt in hoofdzaak door het grote gebouwvolume en niet zozeer door de luchtdichtheid. Bij het Pulsetoestel is de mogelijkheid voorzien om een extra luchtvat toe te voegen. De beide vaten zouden op hetzelfde ogenblik voor een drukstijging zorgen. Door de extra inhoud zou het drukverschil in theorie wel voldoende hoog gaan en mogelijke schommelingen zouden overwonnen kunnen worden. Deze werkmethode staat bij het schrijven van deze scriptie echter nog niet op punt.

Omwille van het feit dat er geen meetresultaten voorhanden zijn, wordt ook geen vergelijking gemaakt met de resultaten van de Blowerdoor.

8. Testwoning 7

8.1 Blowerdoor

Bij testwoning 7 werden twee Blowerdoormetingen uitgevoerd volgens de norm. De resultaten van deze metingen zijn terug te vinden in onderstaande tabellen.

Opmerkelijk is het grote verschil tussen beide metingen. Het is normaal dat niet elke meting exact hetzelfde resultaat oplevert, maar dit verschil is niet meteen te verklaren. De metingen werden op een verschillende dag uitgevoerd. Vermoedelijk is ergens bij de voorbereiding van de eerste meting iets over het hoofd gezien.

Tabel 29: meetresultaten W7 - BD - OO

W7		Volledige woning						
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	819,7	-	694,0	-	756,9	-	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,15	-	1,15	-	1,07	-	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	1,58	-	1,58	-	1,46	-	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)

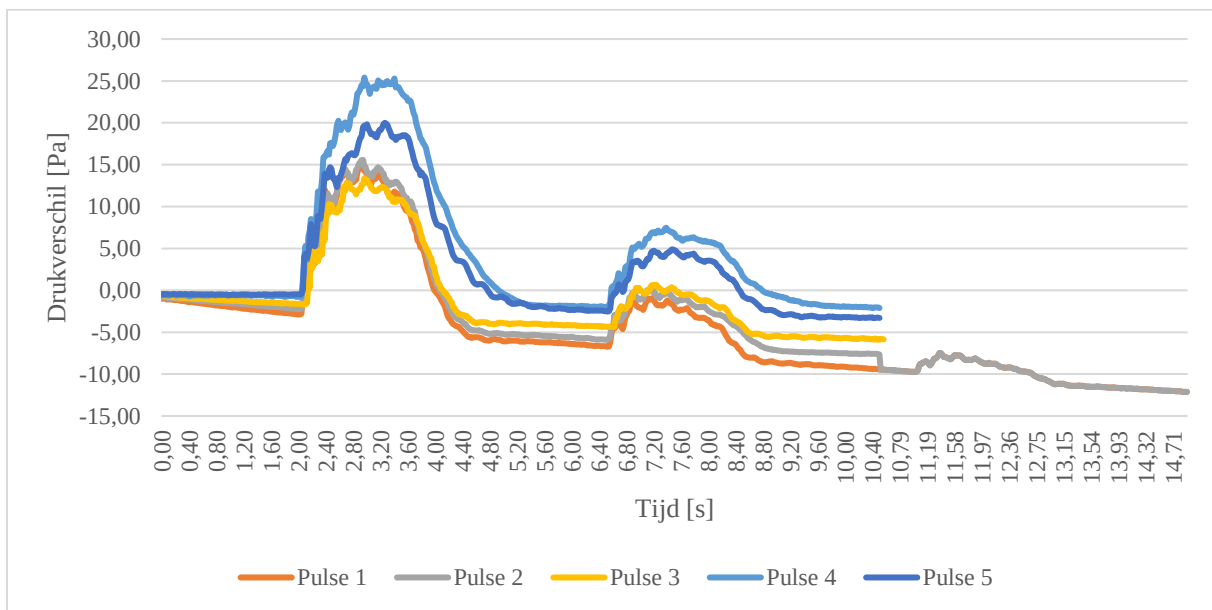
Tabel 30: meetresultaten W7 - BD - O

W7	Volledige woning							
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Gemiddelde		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	826,0	-	674,7	-	750,3	-	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	1,16	-	0,95	-	1,06	-	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	1,59	-	1,30	-	1,45	-	m³/(h.m²)
	$V_{\Delta P}$ (EPB)	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	-	-	-	-	-	-	m³/(h.m²)

8.2 Pulse

In woning W7 zijn in totaal vijf Pulsemetingen uitgevoerd. Het drukverloop ten opzichte van de tijd, gemeten door het meettoestel, is terug te vinden op onderstaande grafieken.

Bij de eerste meting doet het probleem van de drukregistratie van het luchtvat zich opnieuw voor. Deze meting kan bijgevolg niet gebruikt worden om een meetresultaat te bepalen. Bij de andere metingen doet dit probleem zich niet meer voor.



Figuur 89: Pulsemetingen - W7

Bij Pulse 2 en Pulse 4 wordt het luchtvat opgeladen tot 4,9 bar. Terwijl bij Pulse 3 en Pulse 5 het vat geladen wordt tot een druk van 5,6 bar. Opmerkelijk is dat bij de laatste twee Pulsemetingen het bereikte drukverschil veel hoger ligt dan de eerste metingen. Dit is enkel te verklaren door eventuele wijzigingen in de gebouwschil. Bijvoorbeeld door het afdichten van bepaalde luchtlekken.

Geen van deze metingen voldoet aan alle vereiste parameters. Alle berekende voorwaarden zijn terug te vinden in bijlage. Door niet te voldoen aan deze factoren kan geen van de meetresultaten als betrouwbaar bestempeld worden. Dit maakt het bijgevolg niet mogelijk om resultaten te vergelijken met de Blowerdoor.

8.3 Testwoning 8

8.3.1 Blowerdoor

Bij gebouw W8 zijn in totaal drie Blowerdoormetingen uitgevoerd. Zowel over- als onderdrukmetingen. De resultaten zijn terug te vinden in onderstaande tabel. Ook in deze woning werden de ventilatievoorzieningen geregeld door een systeem D. Zoals de technische specificatie het voorschrijft werd het systeem uitgeschakeld. Daarnaast werden de toe- en afvoermonden verzegeld.



Figuur 90: afdichting ventilatie W8



Figuur 91: meetopstelling W8 - BD

Tabel 31: meetresultaten W8 - BD - OO

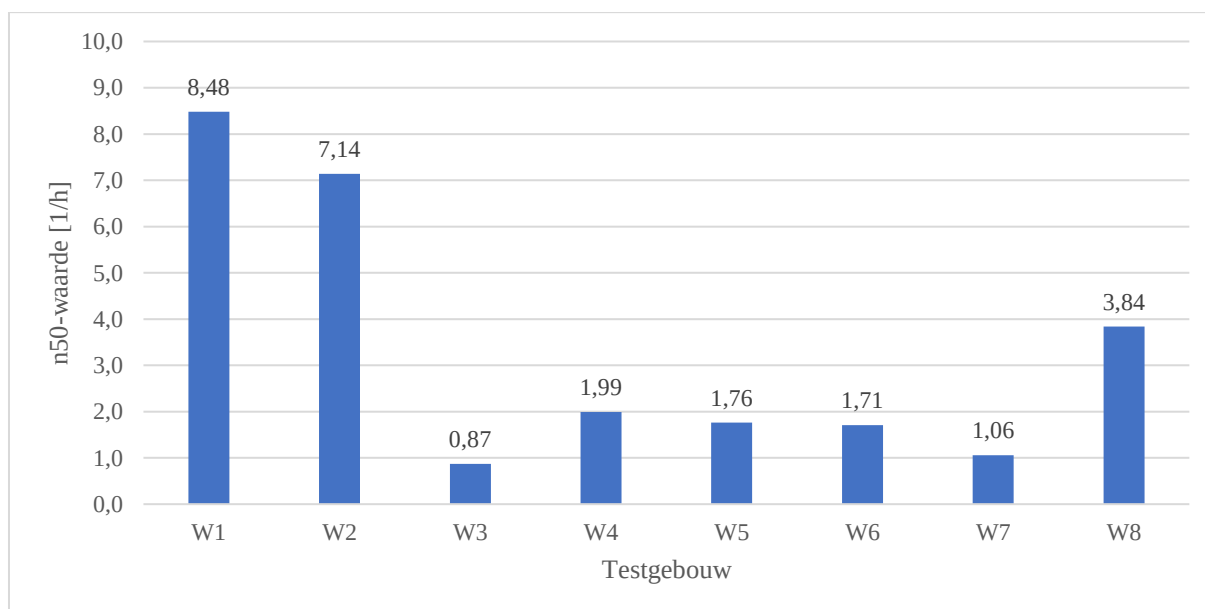
W8		Volledige woning						
Over- en onderdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Meting 3		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	1928,0	409,0	1832,0	388,0	1849,0	410,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	3,96	0,84	3,76	0,80	3,80	0,84	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	4,03	0,86	3,83	0,81	3,87	0,86	m³/(h.m²)
	$v_{\Delta P}$ (EPB)	4,05	0,86	3,85	0,82	3,88	0,86	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	16,08	3,41	15,28	3,24	15,42	3,42	m³/(h.m²)

Tabel 32: meetresultaten W8 - BD - O

W8	Volledige woning							
Overdrukmeting								
		Meting 1		Meting 2		Meting 3		
		50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	50Pa	4Pa	
Lekdebiet	$\dot{V}_{\Delta P}$	1929,0	426,0	1800,0	386,0	1842,0	409,0	m³/h
Infiltratievoud	$n_{\Delta P}$	3,96	0,88	3,70	0,79	3,79	0,84	1/h
Luchtdoorlatendheid	$q_{\Delta P}$	4,04	0,89	3,77	0,81	3,85	0,86	m³/(h.m²)
	$V_{\Delta P}$ (EPB)	4,05	0,89	3,78	0,81	3,87	0,86	m³/(h.m²)
	$w_{\Delta P}$	16,08	3,55	15,01	3,22	15,36	3,41	m³/(h.m²)

Zoals vermeld in hoofdstuk 6.6 is op zoek gegaan naar een gebouw met een infiltratievoud n_{50} van ongeveer 4 1/h. Op voorhand is het altijd moeilijk om de luchtdichtheid van gebouwen in te schatten. De resultaten van de Blowerdoormetingen tonen echter aan dat het gebouw perfect voldoet aan de gewenste vereisten.

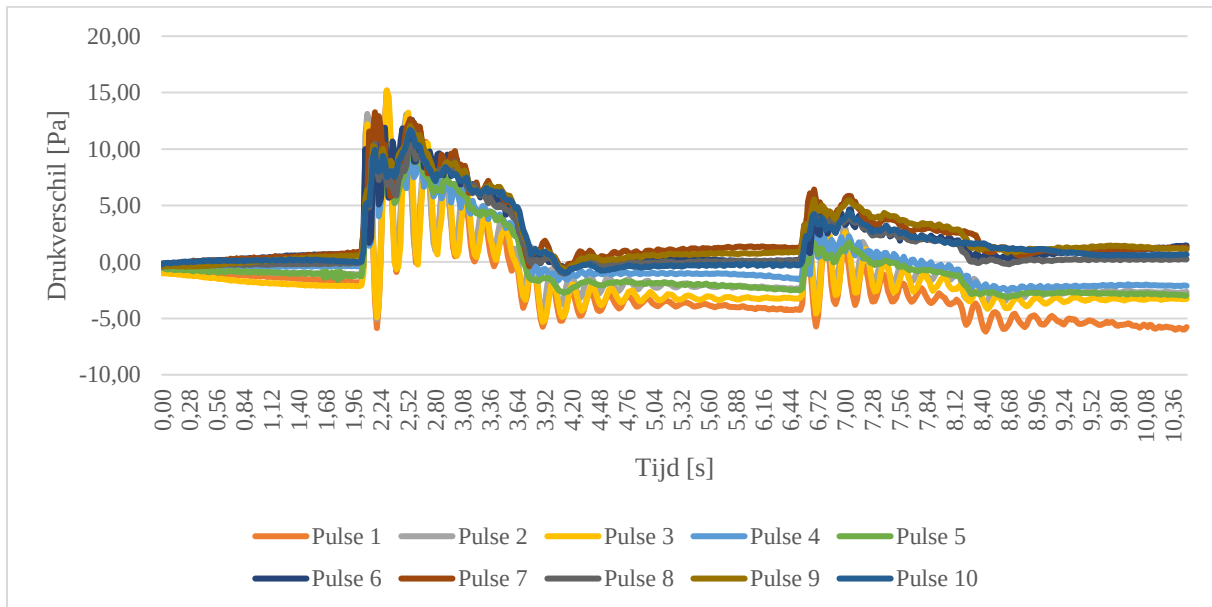
Op onderstaande grafiek zijn alle n_{50} -waarden uitgezet ten opzichte van elkaar. Het is duidelijk af te lezen dat, zoals op voorhand ook beoogd werd, er gebouwen uit de verschillende luchtdichtheidsklassen getest werden.



Figuur 92: samenvatting n_{50} -waarde testwoningen

8.3.2 Pulse

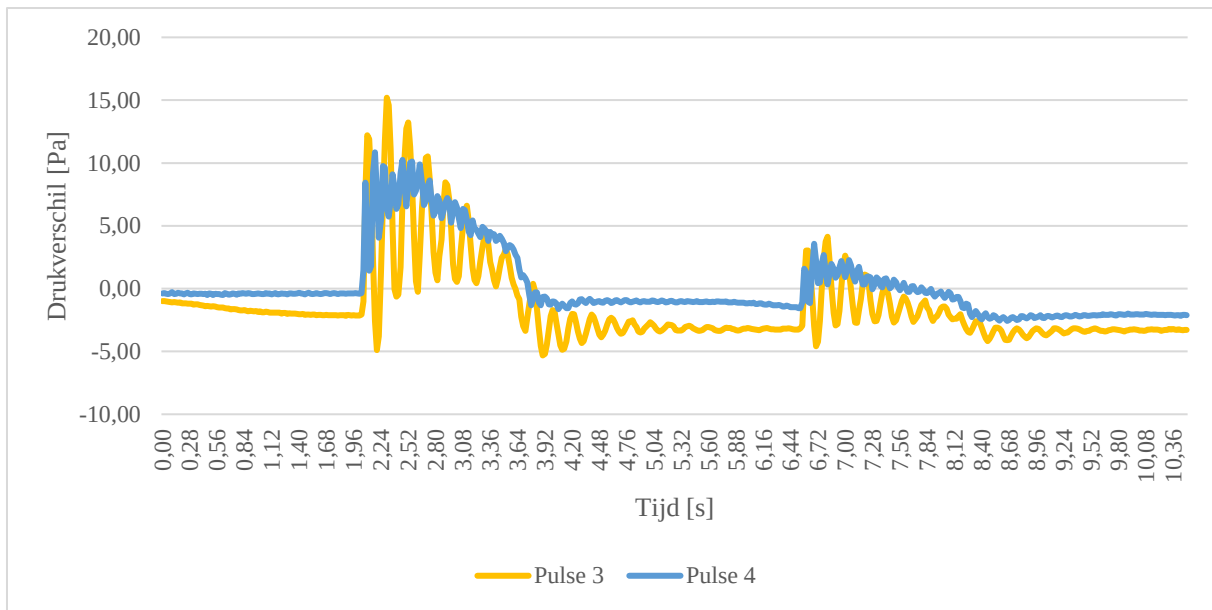
Door de ervaringen met het meettoestel uit alle voorafgaande metingen, werd bij dit gebouw specifiek rekening gehouden met alle eerder gemaakte opmerkingen. Zo werd het meettoestel onder meer in verschillende ruimtes binnen het gebouw geplaatst. Op basis van de n_{50} -waarde en het gebouwwolume van ongeveer 500 m³ werd beslist om het luchtvat volledig op te laden, dus tot 5,6 bar. De grafieken van de metingen zijn terug te vinden op onderstaande grafiek.



Figuur 93: Pulsemetingen W8

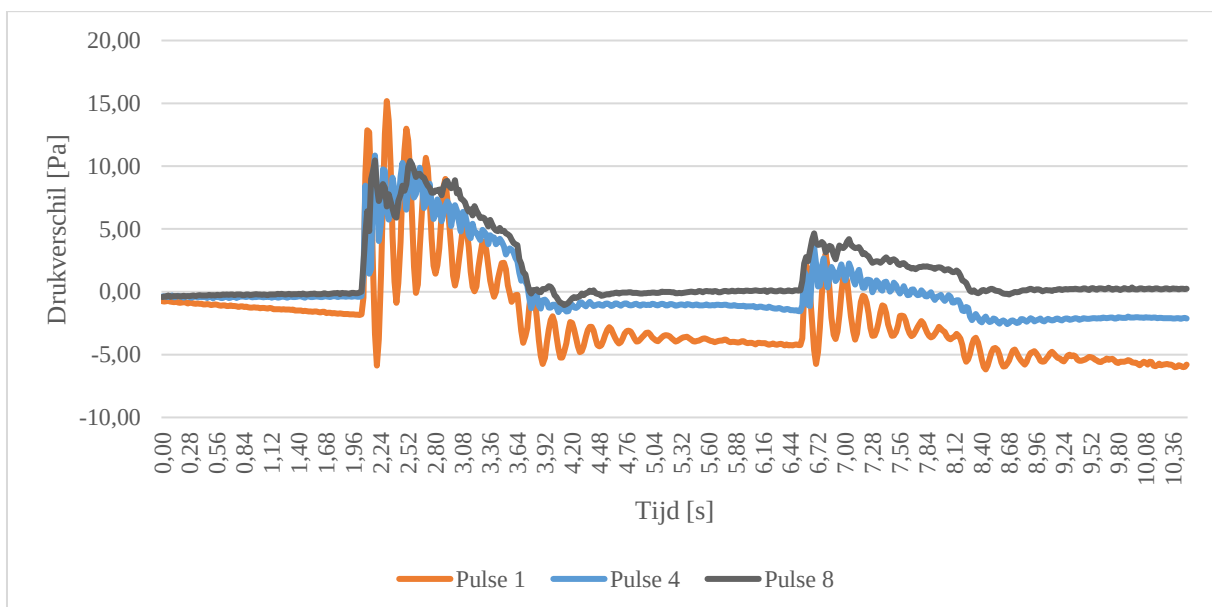
Opvallend is het terugkerend patroon in de drukdaling en drukstijging van de eerste drie testen. De oorzaak hiervan is niet meteen te verklaren. Wanneer het toestel verplaatst wordt naar een andere locatie binnen het gebouw is te zien dat de verandering in druk minder groot is, maar nog steeds is er een periodieke daling en stijging. Vermoedelijk is de oorzaak terug te vinden in de ruimte waar het meettoestel eerst opgesteld werd. De eerste curves werden ook niet aanvaard als een acceptabele Pulsemeting door de software. Het verschil is te groot.

Ondanks de periodieke stijging en daling kan bij de tweede meting van Pulse 4 wel een luchtlekdebiet gemeten worden met factoren die voldoen aan de minimumvereisten (R^2 , n-waarde). Het gemeten luchtlekdebiet bedraagt 200,16 m³/h (gemeten bij een drukverschil van 4 Pa).



Figuur 94: Pulsemetingen locatie 1 & 2 - W8

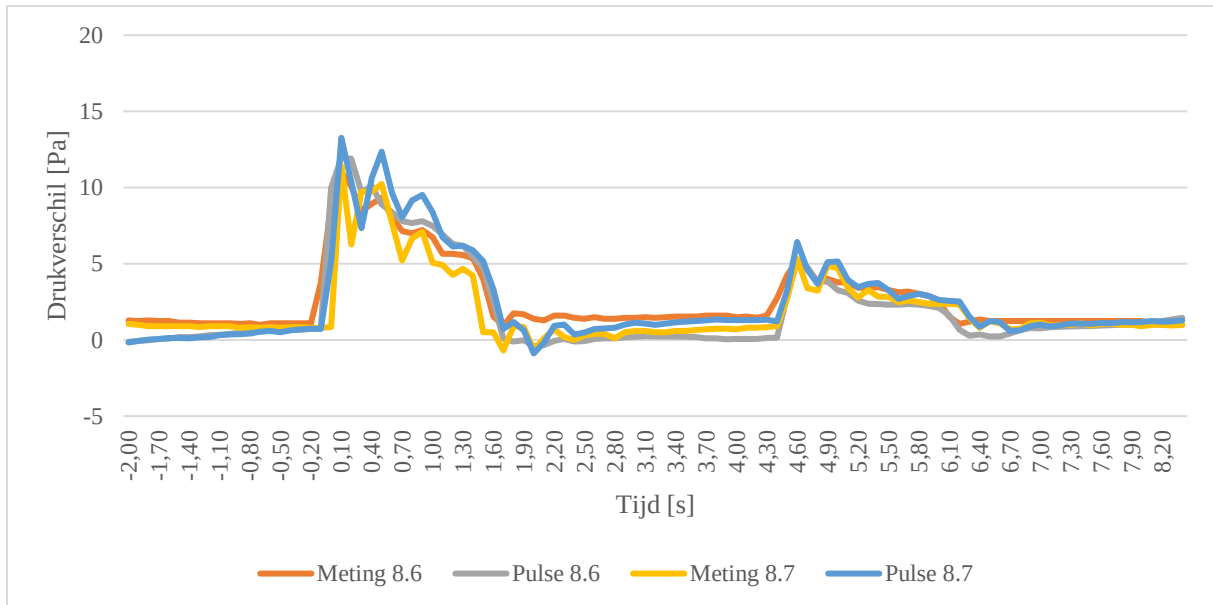
Het Pulsetoestel wordt ook nog op een derde locatie geplaatst. Op deze plaats is geen periodiek verloop herkenbaar. Door het grillig verloop is niet voldaan aan de vereisten om op die manier een accuraat meetresultaat te bekomen. Alle metingen op locatie 3 vertonen een gelijkaardig verloop, maar bij geen van de metingen kan een correct resultaat afgeleid worden. Hieruit blijkt nogmaals dat de locatie van het meettoestel in de ruimte van belang is. Het moeilijke is echter om hierin een lijn of vast patroon te herkennen.



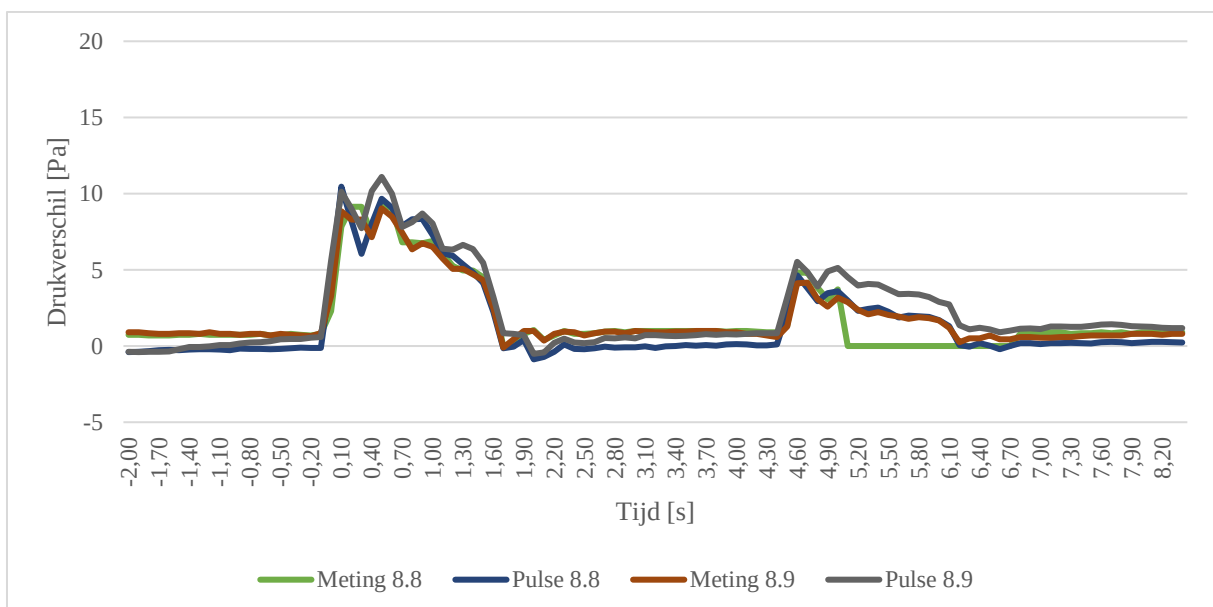
Figuur 95: Pulsemetingen per locatie - W8

8.3.3 Drukverschil

Op Figuur 96 en Figuur 97 is het drukverloop te zien dat door zowel het Pulsetoestel als een drukmeter in een andere ruimte gemeten werd. Er is te zien dat het drukverloop voor beide toestellen zeer gelijkaardig verloopt. Ook de fluctuaties, die bij andere gebouwen minder gelijklopend waren, komen in dit geval wel goed overeen. De grafieken tonen aan dat de drukstijging door de Pulse in alle ruimtes van het gemeten volume merkbaar is, en van dezelfde grootorde.



Figuur 96: registratie drukverschil 1 - W8



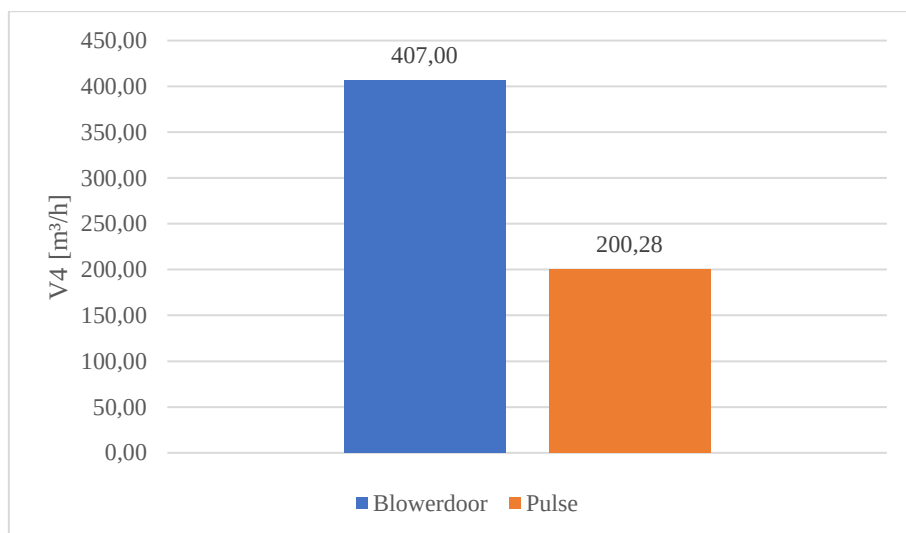
Figuur 97: registratie drukverschil 2 - W8

Bij meting 8.8 werd de drukdaling veel eerder ingezet van bij Pulse 8.8. De oorzaak hiervan ligt bij de registratie: er ontbreken namelijk meetpunten in dit tijdsinterval.

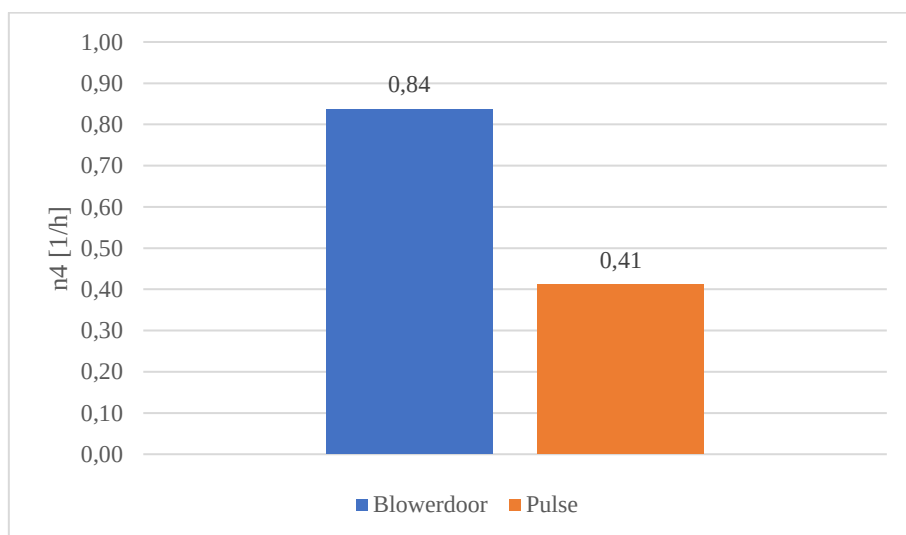
8.3.4 Vergelijking

Het (gemiddeld) gemeten luchtlekdebiet bij 4 Pa van de Blowerdoormetingen bedraagt 407,00 m³/h. Het gemiddeld resultaat bij de Pulsemetingen bedraagt 200,28 m³/h. De grafiek hiervan is terug te vinden op onderstaande afbeelding.

De verhouding van de twee meetmethodes bedraagt 48,81%.



Figuur 98: vergelijking $\dot{V}_4$ -waarde W8

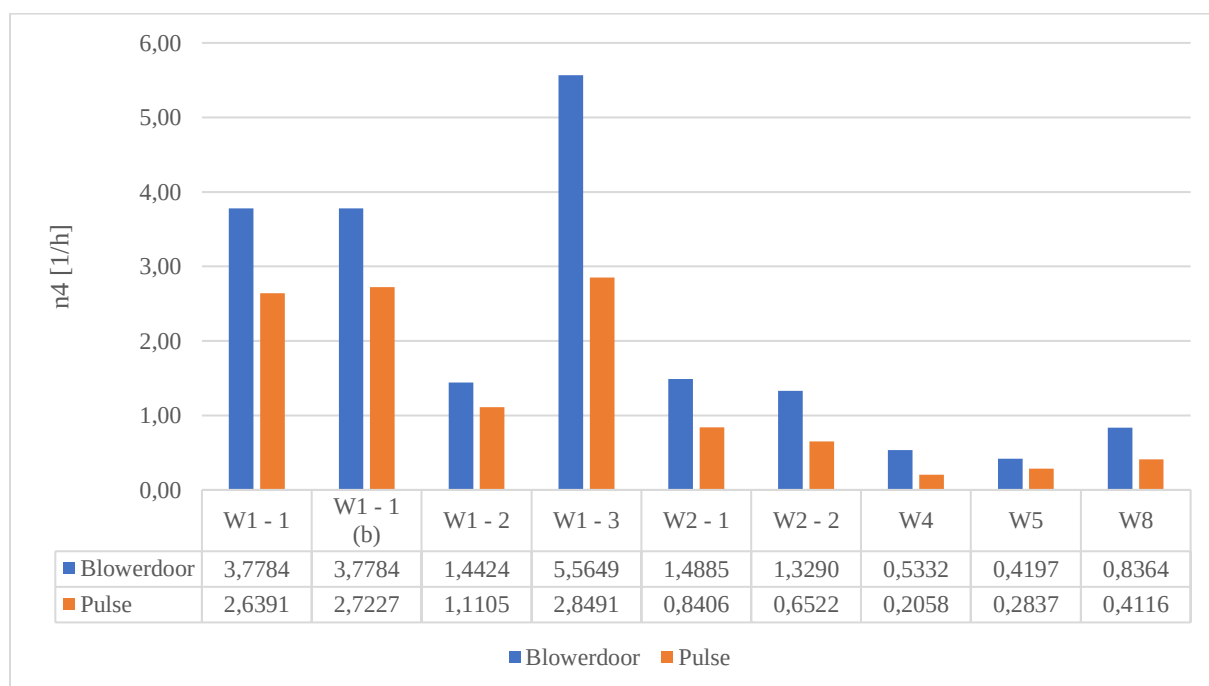


Figuur 99: vergelijking n_4 -waarde W8

9. Samenvatting

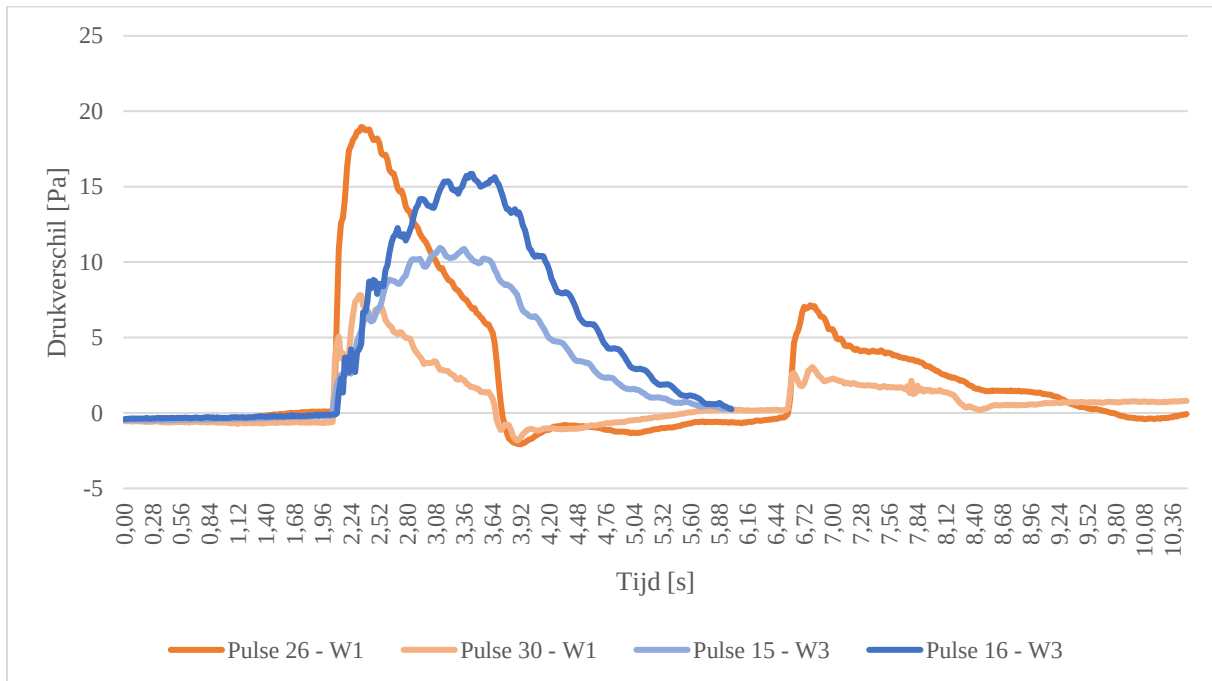
Op onderstaande afbeelding zijn alle volumes, waarvan beide metingen succesvol waren, uitgezet. De vergelijking tussen de Blowerdoor en de Pulsemeting wordt gemaakt. Er is duidelijk zichtbaar dat de Pulsemeting een lager meetresultaat behaalt dan de Blowerdoormeting. De verhoudingen van de Pulse ten opzichte van de Blowerdoor gaan van 38,59% (W4) tot 76,99% (W1 – 2). Er is echter niet meteen een verband te vinden in de verhoudingen. Zowel bij de graad van luchtdichtheid, type bebouwing, weersomstandigheden, gebouwgruote kan geen relatie gevonden worden.

Het feit dat de Pulse lager dan de Blower meet bij iedere meting, is op zich wel positief. Het toont aan dat de Pulse consequent meting uitvoert.

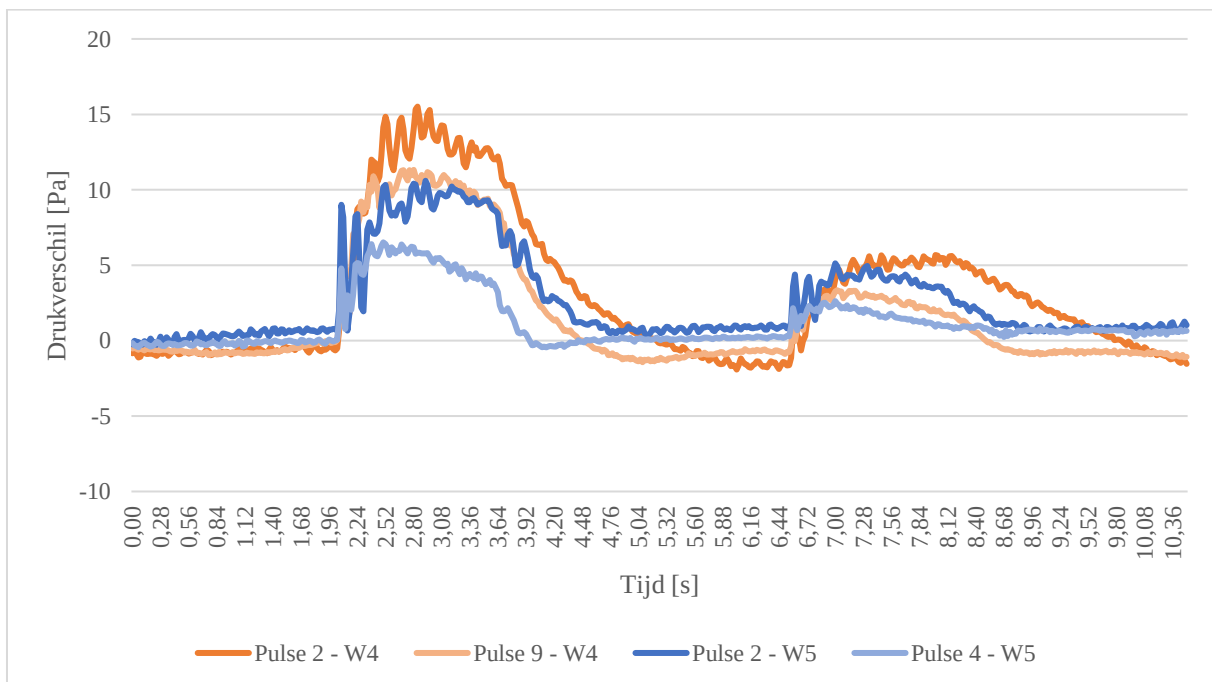


Figuur 100: samenvatting meetresultaten

Een tweede punt dat naar voor kwam bij de metingen is de positie van het meettoestel in het gebouw. Een samenvatting hiervan is te vinden op onderstaande grafieken. Er is duidelijk zichtbaar dat het drukverloop grondig kan verschillen, ondanks dezelfde instellingen. De ideale opstelling of oorzaak van dit gegeven werd echter niet gevonden.



Figuur 101: samenvatting positie Pulse (1)



Figuur 102: samenvatting positie Pulse (2)



Figuur 103: samenvatting positie Pulse (3)

10. Besluit

10.1 Inleiding tot besluit

Om aan de steeds strengere milieu- en duurzaamheidsnormen te voldoen, moeten ook in de bouwwereld inspanningen worden geleverd. Eén ervan is om de energievraag van woningen te beperken. Het energieverbruik beperken kan door voldoende te isoleren en slimme technieken te gebruiken. Omwille van de betere isolerende waarde dient ook aandacht besteed te worden aan hygiënische ventilatie om de kwaliteit van de binnenlucht te garanderen. Een belangrijk gegeven dat hierbij niet over het hoofd gezien mag worden is de luchtdichtheid. Een gebouw met veel luchtlekken zal op die manier onder meer het effect van het isolatiepakket tenietdoen en het ventilatiesysteem verstoren. Dit leidt tot een hoger energieverbruik, wat net beperkt diende te worden. Ook heeft een slechte luchtdichtheid een negatief effect op het binnenklimaat, met mogelijks negatieve gevolgen voor de constructie én de bewoners.

Om een precieze waarde op de luchtdichtheid van een gebouw te kleven, dient een luchtdichtheidsmeting uitgevoerd te worden. Een luchtdichtheidsmeting bestaat erin om het gebouw in over- en/of onderdruk te brengen. Bij het in over- of onderdruk brengen wordt een drukverschil opgebouwd ten opzichte van de referentiedruk buiten het gebouw. Op die manier wordt doorheen de luchtlekken een luchtstroom (naar buiten bij overdruk en naar binnen bij onderdruk) gecreëerd. De luchtstroom bij een bepaald gekend drukverschil wordt gemeten. Op die manier kan berekend worden hoeveel debiet er door deze luchtlekken ontsnapt.

Op dit moment worden deze luchtdichtheidsmetingen in hoofdzaak uitgevoerd door middel van een Blowerdoortest. Deze meet de luchtdichtheid door het creëren van hoge drukverschillen (50 Pa). Deze drukverschillen zijn eerder onnatuurlijk. Om die reden werd een nieuwe meetmethode ontwikkeld die de luchtdichtheid bepaalt bij meer natuurlijke drukverschillen (4 Pa).

10.2 Evaluatie Pulse

Op basis van de metingen in het kader van deze scriptie en de analyse ervan blijkt dat de Pulsemeting een lager meetresultaat behaalt dan de Blowerdoormeting. Dit gegeven werd bij iedere testwoning onafhankelijk van elkaar vastgesteld. Er is echter geen verband merkbaar tussen de grootte van de onderlinge verschillen. Het feit dat bij iedere meting de Pulse een lager meetresultaat behaalt is positief. Het toont aan dat de Pulse consequent meet. Dit blijkt overeen te stemmen met vorig onderzoek naar dit onderwerp.

Op basis van deze metingen is het niet mogelijk om te bepalen welk meetsysteem het meest accuraat is. Uit eerder onderzoek bleek de Pulse een gekende opening preciezer te kunnen meten dan de Blowerdoor. Verder is het ook niet mogelijk om te achterhalen waar het onderlinge verschil in de meetresultaten zich bevindt. Dit kan bijvoorbeeld zijn door extrapolatie, door de overschatting van de luchtdichtheid bij hoge drukverschillen, of een onderschatting bij metingen bij lage drukverschillen. Verder onderzoek kan zich hier eventueel op toespitsen.

Een tweede positief gegeven voor de Pulse is het feit dat, ondanks de lage drukverschillen in vergelijking met de Blowerdoor, de drukstijging in het volledig te meten volume merkbaar is. De registratie van het drukverschil in een ruimte 'ver' van het Pulsetoestel toont dit bij iedere meting aan. Hierbij dient wel nog de opmerking gemaakt te worden dat een te krachtige wind (zoals bij W4) het drukverschil in bepaalde ruimtes kan overtreffen. Dit kan de resultaten beïnvloeden. In dit geval bleek het echter ook niet mogelijk om een Blowerdoormeting tot een goed einde te brengen.

Er blijken echter ook een aantal minpunten naar boven te komen. Een eerste minpunt kwam reeds bij het meetprincipe naar voor. De Pulse meet namelijk enkel in overdruk. De norm raadt echter, het is geen verplichting, aan om zowel een over- als onderdrukmeting uit te voeren. Voor het uitvoeren van luchtdichtheidsmetingen in het kader van de EPB-eisen is een meting van zowel over- als onderdruk verplicht. En laat dit nu net het kader zijn waarbij in België zo goed als alle luchtdichtheidsmetingen uitgevoerd worden. Indien er toch slechts enkel een over- of een onderdrukmeting uitgevoerd wordt, dient een correctie van 1,4 op het meetresultaat toegepast te worden. Voor het gemiddelde luchtlekdebiet betekent dit een extra toevoeging van 20%.

Een tweede nadeel is het feit dat veel metingen niet voldoen aan de voorwaarden voor een goede test. Dikwijls bestaat er geen voldoende groot verband tussen de verschillende meetpunten om een lineaire regressielijn te bepalen, en de daarbij horende correlatie- en determinatiecoëfficiënt. Ook de vereiste n-waarde (minimaal 0,50 en 1,00) wordt niet altijd gehaald. Bij de eerste meting van de Pulse haalt het minimum opgemeten drukverschil vaak niet de waarde van 4 Pa. Dit is net de waarde waarbij een resultaat berekend wordt. Deze factoren zorgen ervoor dat, om een bepaald volume te meten, meerdere testen uitgevoerd moeten worden, om op die manier tot een correcte meting te komen. Zo werden in totaal 101 Pulsemetingen uitgevoerd, waarvan slechts 24 voldeden aan alle vereisten, dit is ongeveer 1/4 van alle metingen. Een Pulsemeting duurt slechts enkele seconden, maar het opladen van het vat duurt 11 minuten (vooraleer het vat volledig opgeladen is). De tijdswinst die er zou kunnen zijn in vergelijking met de Blowerdoor wordt hierdoor teniet gedaan. Deze waarden dienen echter genuanceerd te worden. Een aantal metingen kenden technische problemen, en een dertigtal metingen werden uitgevoerd in zeer luchtdichte woningen. Wanneer deze metingen buiten beschouwing gelaten worden, voldoen 24 van de 65 testen. Dit is ongeveer 37%.

De oorzaak van het feit dat veel metingen niet voldoen aan de eisen kan voor een deel verklaard worden door de positie van het toestel. Bij het vergelijken van de drukverlopen van de verschillende metingen is gebleken dat de plaats van het toestel binnen een woning invloed kan hebben op het verloop. Bij de metingen waarbij niet voldaan is aan de voorwaarden is vaak een grillig verloop van het drukverschil te zien. Deze drukdalingen en -stijgingen zorgen voor onvoldoende samenhang tussen de meetpunten. Deze fluctuaties blijken in eenzelfde gebouw kleiner te zijn als het meettoestel op een andere plaats gepositioneerd is, waardoor vaak wel een meetresultaat bepaald kan worden. Er is echter geen verband gevonden tussen de goede metingen en de eigenschappen van de specifieke ruimte of omgevingsfactoren. Het probleem kan zich ook situeren bij de positie van de drukmeter van het Pulsetoestel ten opzichte van het luchtvat die de drukstijging creëert. Door de beperkte lengte van de datakabel tussen het luchtvat en de drukmeter en computer dienen deze steeds dicht bij elkaar geplaatst te worden. Uit de vergelijking van het drukverloop in verschillende ruimtes van het gebouw blijkt dat de ruimtes verder verwijderd van het luchtvat minder hinder ondervinden van de fluctuaties. Dit is in de meeste gevallen zo, maar echter niet in alle. Een mogelijke oplossing voor het probleem van de fluctuaties (en bijgevolg de onvoldoende samenhang tussen de meetpunten) is om de computer (met de drukdifferentiemeter) in een andere ruimte te plaatsen dan het luchtvat. Uiteraard is er wel een verbinding nodig tussen de toestellen. Dit probleem zou bij een Blowerdoor ook optreden wanneer de meetprobe voor de binnendruk vlak bij de ventilator zou liggen. Uiteraard is dit geen onoverkomelijk probleem. Met een langere kabel kan dit eventueel reeds opgelost worden.

Tot slot blijkt, zoals eerder vermeld, dat het Pulsetoestel problemen heeft met het meten van luchtdichte woningen. Door de goede luchtdichtheid daalt de gecreëerde overdruk traag, wat ervoor zorgt dat een tweede en derde meting beïnvloed worden. Hierdoor is er binnen het tijdsinterval van drukregistratie, geen mogelijkheid om een background pressure op te meten. Op die manier kan geen betrouwbaar resultaat berekend worden. Mede door de testen in het kader van deze scriptie kon dit probleem voorgelegd worden aan de fabrikant en zullen in de (nabije) toekomst mogelijke oplossingen uitgewerkt worden.

In voorgaande onderzoeken over dit onderwerp werd er echter geen melding gemaakt van mogelijke problemen bij de metingen met de Pulse. Het betrof toen telkens een andere versie van het toestel. De methode blijft uiteraard dezelfde.

Als algemene conclusie kan gesteld worden dat de Pulse veelbelovende resultaten biedt, rekening houdende met het feit dat de methode nog steeds in zijn kinderschoenen staat. Om ingeburgerd te geraken als een volwaardig en betrouwbaar meettoestel voor luchtdichtheidsmetingen dienen echter nog een aantal, niet onoverkomelijke, punten bijgeschaafd te worden.

10.3 Verder onderzoek

Op basis van dit onderzoek is het onmogelijk te zeggen welk meettoestel nu de meeste correcte weergave van de werkelijke situatie aantoont. Verder onderzoek kan zich hierop toespitsen. Het vergelijken van twee gelijkaardige, maar toch cruciaal verschillende methodes, is echter niet vanzelfsprekend. Er zijn enorm veel factoren die de metingen en de resultaten beïnvloeden. Metingen in een gecontroleerde omgeving kunnen hiervoor deels een oplossing bieden. Hierbij is het echter wel van groot belang dat deze metingen ook aan veldtesten gekoppeld kunnen worden.

Na eventuele updates van de Pulse kan verder onderzoek verricht worden in luchtdichte woningen. Omdat dit nog steeds de doelgroep is voor het uitvoeren van luchtdichtheidsmetingen is het belangrijk dat ook in deze gebouwen de luchtdichtheid correct bepaald kan worden. Dit geldt echter ook voor niet-luchtdichte woningen. Voor niet-luchtdichte woningen bestaat reeds een oplossing: een extra luchtvat toevoegen. Deze manier van werken werd wel nog niet getest.

Een gedetailleerde analyse maken van de meest effectieve positie voor het meettoestel binnen een gebouw behoort ook tot de mogelijkheden voor verder onderzoek. Op die manier kan de Pulse verder ontwikkeld worden, om zo effectief met één snelle meting de luchtdichtheid van een gebouw te kunnen begroten.

11. Bronnen

Belgisch instituut voor normalisatie (BIN). (2005). NBN EN 1991-1-4.

Belgisch instituut voor normalisatie (BIN). (2015). NBN EN ISO 9972:2015.

Bracke, W., Laverge, J., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2013). Durability and measurement uncertainty of airtightness in extremely airtight dwellings.

Cooper, E., & Etheridge, D. (2007a). An innovative technique for measurement of building leakage at low pressures. Gepresenteerd bij IAQVEC, Sendai, Japan.

Cooper, E., & Etheridge, D. (2007b). Determining the adventitious leakage of buildings at low pressure. Part 1: uncertainties.

Cooper, E., Etheridge, D., & Smith, S. (2007). Determining the adventitious leakage of buildings at low pressure. Part 2: pulse technique.

Cooper, E., Zheng, X., Wood, C., Gillot, M., Tetlow, D., Riffat, S., & De Simon, L. (2016). Field trialling of a new airtightness tester in a range of UK homes.

De Brauwere, T., & Van de Velde, S. (2010). Meting van luchtdichtheid en binnenluchtkwaliteit in nieuwbouwwoningen (bouwjaar 2006-2009).

European Commision. (2017). EU climate action. Geraadpleegd 16 oktober 2017, van https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en

FliB. (2008). Beiblatt zur DIN EN13829.

FOD Economie. (2014). STS P 71-3: Luchtdichtheid van gebouwen - luchtdichtheidstest.

Ghazi, C. J., & Marshall, J. S. (2014). A CO₂ tracer-gas method for local air leakage detection and characterization.

Janssens, A., & Hens, H. (2003). Interstitial condensation due to air leakage: a sensitivity analysis.

Kalamees, T. (2007). Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia.

- Meier, A. (1994). Infiltration: Just ACH50 Divided by 20?
- Patel, T., Mitsingas, C., Miller, J. P., & Newell, T. A. (2011). Comparison of blower door and tracer gas testing methods for determination of air infiltration rates through building envelopes at normal operating conditions. Gepresenteerd bij International Conference on Energy Sustainability, Washington DC.
- Reiß, J., & Erhorn, H. (2003). Messtechnische Validierung des Energiekonzeptes einer großtechnischen umgesetzten Passivhausentwicklung in Stuttgart-Feuerbach, (Fraunhofer Institute for Building Physics), 132.
- Van Den Bossche, N. (2005). Luchtdichtheid: Experimenteel onderzoek naar schattingsmethodes bij woningen. Universiteit Gent.
- Van der Veken, J., Creylman, J., & Lenaerts, T. (2013). *Studie naar kostenoptimale niveaus van de minimumeisen inzake energieprestaties van nieuwe residentiële gebouwen* (p. 130). Kenniscentrum Energie.
- Vlaamse Milieumaatschappij. (2009). *Milieurapport Vlaanderen 2009* (p. 384).
- WHO Regional Office for Europe. (2009). WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. World Health Organization.
- Winters, S., Ceulemans, W., Heylen, K., Pannecoucke, I., Vanderstraeten, L., Van den Broeck, K., ... Verbeeck, G. (2015). *Wonen in Vlaanderen anno 2013. De bevindingen uit het Grote Woononderzoek 2013 gebundeld* (p. 97). Leuven: Steunpunt wonen.
- Wouters, P., Loncour, X., Vandaele, L., Janssens, A., Paepe, M. D., Roels, S., ... Carrie, R. (2012). *Onderzoek naar een draagvlak voor het invoeren van minimale luchtdichtheidseisen* (p. 57).
- WTCB, & WenK. (1998). *SENVIVV studie van de Energieaspecten van Nieuwbouwwoningen in Vlaanderen: Isolatie, Ventilatie, Verwarming - eindverslag*. VLIET.

Xiaofeng, Z., Cooper, E., Mazzon, J., Wallis, I., & Wood, C. (2017). A comparison study of the blower door and novel pulse technique on measuring enclosure airtightness in a controlled environment. Gepresenteerd bij AIVC Conference, Nottingham, UK.

12. Bijlagen

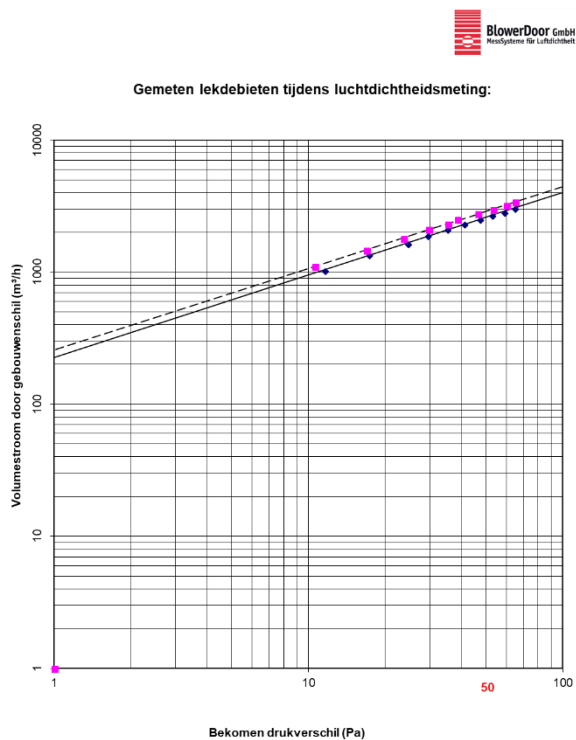
Bijlage A: Grafieken Blowerdoormetingen

Bijlage B: Foutenanalyse per Pulsemeting

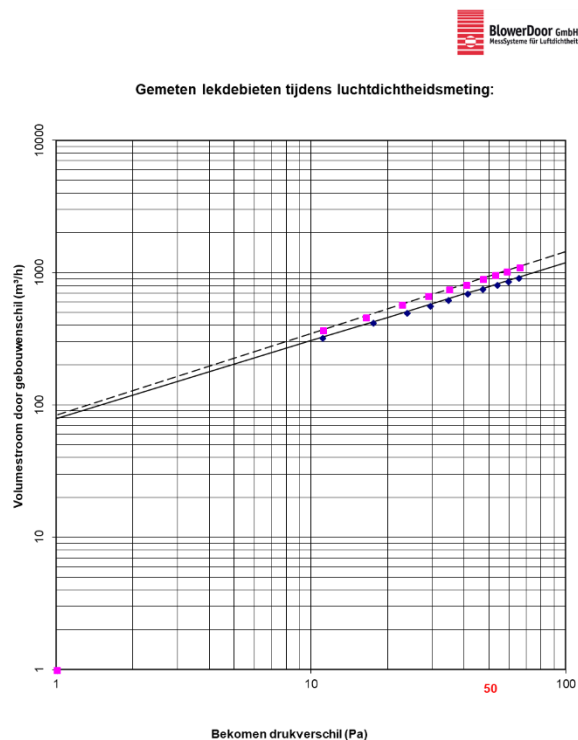
Bijlage A: Grafieken Blowerdoormetingen

◆ Onderdruk (m³/h) ■ Overdruk (m³/h) — Regressielijn onderdruk - - - Regressielijn overdruk

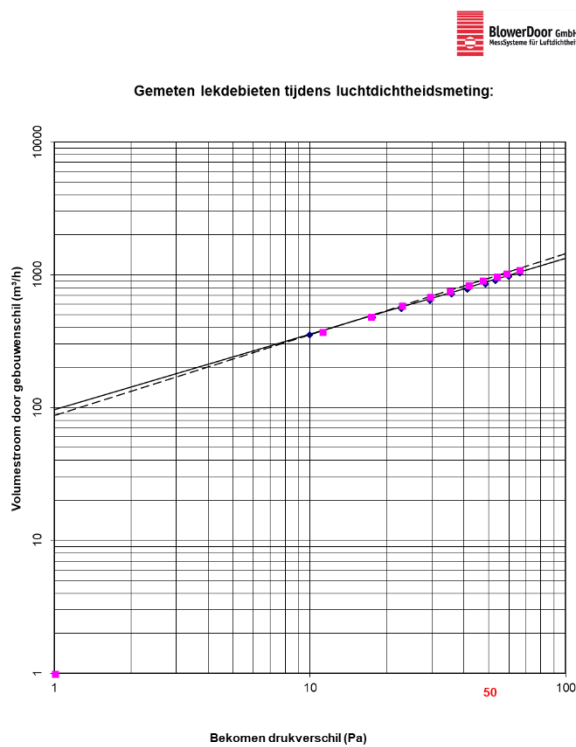
W1 – test 1 – volume 2 (1)



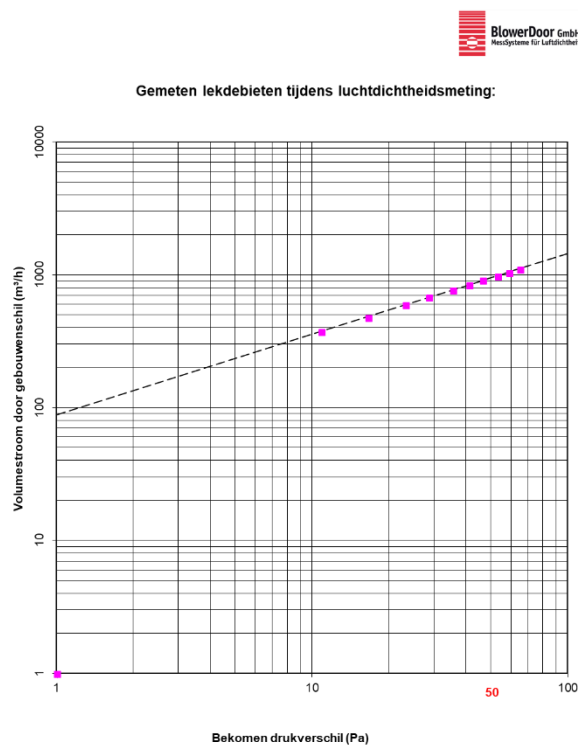
W1 – test 2 – volume 1 (1)



W1 – test 3 – volume 1 (2)

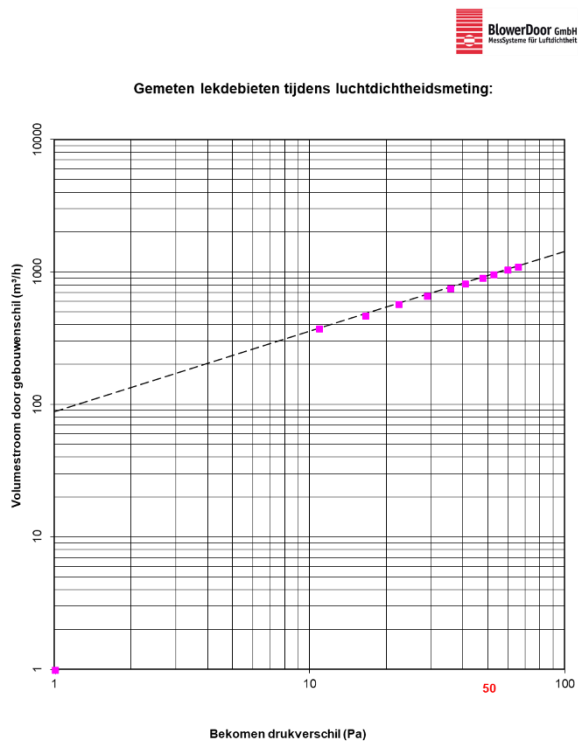


W1 – test 4 – volume 1 (3)

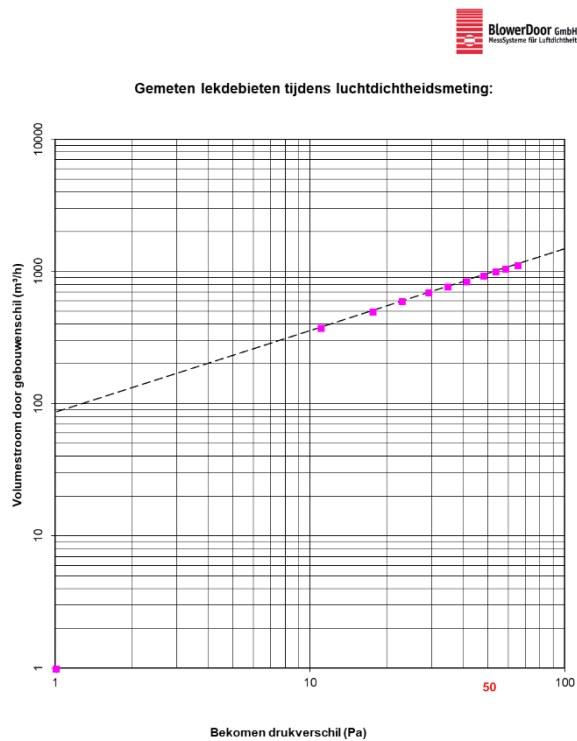


◆ Onderdruk (m³/h) ■ Overdruk (m³/h) — Regressielijn onderdruk - - - Regressielijn overdruk

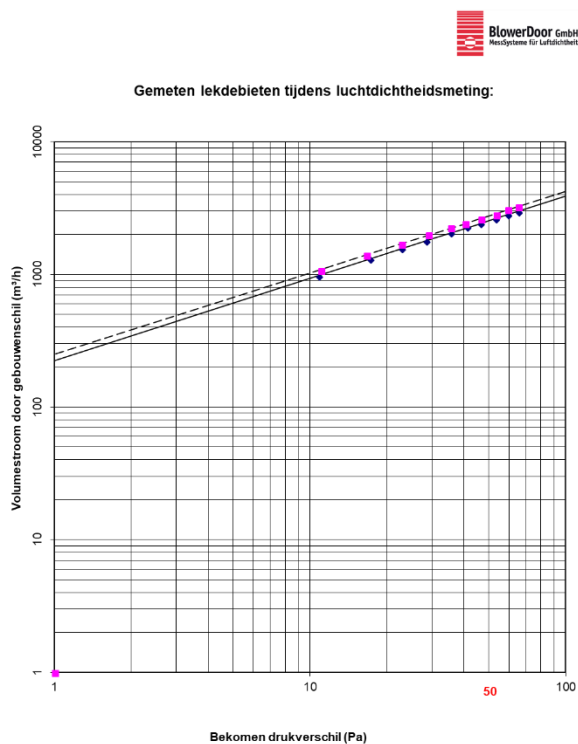
W1 – test 5 – volume 1 (4)



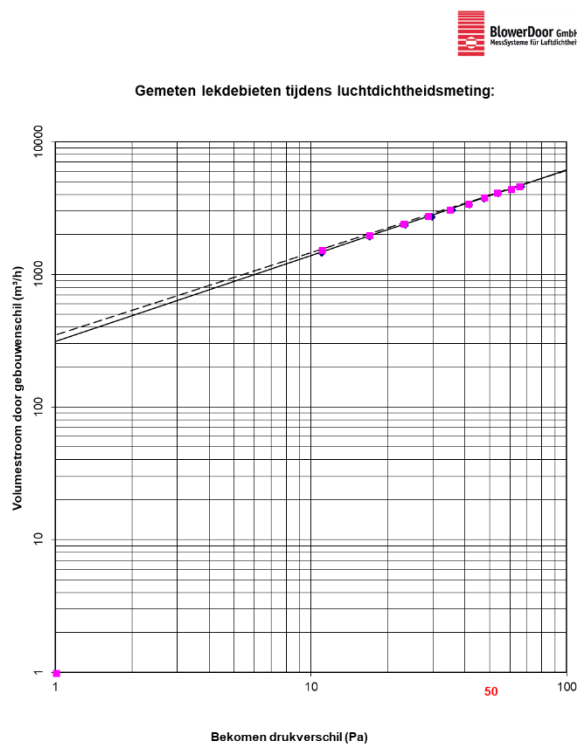
W1 – test 6 – volume 1 (5)



W1 – test 7 – volume 2 (2)

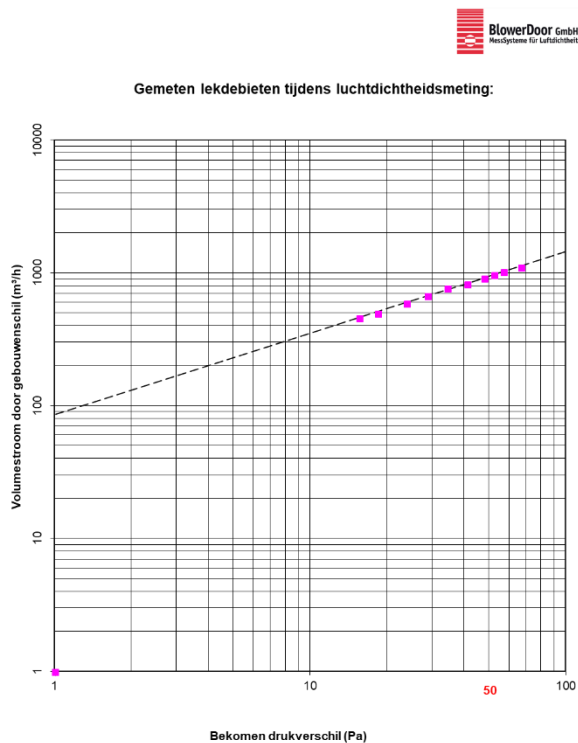


W1 – test 8 – volledige woning

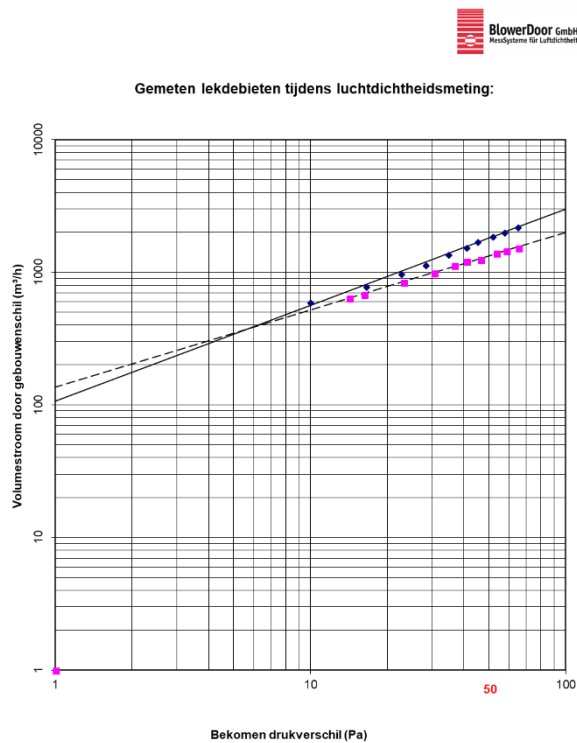


◆ Onderdruk (m³/h) ■ Overdruk (m³/h) — Regressielijn onderdruk - - - Regressielijn overdruk

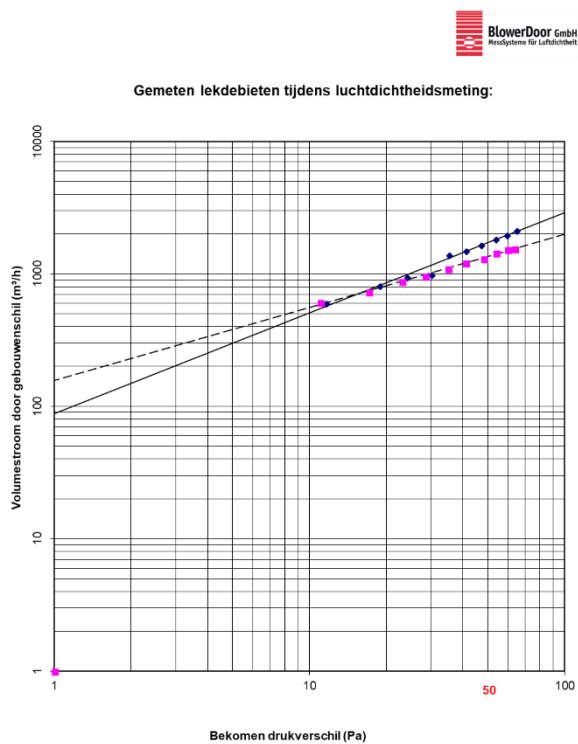
W1 – test 9 – volume 1 (6)



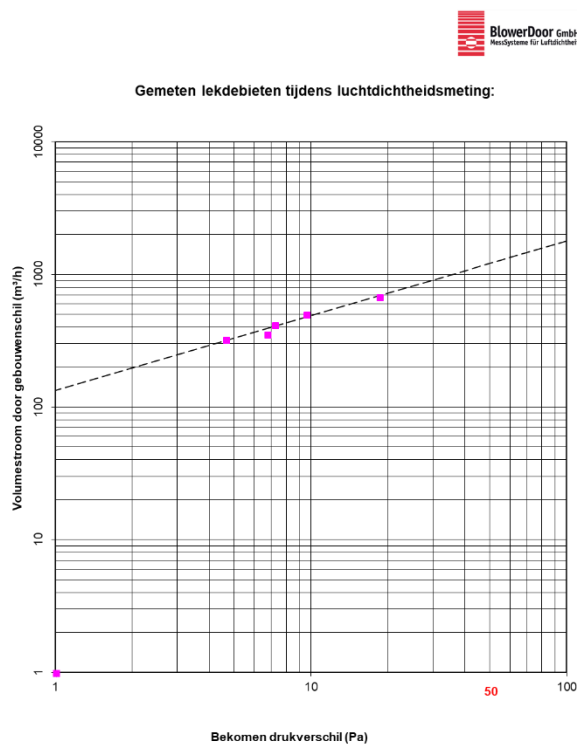
W1 – test 10 – volume 3 (1)



W1 – test 11 – volume 3 (2)

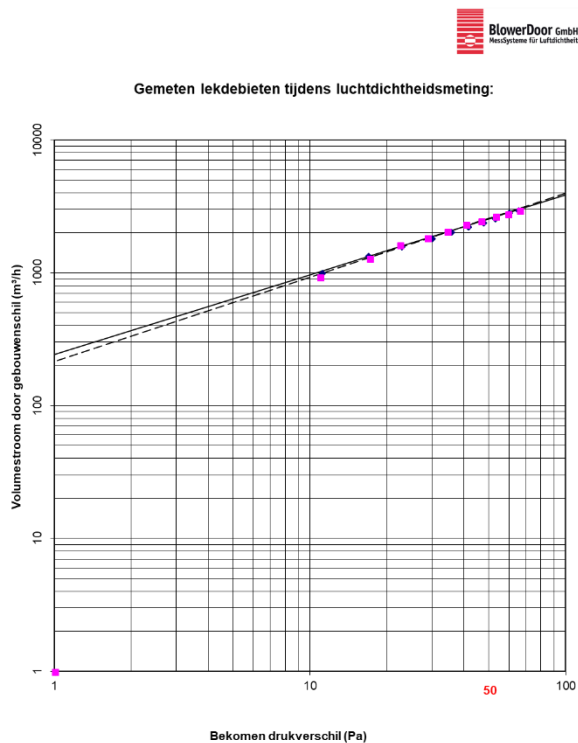


W1 – test 12 – volume 3 (3)

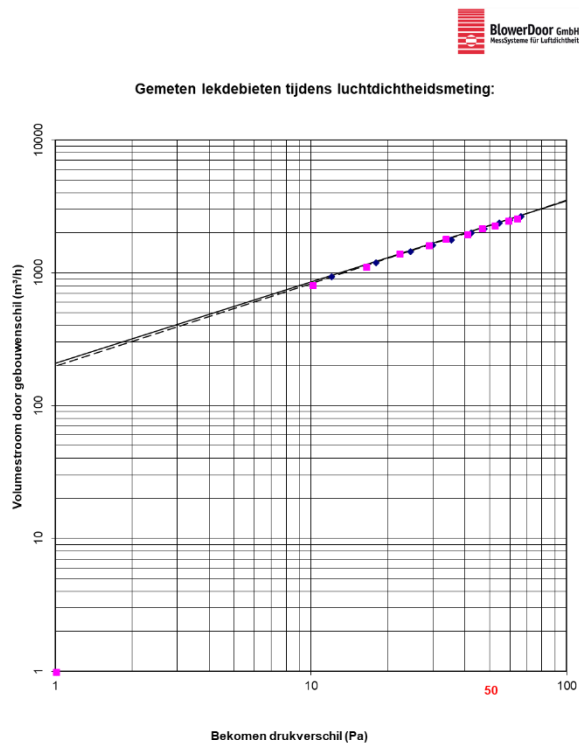


◆ Onderdruk (m³/h) ■ Overdruk (m³/h) — Regressielijn onderdruk - - - Regressielijn overdruk

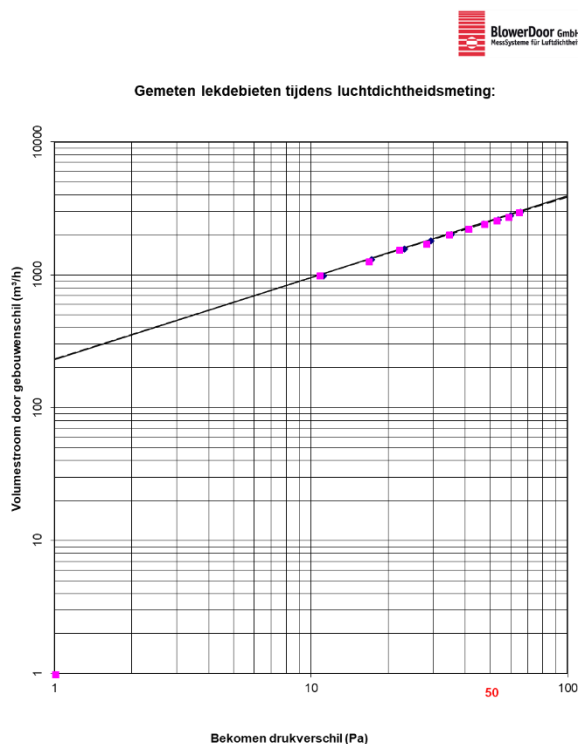
W2 – test 1 – volume 5 (1)



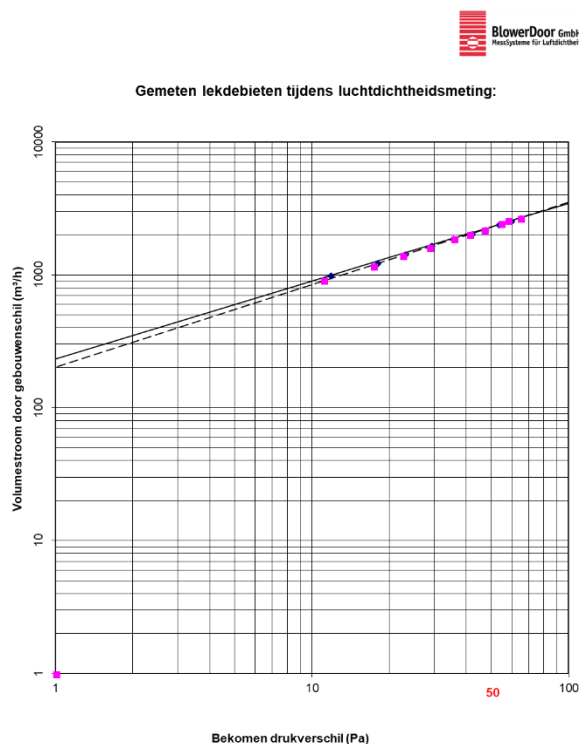
W2 – test 2 – volume 6 (1)



W2 – test 3 – volume 5 (2)



W2 – test 4 – volume 6 (2)

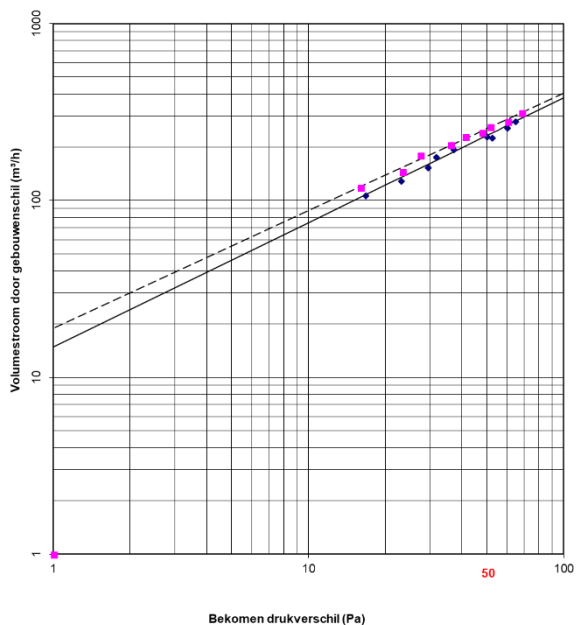


◆ Onderdruk (m³/h) ■ Overdruk (m³/h) — Regressielijn onderdruk - - - Regressielijn overdruk

W3 – test 1



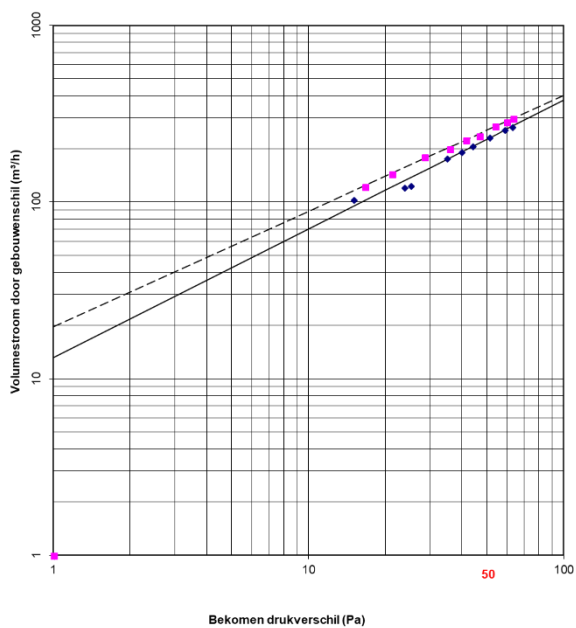
Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



W3 – test 3



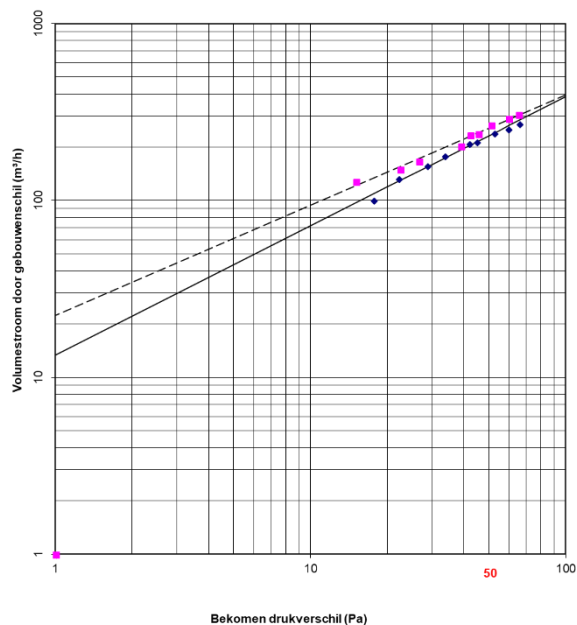
Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



W3 – test 2



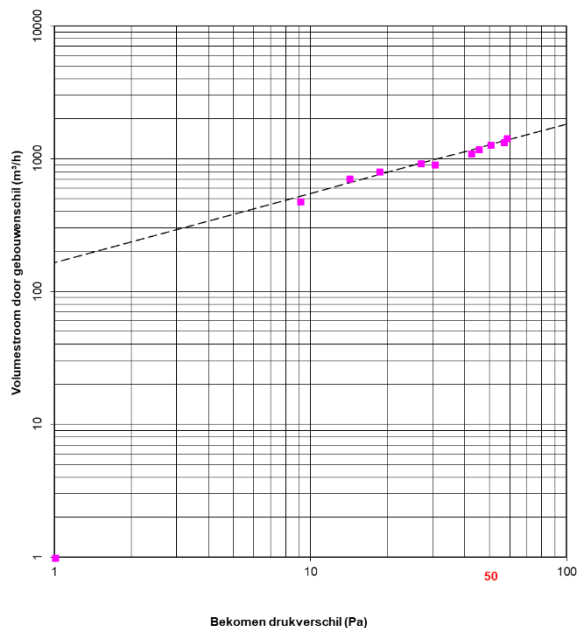
Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



W4 – test 1



Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:

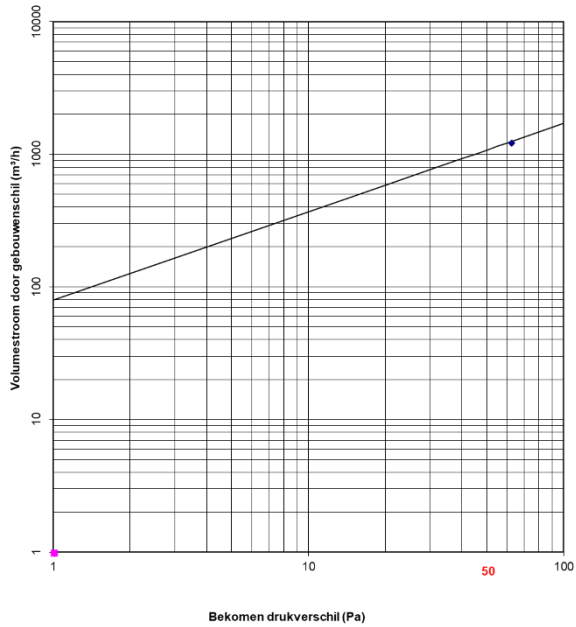


◆ Onderdruk (m³/h)
 ■ Overdruk (m³/h)
 — Regressielijn onderdruk
 - - - Regressielijn overdruk

W4 – test 2



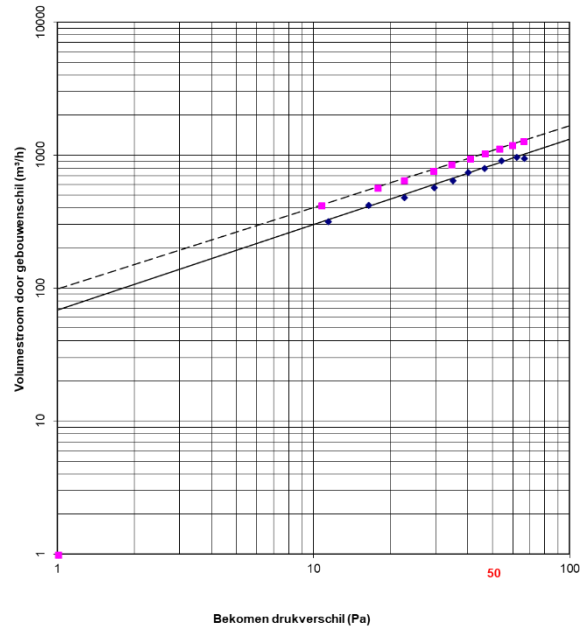
Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



W5 – test 1



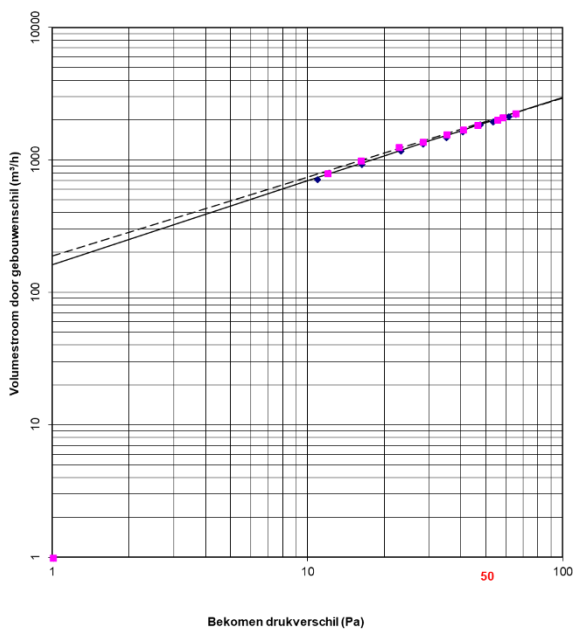
Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



W8 – test 1



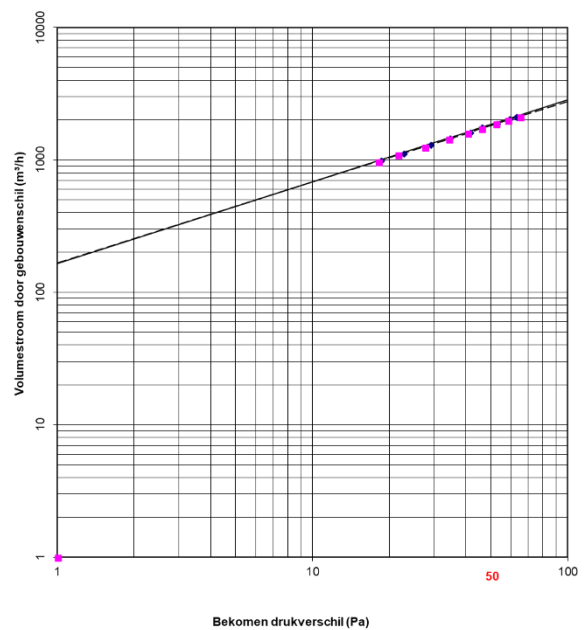
Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



W8 – test 2



Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:

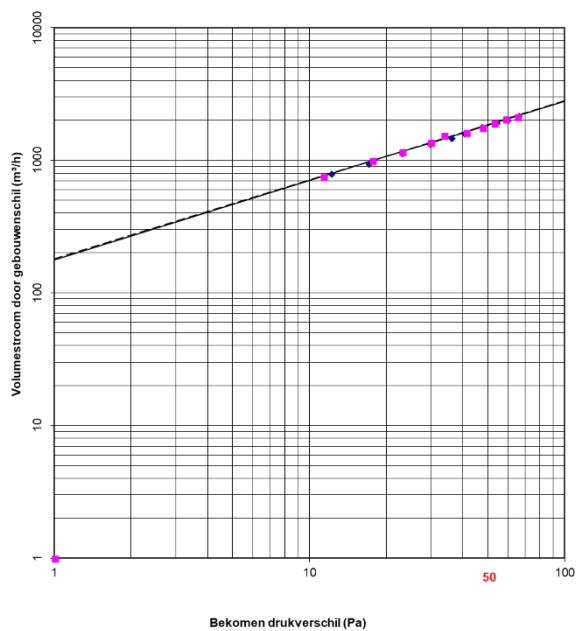


◆ Onderdruk (m³/h)
 ■ Overdruk (m³/h)
 — Regressielijn onderdruk
 - - - Regressielijn overdruk

W3 – test 3



Gemeten lekdebieten tijdens luchtdichtheidsmeting:



Bijlage B: Foutenanalyse per Pulsemeting

W1

	# Puls.	PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
		Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	2	bad	#	#	high	good	#	#	optimal					#	#	#	#		
2	2	good	#	#	high	good	#	#	optimal					#	#	#	#		
3	2	good	#	#	high	good	#	#	optimal					#	#	#	#		
4	2	good	#	#	high	good	#	#	optimal					#	#	#	#		
5	2	good	#	#	high	bad	#	#	high					#	#	#	#		
6	2	good	0,9187	0,5331	high	good	0,9958	0,6530	optimal					0,0767	276,12	0,0657	236,52		
7	3	good	0,9301	0,3339	high	good	#	#	high	good	#	#	optimal	0,0984	354,24	#	#	#	#
8	3	good	0,9983	0,5265	high	good	0,9937	0,8070	high	good	0,9935	0,8596	optimal	0,0714	257,04	0,0487	175,32	0,0462	166,32
9	3	good	0,9915	0,7482	high	good	0,9940	0,7581	high	good	0,9994	0,7684	optimal	0,0446	160,56	0,0439	158,04	0,0433	155,88
10	3	bad	0,8605	0,4970	low	bad	0,9228	0,6342	low	good	0,0008	0,0389	low	0,2243	807,48	0,2409	867,24	0,0559	201,24
11	2	bad	#	#	low	bad	#	#	low					#	#	#	#		
12	2	bad	0,9786	-0,4456	low	good	0,0111	0,2752	low					0,0346	124,56	0,0585	210,60		
13	2	good	0,9589	-0,2201	optimal	bad	0,6311	0,2897	optimal					0,0399	143,64	0,0486	174,96		
14	2	good	0,6260	0,1975	optimal	bad	0,9383	0,2582	optimal					0,0402	144,72	0,0383	137,88		
15	2	good	0,0182	0,0120	optimal	good	0,9421	0,3244	optimal					0,0427	153,72	0,0361	129,96		
16	2	good	0,6331	1,0833	high	good	0,9639	0,4903	optimal					0,0288	103,68	0,0360	129,60		
17	3	good	0,8863	0,4077	high	good	0,9941	0,6562	optimal	good	0,9472	0,9144	optimal	0,0311	111,96	0,0267	96,12	0,0252	90,72
18	2	bad	0,9160	3,3549	high	good	0,0298	-0,0913	optimal					0,0027	9,72	0,0351	126,36		
19	2	good	0,9986	0,6255	high	good	0,9979	0,5973	optimal					0,0311	111,96	0,0317	114,12		
20	2	good	0,9842	0,6503	high	good	0,9917	0,6313	optimal					0,0327	117,72	0,0328	118,08		
21	2	good	0,1176	-0,4479	high	good	0,9901	0,7632	optimal					0,0546	196,56	0,0332	119,52		
22	2	good	0,9938	0,6460	high	good	0,9983	0,6823	optimal					0,0578	208,08	0,0555	199,80		
23	2	good	0,9998	0,5393	high	good	0,9950	0,6405	optimal					0,0707	254,52	0,0641	230,76		
24	2	good	0,9943	0,6010	high	good	0,8894	0,1838	optimal					0,0289	104,04	0,0487	175,32		
25	2	good	0,9959	0,6596	high	good	0,9892	0,7127	optimal					0,0300	108,00	0,0284	102,24		
26	2	good	0,8854	0,6475	optimal	good	0,9927	0,7098	optimal					0,0846	304,56	0,0852	306,72		
27	1	bad	#	#	low									#	#				
28	2	good	0,9687	0,2705	optimal	good	0,9756	0,6989	optimal					0,1541	554,76	0,1615	581,40		
29	2	good	0,8722	0,2841	optimal	good	0,9859	0,7678	optimal					0,1456	524,16	0,1451	522,36		
30	2	good	0,9474	0,5143	optimal	good	0,9938	0,8203	optimal					0,1507	542,52	0,1527	549,72		
31	2	good	0,3865	1,2851	high	good	0,9769	0,9321	optimal					0,0302	108,72	0,0362	130,32		
32	2	good	0,9967	0,5432	low	good	0,0678	1,2260	low					0,0443	159,48	0,0341	122,76		
33	2	good	0,9830	0,6660	optimal	good	0,9926	0,8377	optimal					0,0384	138,24	0,0388	139,68		
34	2	good	0,9433	0,4967	optimal	good	0,7679	1,6349	optimal					0,0457	164,52	0,0511	183,96		
35	2	good	0,8803	0,6535	optimal	good	0,9940	0,8130	optimal					0,0493	177,48	0,0489	176,04		
36	2	good	0,9883	0,5943	high	good	0,9920	0,8993	optimal					0,0455	163,80	0,0415	149,40		
37	2	good	0,9977	0,5303	optimal	good	0,9683	1,2624	optimal					0,0443	159,48	0,0427	153,72		
38	2	good	0,9898	0,4211	optimal	good	0,9740	0,9000	optimal					0,0438	157,68	0,0366	131,76		
39	2	good	0,9405	0,6744	optimal	good	0,9702	1,3356	optimal					0,0459	165,24	0,0405	145,80		
40	2	bad	#	#	low	good	#	#	low					#	#	#	#		

Legende: # Puls. = aantal metingen per Pulse; Acc. p. = aanvaardbare grafiek; R-sq. = determinatiecoëfficiënt R^2 ; n-val. = n-waarde; pr. r. = drukbereik

W2

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	2	good	0,9990	0,5684	high	good	0,9997	0,6497	optimal					0,0228	82,08	0,0204	73,44		
2	2	good	0,9963	0,6280	high	good	0,9845	1,1387	high					0,0213	76,68	0,0125	45,00		
3	2	good	0,9977	0,6892	high	good	0,9993	0,7875	optimal					0,0203	73,08	0,0187	67,32		
4	2	good	0,9777	0,7985	high	good	0,9989	0,7077	optimal					0,0189	68,04	0,0211	75,96		
5	2	good	0,9176	0,6272	optimal	good	0,9908	1,0143	optimal					0,1308	470,88	0,1300	468,00		
6	2	good	#	#	high	good	#	#	optimal					#	#	#	#		
7	2	bad	0,9721	0,4930	high	good	0,9855	0,7014	optimal					0,1061	381,96	0,0968	348,48		
8	2	good	0,9951	0,6334	optimal	good	0,9922	0,9894	optimal					0,0813	292,68	0,0842	303,12		
9	2	good	0,8818	0,4983	optimal	good	0,9783	1,0967	optimal					0,0787	283,32	0,0822	295,92		
10	2	good	0,9288	0,7944	optimal	good	0,9974	0,9608	optimal					0,0661	237,96	0,0642	231,12		
11	2	good	0,7244	0,3551	optimal	good	0,9812	0,9190	optimal					0,0781	281,16	0,0805	289,80		

W3

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	2	good	0,9975	0,1402	optimal	good	0,5983	-0,8274	optimal					0,0969	348,84	0,1403	505,08		
2	2	good	0,3622	-9,7898	high	good	0,8540	0,6788	high					575707,4194	#	0,0119	42,84		
3	2	good	0,4460	-8,9703	high	good	0,8445	0,9929	high					12102,5159	#	0,0066	23,76		
4	2	good	0,3425	-7,2415	high	good	#	#	high					92,0458	331364	#	#		
5	3	good	0,4187	-6,8639	high	good	0,8613	1,0176	high	good	#	#	optimal	57,2737	32	0,0066	23,76	#	#
6	3	good	0,3485	-2,9417	high	good	#	#	optimal	good	#	#	optimal	1,1754	4231,44	#	#	#	#
7	3	good	0,4895	-5,3830	high	good	#	#	optimal	good	#	#	optimal	1,2025	4329,00	#	#	#	#
8	3	bad	#	#	low	bad	#	#	low	bad	#	#	low	#	#	#	#	#	#
9	3	good	0,8581	11,3331	high	good	0,8252	1,0387	high	good	#	#	optimal	0,0000	0,00	0,0059	21,24	#	#
10	3	good	0,7821	13,0084	high	good	0,8147	0,8681	high	good	#	#	optimal	0,0000	0,00	0,0075	27,00	#	#
11	3	good	0,5189	-10,2645	high	good	#	#	high	good	#	#	optimal	13684,0	#	#	#	#	#
12	1	good	0,5312	-9,5094	high									1567,70	5643729				
13	1	good	0,5772	-9,6721	high									1259,16	4532978				
14	1	good	0,3771	-5,1346	high									1,1915	4289,40				
15	1	good	0,5717	-4,8551	high									0,5179	1864,44				
16	1	good	0,2555	5,4027	high									0,0001	0,36				
17	1	good	0,4259	-4,5741	high									6,6893	24081,5				

Legende: # Puls. = aantal metingen per Pulse; Acc. p. = aanvaardbare grafiek; R-sq. = determinatiecoëfficiënt R²; n-val. = n-waarde; pr. r. = drukbereik

W4

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	2	good	0,0267	-0,2969	high	good	0,8839	0,5680	high					0,1151	414,36	0,0385	138,60		
2	2	good	0,7558	1,8610	high	good	0,9536	1,0624	high					0,0128	46,08	0,0302	108,72		
3	2	good	0,0037	0,6481	high	good	0,1555	0,6914	high					0,0296	106,56	0,0282	101,52		
4	2	good	0,0063	-0,1163	high	good	0,9318	2,0637	high					0,0913	328,68	0,0107	38,52		
5	2	good	0,7293	-1,5072	high	good	0,9881	0,7581	high					0,5542	1995,12	0,0289	104,04		
6	2	good	0,0793	1,7866	high	good	0,9216	0,9519	high					0,0090	32,40	0,0231	83,16		
7	2	good	0,0348	-0,9488	high	good	0,8655	1,1622	high					0,1692	609,12	0,0227	81,72		
8	2	good	0,6086	-4,4969	high	good	0,7903	0,4870	optimal					8,8605	31897,8	0,0404	145,44		
9	2	good	0,1326	-0,4941	high	good	0,9850	0,6873	optimal					0,1217	438,12	0,0394	141,84		
10	2	good	0,6421	1,2993	high	good	0,9820	0,7455	optimal					0,0188	67,68	0,0337	121,32		

W5

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	2	good	0,0863	-3,3288	high	good	0,8300	1,0171	high					6,4624	23264,6	0,0153	55,08		
2	2	good	0,1419	-4,7073	high	good	0,7546	0,6475	optimal					1,6664	5999,04	0,0224	80,64		
3	2	good	0,1215	-2,0691	high	good	0,9260	0,8774	optimal					0,1989	716,04	0,0193	69,48		
4	2	good	0,7582	0,7885	high	good	0,9890	0,6433	optimal					0,0420	151,20	0,0430	154,80		

W6

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	3	good	#	#	low	good	#	#	low	bad	#	#	low	#	#	#	#	#	#
2	3	good	#	#	low	good	#	#	low	bad	#	#	low	#	#	#	#	#	#
3	1	good	#	#	low									#	#		0,00		
4	1	good	#	#	low									#	#		0,00		

Legende: # Puls. = aantal metingen per Pulse; Acc. p. = aanvaardbare grafiek; R-sq. = determinatiecoëfficiënt R^2 ; n-val. = n-waarde; pr. r. = drukbereik

W7

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	3	good	#	#	high	good	#	#	high	good	#	#	optimal	#	#	#	#	#	#
2	3	good	0,0696	-0,8676	high	good	0,9492	0,6348	high	good	#	#	optimal	0,2865	1031,40	0,0313	112,68	#	#
3	2	good	0,0942	-2,0695	high	good	0,8084	0,5749	optimal					0,9801	3528,36	0,0313	112,68		
4	2	good	0,1229	-7,7573	high	good	0,6460	0,5813	high					48791,9	#	0,0254	91,44		
5	2	good	0,0396	4,6369	high	good	0,4142	0,6094	high					0,0000	0,00	0,0203	73,08		

W8

		PULSE 1				PULSE 2				PULSE 3				PULSE 1		PULSE 2		PULSE 3	
	# Puls.	Acc p. 1	R-sq. 1	n-val. 1	pr. r. 1	Acc p. 2	R-sq. 2	n-val. 2	pr. r. 2	Acc p. 3	R-sq. 3	n-val. 3	pr. r. 3	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]	V4 [m³/s]	V4 [m³/h]
1	2	bad	0,6770	0,6890	optimal	bad	0,9524	0,8963	optimal					0,0785	282,60	0,0743	267,48		
2	2	bad	0,3349	0,3411	optimal	bad	0,9527	0,8254	optimal					0,0760	273,60	0,0682	245,52		
3	2	bad	0,5092	0,4771	optimal	bad	0,9333	1,0261	optimal					0,0761	273,96	0,0662	238,32		
4	2	good	0,5325	0,7363	high	good	0,9822	0,9369	optimal					0,0602	216,72	0,0556	200,16		
5	2	good	0,3463	0,7615	high	good	0,9381	0,8379	optimal					0,0561	201,96	0,0539	194,04		
6	2	good	0,4800	0,6005	high	good	0,9799	0,8198	optimal					0,0617	222,12	0,0555	199,80		
7	2	good	0,1471	0,7610	high	good	0,8243	0,8058	optimal					0,0514	185,04	0,0505	181,80		
8	2	good	0,3307	0,4075	high	good	0,9639	0,8540	optimal					0,0705	253,80	0,0558	200,88		
9	2	good	0,1556	1,0380	high	good	0,7844	0,8935	optimal					0,0418	150,48	0,0452	162,72		
10	2	good	0,4253	1,3506	high	good	0,9115	0,6126	optimal					0,0350	126,00	0,0529	190,44		

Legende: # Puls. = aantal metingen per Pulse; Acc. p. = aanvaardbare grafiek; R-sq. = determinatiecoëfficiënt R^2 ; n-val. = n-waarde; pr. r. = drukbereik

