

Luchtdichtheid van historisch buitenschrijnwerk: evaluatie van de efficiëntie en optimalisatie van restauratietechnieken

Douwe Neven

Studentennummer: 02313727

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleider: ir.-arch. Wolf Bracke

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2025-2026

Luchtdichtheid van historisch buitenschrijnwerk: evaluatie van de efficiëntie en optimalisatie van restauratietechnieken

Douwe Neven

Studentennummer: 02313727

Promotor: prof. dr. ir.-arch. Nathan Van Den Bossche

Begeleider: ir.-arch. Wolf Bracke

Masterproef voorgelegd voor het behalen van de graad Master of Science in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Academiejaar 2025-2026

Voorwoord

Na het afronden van de Master in de Architectuur (KU Leuven, 2023) bleef vooral twijfel hangen. Niet over de discipline, maar over mijn eigen positie daarin. De architecturale synthese had overtuigingskracht, maar liet te veel technische vragen open. Een tweede master in de Industriële Wetenschappen: Bouwkunde bood op die vragen een antwoord. Deze masterproef vormt het eindpunt van die queeste.

Het onderwerp van dit werk, de luchtdichtheid van historisch schrijnwerk, bevindt zich op een ongemakkelijke grens: tussen erfgoed en performantie, tussen norm en praktijk, tussen wat behouden moet blijven en wat technisch faalt. Net die ongemakkelijke positie maakte het onderzoek relevant. Niet omdat er sluitende antwoorden te vinden zijn, maar omdat het probleem zich niet laat reduceren tot één discipline of één beoordelingskader.

Prof. Dr. Ir-Arch. Nathan Van Den Bossche en Ir-Arch. Wolf Bracke dank ik voor hun begeleiding, maar vooral voor de geboden vrijheid. Vrijheid om te dwalen, te experimenteren en uiteindelijk mijn eigen weg te vinden door het doolhof van normen en metingen.

Bouwfirma Denys – en bij naam Frank, Bram en Gilian – dank ik voor het ter beschikking stellen van niet alleen een casestudy, maar een levend laboratorium. Hun bereidheid om experimentele technieken toe te passen vormde het fundament van dit onderzoek. De onvermoeibaarheid van Kevin, schrijnwerker in het atelier, maakte het mogelijk om mijn hypotheses te toetsen aan hout, toleranties en gereedschap.

Naast mijn familie en vrienden dank ik specifiek Laura Janssen voor het fungeren als tolk en assistent van de ingenieur-in-wording op de werf, waar Nederlandstaligen vaak tot een minderheidsgroep behoorden. Dr. Emmanuelle Schoonjans waardeer ik voor de geleverde kritische reflecties. Jullie bijdrage was uitermate significant.

Andreas. Jij zag mij worstelen met de laatste loodjes van een inmiddels zeven jaar durende academische marathon. Waar anderen wegkeken, bracht jij koffie. Zo werd je assistent, therapeut, klankbord en motivator. Deze thesis is net zozeer van jou als van mij.

Douwe Neven

Gent, januari 2026

Toelichting in verband met het masterproefwerk en de mondelinge uiteenzetting

Deze masterproef vormt een onderdeel van een examen. Eventuele opmerkingen die door de beoordelingscommissie tijdens de mondelinge uiteenzetting van de masterproef werden geformuleerd, werden niet verwerkt in deze tekst.

Verklaring inzake het gebruik van generatieve AI

In het kader van deze masterproef werd op een ondersteunende en verantwoordelijke wijze gebruikgemaakt van generatieve artificiële intelligentie (AI). Zowel *Gemini*, *Claude* als *Chat GPT* werden ingezet als hulpmiddel, niet als vervanging van eigen onderzoek, analyse of besluitvorming. De inhoudelijke keuzes, onderzoeksopzet, dataverzameling, data-analyse, interpretatie van resultaten en conclusies zijn volledig het resultaat van eigen werk.

Concreet werd generatieve AI gebruikt voor de volgende doeleinden:

- *Schrijfondersteuning en redactie*: herformuleren, structureren en aanscherpen van bestaande teksten, met bijzondere aandacht voor academische helderheid, consistentie en leesbaarheid;
- *Taalcorrectie*: controle en verbetering van grammatica, spelling en stijl in het Nederlands;
- *Structurerende hulp*: het ordenen van methodologische en resultaatgerichte passages en chaotische hersenspinsels, zonder toevoeging van nieuwe inhoud;
- *Conceptuele aftoetsing*: het expliciteren en verhelderen van reeds gemaakte analytische redeneringen (bv. betekenis van parameters, grafiekinterpretaties), zonder dat AI autonoom conclusies genereerde;
- *Controleren van geautomatiseerde excel-berekeningen*, die reeds functioneel waren voor het opladen ervan;
- *Ondersteuning bij tabellen en terminologie*: controleren van consistent gebruik van symbolen, parameters en notaties.

Generatieve AI werd niet gebruikt voor:

- het *genereren* van onderzoeksdata of meetresultaten;
- het *autonoom schrijven* zonder inhoudelijke input;
- het *bepalen* van conclusies of maatschappelijke reflecties;
- het *verzinnen of vervangen* van wetenschappelijke bronnen.

Alle door AI gegenereerde suggesties werden kritisch geëvalueerd, aangepast of verworpen waar nodig.

Abstract

Deze masterproef onderzoekt de luchtdichtheidsprestaties van historisch houten buitenschrijnwerk door middel van een experimentele evaluatie van verschillende restauratiestrategieën. Het onderzoek situeert zich binnen het spanningsveld tussen erfgoedbehoud en eigentijdse energieprestatie-eisen.

De casestudie betreft 19e-eeuwse ramen uit het Materniteitsgebouw op de Bijlokesite te Gent, waarop door aannemersbedrijf Denys diverse restauratietechnieken werden toegepast in het kader van het HeriTACE-project (Universiteit Gent, EU-gefinancierd). Door systematische luchtdichtheidsmetingen volgens EN 1026, EN 12207 en EN 12114 werden vier hoofdconfiguraties vergeleken: originele staat, minimale restauratie met enkelvoudige dichting, experimentele restauratie met meervoudige dichtingen, en een reproductiemodel.

De resultaten tonen dat substantiële verbetering mogelijk is: een halvering van de luchtdoorlatendheid werd gerealiseerd (van $q_{50} \approx 12 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ naar $\approx 6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$), resulterend in een overgang van klasse 1 naar klasse 2 voor de minimale restauratie. Deze prestatie bleek echter sterk afhankelijk van drie kritische voorwaarden: een gesloten afdichtingscontour, geometrisch correct sluitend raam, en geverifieerd uniform contact tussen dichting en tegenvlak. Materiaalkeuze bleek secundair. Technieken die gebruik maken van (meervoudige) houten *opdeklatten* met geïntegreerde dichtingen bleken een meer succesvolle toepassing die de klasse kan verhogen tot klasse 3.

Het onderzoek identificeert de enkelvoudige dichting als een 'gevoelig optimum': technisch valide maar praktisch kwetsbaar, aangezien kleine uitvoeringsafwijkingen disproportioneel negatieve effecten hebben. Dit verklaart waarom *achterzetramen* in de praktijk een robuust alternatief vormen. De masterproef benadrukt dat luchtdichtheidsverbetering van historisch schrijnwerk primair een ontwerp- en procesvraagstuk is, eerder dan een materiaaltechnische interventie.

Airtightness Performance of Historic Wooden Windows: An Experimental Assessment of Restoration Strategies

Douwe Neven

Supervisor: Prof. Dr. Ir.-Arch. Nathan Van Den Bossche

Abstract

This research evaluates airtightness performance of historic wooden windows through experimental assessment of various restoration strategies. Case study windows from a 19th-century building in Ghent demonstrate that substantial improvement (50% reduction in air permeability) is achievable but highly sensitive to geometric precision and execution quality. Single gasket solutions can reach Class 2 performance (EN 12207) under optimal conditions, while secondary glazing provides robust pragmatic alternatives. The findings emphasize that airtightness improvement is fundamentally a design and process challenge rather than merely a material intervention.

Keywords

Historic windows, airtightness, heritage restoration, sealing gaskets, energy performance

I. INTRODUCTION

SINCE 2006, Flemish building regulations (EPB) have mandated strict energy performance standards for new and renovated buildings, emphasizing thermal insulation, controlled ventilation, and airtightness. As transmission losses decreased through improved insulation, the relative importance of air leakage through the building envelope increased significantly. Windows, particularly historic wooden windows, represent a critical component where air infiltration can substantially compromise overall building performance.

Heritage buildings, however, exist in a regulatory grey zone. Protected and inventoried buildings in Flanders are granted partial or complete exemptions from EPB requirements, with energy improvements mandated only *to the extent possible*, while heritage value always takes precedence. This creates a fundamental tension: historic windows must balance heritage conservation with contemporary performance expectations, yet no established reference framework exists for achievable airtightness levels or appropriate restoration techniques.

This research addresses this gap within the context of the HeriTACE project (Ghent University, EU-funded), which develops methodologies for energy improvement of historic buildings while respecting heritage values. The study evaluates airtightness performance of various restoration strategies applied by construction company Denys to 19th-century windows from the Maternity building at the Bijloke site in Ghent.

II. BACKGROUND

A. Regulatory Context

The EPB regulations in Flanders require compliance with energy efficiency standards expressed through the E-level indicator. Air infiltration directly affects this indicator, with airtightness improvements yielding measurable reductions in primary energy consumption. For heritage buildings, however, these requirements are relaxed based on protected status, creating a situation where restoration practitioners lack clear performance targets and validated intervention strategies.

B. Leak Paths in Historic Windows

Historic wooden windows typically exhibit three primary air leakage paths: (1) the functional joint between sash and frame, (2) the glazing joint between glass and wooden profiles, and (3) the building connection between frame and wall. These are exacerbated by wood deformation, hardware wear, paint deterioration, and moisture-induced dimensional instability.

C. Classification Framework

Airtightness performance is evaluated according to EN 12207, which classifies windows into classes 0-4 based on air permeability at 100 Pa (q_{100} , in $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$). Contemporary windows typically achieve Class 3-4, whereas untreated historic windows generally fall in Class 1 or remain unclassified.

III. METHODOLOGY

A. Case Study

The research focuses on double-casement windows from the 19th-century Maternity building at the Bijloke site in Ghent. These windows feature traditional mortise-and-tenon joinery, single glazing, and espagnolette locking mechanisms.

B. Test Setup

Measurements were conducted both in situ and in workshop conditions following EN 1026, EN 12114, and ISO 9972 principles. Tests employed calibrated pressure differential systems at 50-600 Pa under depression (DI) and overpressure (OP) conditions. Results were processed using power-law regression to determine q_{50} and q_{100} values and EN 12207 classifications.

C. Test Configurations

Four primary configurations were evaluated:

OG (Original): Baseline measurements of unmodified historic windows.

RE₁ (Minimal Restoration): Single routed gasket with iterative optimization (⁴RE_{1a-e} and ⁵RE₃) addressing geometric precision, sealing continuity, and contact quality.

RE₂ (Experimental): Multiple gasket configurations testing combinations and positioning strategies.

REP (Reproduction): New window replicating historic design with contemporary precision, serving as performance benchmark.

IV. RESULTS

A. Baseline Performance

Original windows achieved $q_{50} \approx 12\text{--}13 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (Class 1). Workshop testing after dismounting showed slightly worse performance ($q_{50} \approx 13\text{--}14 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$), suggesting long-term in-situ geometric adaptation that is disrupted by dismounting.

B. Secondary Glazing

Secondary glazing reduced q_{50} to $6\text{--}7 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (Class 2), representing 50% improvement without modifying the historic window.

C. Single Gasket Optimization

The iterative RE₁ sequence revealed improvement potential but high execution sensitivity:

RE_{1a-b}: $q_{50} \approx 12.6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ – minimal improvement, indicating simple gasket addition insufficient.

RE_{1c}: $q_{50} \approx 7.1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ – geometric correction (straightening) yielded 44% improvement.

RE_{1d}: $q_{50} \approx 5.9 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$, Class 2 – contact verification and correction achieved 50% improvement, matching reproduction performance.

RE_{1e}: $q_{50} \approx 6.0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ – alternative rubber profiles provided only marginal difference ($0.05 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$).

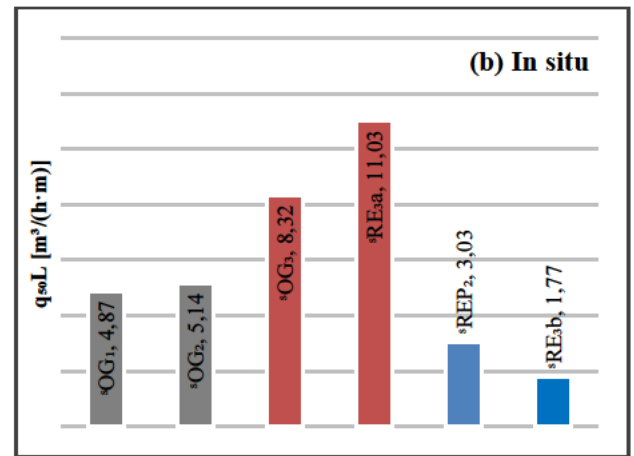
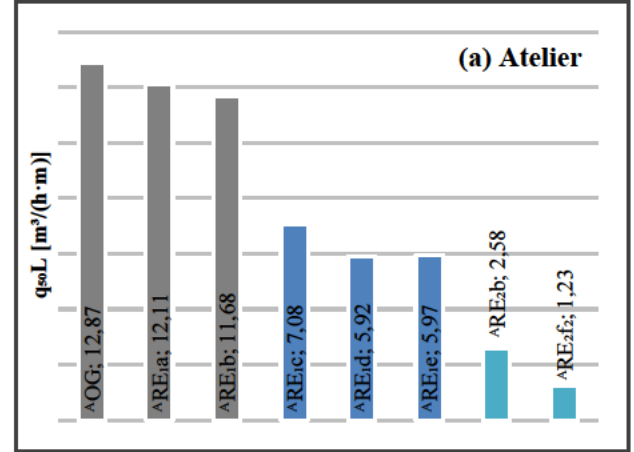


Figure a and b: Airtightness performance (q_{50L}) of historic window configurations. (b) In situ measurements under OP-loading. (a) Atelier measurements (average DI/OP). Bar colors indicate EN 12207 classification (Gray = Class 1, Blue = Class 2, Cyan = Class 3, Dark blue = Class 4, Red = Class 0). ⁴RE_{3a} lacks closed sealing contour.

Critical success factors: continuous sealing contour without interruptions; geometric precision of sash/frame; verified uniform contact (visual inspection insufficient); material selection secondary to geometric conditions.

D. Multiple Gaskets

⁴RE₂ configurations showed diminishing returns. The position and quality of the first effective seal proved most critical, with subsequent seals contributing progressively less. Double (*RE_{2b}*) and triple gaskets (*RE_{2f2}*) approached technical limits without substantially exceeding optimized single gasket performance.

E. Reproduction Window

The reproduction window achieved $q_{50} \approx 3.0 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ (Class 2), comparable to optimized historic window (ΔRE_{id})(relative improvement), demonstrating that the fundamental constraint is geometric precision, not historic character per se.

V. DISCUSSION

A. The Sensitive Optimum

The ΔRE_1 sequence demonstrates that single gaskets can achieve substantial improvement, but only under strict conditions: closed contour, proper closure, and verified uniform contact. This constitutes a *sensitive optimum* – technically valid but practically vulnerable. Small execution deviations yield disproportionate performance degradation, making standardization difficult. This explains why secondary windows prove pragmatically preferable.

B. Geometric Precision as Fundamental Constraint

The research establishes airtightness improvement as fundamentally a geometric challenge rather than material challenge. While gasket selection influences performance, its effect is marginal compared to geometric precision impact. Achieving such precision involves considerable economic trade-offs: complete disassembly, individual adjustment, sometimes steel reinforcement. For severely degraded windows, restoration effort may approach reproduction cost.

C. Secondary Glazing as Robust Alternative

A secondary window emerges as pragmatically effective. Achieving 71% improvement without primary window modification circumvents both geometric precision challenges and heritage restrictions. Installation is inherently less sensitive to existing geometric imperfections, creating a relatively independent second barrier. This aligns with widespread adoption in heritage restoration despite sacrificing primary window optimization potential.

D. Methodological Considerations

The research employs hybrid methodology combining EN 1026, EN 12207, EN 12114, and ISO 9972 principles adapted to heritage constraints. While facilitating meaningful comparisons, results are not formal compliance certifications. In-situ windows consistently outperformed identical workshop-tested windows, suggesting long-term geometric adaptation disrupted by dismounting. Since restoration typically requires dismounting, workshop measurements represent post-intervention reality. Generalizability is

limited by historic window variability, but underlying principles – geometric precision primacy, sealing continuity importance, single-gasket execution sensitivity – likely transfer across typologies.

VI. CONCLUSION

This research demonstrates airtightness improvement in historic windows as fundamentally a design and process challenge rather than material intervention. Substantial improvement is achievable through single gasket solutions, approaching contemporary performance levels. However, success demands continuous sealing contours, geometric precision, and *verified* uniform contact.

Practical implementation proves challenging due to high geometric precision sensitivity. Single-gasket optimization remains difficult to standardize across varied historic windows, with small execution deviations causing disproportionate degradation. This establishes a fundamental trade-off between optimization and robustness.

Secondary windows provide robust pragmatic alternatives, achieving comparable improvements without precision requirements or heritage invasiveness. Multiple gaskets show diminishing returns, with first seal position and quality determining majority performance improvement.

For restoration practice, findings suggest prioritizing strategies accommodating geometric variability over those demanding precision. Future development of gasket profiles with larger tolerance intervals, adaptive sealing concepts conforming to existing geometry, and standardized verification protocols would significantly improve direct historic window improvement feasibility.

Within the HeriTACE project framework, this research provides evidence-based guidance for balancing heritage conservation with contemporary performance expectations, emphasizing context-sensitive approaches over standardized solutions. Effective interventions must be calibrated to specific constraints inherent in historic building components.

ACKNOWLEDGMENTS

The author acknowledges the support of the HeriTACE project (Ghent University, EU-funded), construction company Denys for providing case study access and restoration execution, and Prof. Dr. Ir.-Arch. Nathan Van Den Bossche and Wolf Bracke for supervision and guidance throughout this research.

Inhoudsopgave

1. Inleiding	1
2. Erfgoedwaarde versus energieprestatie	3
2.1 Regelgevend kader in Vlaanderen (EPB)	3
2.1.1 Historische context en de Europese impuls	3
2.1.2 Indicatoren: E-peil en de rol van luchtdichtheid	3
2.1.3 De impact van buitenschrijnwerk op de luchtdichtheid	3
2.2 Erfgoedstatuten en juridische consequenties	4
2.2.1 Beschermd Monument: De strikte instandhoudingsplicht	4
2.2.2 Vastgestelde Inventaris Bouwkundig Erfgoed: Zorgplicht	4
2.2.3 De afweging in de praktijk: behoud vs. comfort	5
2.3 De paradox van ventilatie en infiltratie	5
2.3.1 Infiltratie versus gecontroleerde ventilatie	5
2.3.2 Het verstoorde vochtevenwicht	6
2.3.3 Verschuiving van het condensatiepunt	6
3. Historisch schrijnwerk	7
3.1 Typologie en constructieprincipes	7
3.1.1 Houttechnologie en verbindingen	7
3.1.2 Profileren en beglazing	7
3.2 Kritieke lekkagepaden	7
3.2.1 De functionele voeg (vleugel-kader)	7
3.2.2 De beglazingsvoeg	8
3.2.3 De bouwaansluiting (kader-muur)	8
3.2.4 Degradatie en invloed op prestaties	8
3.2.5 Vervorming en kromtrekken	8
3.2.6 Slijtage van hang- en sluitwerk	8
4. Restauratie- en verbeteringstechnieken	9
4.1 De basis: onderhoud en herstel	9
4.1.1 Houttechnisch herstel	9
4.1.2 Schilderwerk en stoppasta	9
4.2 Kierdichting	9
4.2.1 Ingefreesde profielen	9
4.2.2 De houten aanslaglat met geïntegreerde dichting (opdeklat)	10
4.2.3 Beperkingen bij kromgetrokken ramen	11
4.3 Beglazingsinterventies (thermische verbetering)	11
4.3.1 Vervanging door dubbele of hoogrendementsbeglazing	11
4.3.2 Ultradun dubbel glas en vacuümglas	11
4.4 Secundaire beglazing (achterzetramen)	11
4.4.1 Principe en werking	11
4.4.2 Impact op luchtdichtheid	11
4.5 Vervanging (reproductie)	12
4.5.1 Eisen aan reproductie	12
5. Meetmethodiek en normering	13
5.1 Algemene fysische principes van luchtdoorstroming	13
5.2 EN 1026 – Beproevingsmethode voor ramen en deuren	14
5.2.1 Toepassingsgebied en doel van de norm	14

5.2.2	Testopstelling en randvoorwaarden	14
5.2.3	Drukstappen en meetprocedure	14
5.2.4	Lek van de testkamer	14
5.2.5	Correcties en verwerking	14
5.2.6	Rapportage en koppeling aan EN 12207	14
5.3	EN 12207 – Classificatie	15
5.3.1	Referentiewaarde en normalisatie	15
5.3.2	Luchtdichtheidsklassen volgens EN 12207	15
5.3.3	Geldigheid van de classificatie	16
5.4	EN 12114 – Laboratoriummethode	16
5.4.1	Basisrelatie, correctie naar referentiecondities en spreiding tussen de meetpunten	16
5.4.2	Bepaling van C en n via regressie	16
5.4.1	Onzekerheden en foutmarges op regressieparameters	17
5.4.2	Bronnen van meetonzekerheid	17
5.5	Meetapparatuur en meetnauwkeurigheid volgens de normen	17
6.	Probleemstelling	19
7.	Experimenteel onderzoek	21
7.1	Inleiding en onderzoeksvragen	21
7.2	Case-selectie	22
7.3	Onderzoeksopzet en experimentele strategie	23
7.3.1	Naamgeving en sequentie van testelementen	23
7.3.2	Onderzoeksubjecten en restauratiestrategieën	24
7.3.3	Afbakening en gecontroleerde variabelen	25
7.3.4	Drukrichting en mechanisch effect op het schrijnwerk	25
7.3.5	Toepassing van het normatieve meetkader en vergelijkingsstrategie	26
7.3.6	Onderzoeksstructuur en vergelijkbaarheid	27
7.4	Testopstellingen	28
7.4.1	Testopstelling in situ	28
7.4.2	Testopstelling in het atelier	29
7.4.3	Meetapparatuur en normatief kader	30
7.5	Beschrijving van de onderzoeksubjecten	32
7.5.1	Origineel schrijnwerk	32
7.5.2	Minimaal gerestaureerd schrijnwerk	35
7.5.3	Meervoudige experimentele restauratie	39
7.5.4	Reproductiemodel	46
8.	Onderzoeksresultaten	49
8.1	Referentiemetingen (${}^AOG_{1,2}$ en ${}^SOG_{1,2,3}$)	49
8.1.1	Resultaten bij DI-belasting (atelier)	49
8.1.2	Resultaten bij OP-belasting (in situ en in atelier)	50
8.1.3	Samenvattende observaties	52
8.2	Minimale restauratie (ARE_1 en SRE_3)	54
8.2.1	Resultaten bij DI-belasting (atelier)	54
8.2.2	Resultaten bij OP-belasting (in situ en in atelier)	55
8.2.3	Samenvattende observaties	58
8.3	Uitgebreide en experimentele restauratie (ARE_2)	60
8.3.1	Resultaten bij DI-belasting (atelier)	60
8.3.2	Resultaten bij OP-belasting (atelier)	62
8.3.3	Samenvattende observaties	63
8.4	Reproductiemodel (SREP_2)	65

9. Discussie	67
9.1 Status quo van de restauratiepraktijk	67
9.2 Oorspronkelijke schrijnwerk ^S OG als uitgangsniveau	67
9.2.1 <i>In situ restauratie zonder gesloten afdichtingscontour ^SRE_{3a1}</i>	67
9.2.2 <i>Achterzetraam als pragmatische oplossing ^SRE_{3b1-2}</i>	68
9.2.3 <i>Reproductiemodel ^SREP₂: geen benchmark, maar spiegel</i>	68
9.2.4 <i>Synthese: status quo onder spanning</i>	69
9.3 Eén dichting ^A RE ₁ : randvoorwaarden voor slagen en structureel falen	70
9.3.1 <i>^SRE_{3a} in situ: een volledige restauratie zonder gesloten afdichtingscontour</i>	70
9.3.2 <i>^ARE₁-sequentie als analytische dissectie van restauratie-effecten</i>	70
9.3.3 <i>De voorwaarden: continuïteit, uitvoeringskwaliteit en controle</i>	71
9.3.4 <i>Materiaalkeuze als secundaire factor</i>	73
9.3.5 <i>^ARE₁ als technisch haalbaar maar praktisch kwetsbaar optimum</i>	73
9.4 Doorlopende afdichting en rendement: kwantificatie ^A RE ₂	74
9.4.1 <i>Referentiepunt: enkelvoudige middendichting (^ARE_{2a} en ^ARE_{1d})</i>	74
9.4.2 <i>Positionering als bepalende factor: binnen versus buiten</i>	74
9.4.3 <i>Combinaties en cumulatief effect: afnemende marginale winst</i>	75
9.4.4 <i>Rol van het rubbertype: systematisch maar secundair</i>	76
9.4.5 <i>Drievoudige afdichting: technische grens en rationele stop</i>	76
9.4.6 <i>Synthese: welke eerste dichting maakt het verschil</i>	76
9.5 Methodologische reflectie, randvoorwaarden en het interpretatiekader	77
9.5.1 <i>Randvoorwaarden, beperkingen en generaliseerbaarheid van de resultaten</i>	77
9.5.2 <i>In situ versus in het atelier: invloed van context, demontage en positionering</i>	78
9.5.3 <i>Afdichting van de testopstelling: folie versus plaatmateriaal</i>	79
9.5.4 <i>Controlemethoden en niet-uitgevoerde verificaties</i>	79
9.5.5 <i>Implicaties voor restauratiepraktijk en perspectieven voor toekomstig onderzoek</i>	80
10. Conclusie	81
11. Maatschappelijke reflectie	83
11.1 Klimaatambities en erfgoedverantwoordelijkheid	83
11.2 Het achterzetraam als schijnoplossing	83
11.3 Praktijk, kennis en verantwoordelijkheid	84
11.4 Beleidsmatige implicaties	84
11.5 Slotbeschouwing	84
Bibliografie	87
Bijlagen	89

1. Inleiding

Sinds 2006 moeten nieuwe en gerenoveerde gebouwen in Vlaanderen voldoen aan strenge EPB-eisen die een goed niveau van thermische isolatie, energieprestatie en binnenluchtkwaliteit moeten verzekeren. De regelgeving heeft geleid tot een verhoogde aandacht voor doorgedreven isolatie, performante HVAC-systemen en gecontroleerde ventilatie. Naarmate transmissieverliezen afnamen, nam het relatieve belang van luchtlekken in de gebouwschil toe en groeide de nood aan luchtdicht bouwen als essentieel onderdeel van energie-efficiënte constructies. (*EPB-pedia, n.d.*)

Luchtdichtheid heeft een bredere impact dan louter de energetische prestatie. Een gecontroleerde luchtstroming vermindert de kans op condensatie en vochtschade, verhoogt het thermisch en akoestisch comfort en zorgt voor een voorspelbaarder brandgedrag. Balansventilatiesystemen functioneren bovendien slechts optimaal wanneer de gebouwschil voldoende luchtdicht is. Hoewel Vlaanderen geen algemene minimale luchtdichtheidseis oplegt, tonen blowerdoortesten aan dat beperkte verbeteringen aanzienlijke effecten kunnen hebben op het E-peil van gebouwen. (*EPB-pedia, n.d.; Buildwise, n.d.*)

Binnen de gebouwschil vormt buitenschrijnwerk een bijzonder kritisch component. Historisch én hedendaags schrijnwerk bevat bewegende delen, sluitmechanismen en verbindingen die gevoelig zijn voor infiltratie en exfiltratie. Voor nieuwbouw bestaan er duidelijke richtlijnen en prestatieniveaus, maar voor een erfgoedkundige renovatie is dergelijk kader grotendeels afwezig. (*Buildwise, n.d.*)

Beschermde en geïnventariseerde onroerende goederen genieten immers van een gedeeltelijke of volledige vrijstelling van verschillende EPB-verplichtingen. Energetische verbeteringen moeten enkel worden doorgevoerd “*in de mate van het mogelijke*”, waarbij erfgoedwaarde steeds primeert. Historisch schrijnwerk wordt hierdoor geconfronteerd met zowel technische beperkingen (vervormde profielen, traditionele sluitingen, etc.) als erfgoedkundige restricties. De afwezigheid van een referentiekader heeft ertoe geleid dat er weinig kennis beschikbaar is over de haalbare prestaties en geschikte restauratietechnieken om luchtdichtheid te verbeteren zonder aantasting van het erfgoed. (*Vlaanderen.be, n.d.-a; Onroerend Erfgoed, n.d.*)

Het *HeriTACE-project* (Universiteit Gent, gesubsidieerd door de Europese Commissie) speelt in op dit tekort door een methodologie te ontwikkelen voor het energetisch verbeteren van historisch patrimonium met respect voor de erfgoedwaarde. Binnen dit kader vormt de luchtdichtheid van historisch buitenschrijnwerk een cruciaal onderzoeksthema. (*HeriTACE, n.d.*)

Voor deze scriptie wordt samengewerkt met *Denys*, de bouwfirma verantwoordelijk voor de restauratiewerken van het 19^{de}-eeuwse Materniteitsgebouw op de Bijlokesite in Gent. Denys paste op een reeks typische historische ramen verschillende restauratie- en renovatietechnieken toe, waaronder toepassing van achterzetramen, reproducties en hybride ingrepen afhankelijk van de erfgoedeisen.

Deze thesis onderzoekt de luchtdichtheidsprestaties van deze verschillende technieken. Door metingen, analyse en vergelijking van de uitgevoerde interventies wil het onderzoek bepalen hoe

effectief de toegepaste restauratie- en renovatiestrategieën van *Denys* zijn, welke parameters deze prestaties beïnvloeden en in welke mate bepaalde technieken geoptimaliseerd kunnen worden. Het doel is om een beter inzicht te bieden in de mogelijkheden en beperkingen van luchtdichtheidsverbeteringen bij historisch schrijnwerk, en zo bij te dragen aan de ontwikkeling van een duurzame, erfgoedvriendelijke en technisch onderbouwde aanpak binnen het HeriTACE-project.

2. Erfgoedwaarde versus energieprestatie

De energetische renovatie van historische gebouwen bevindt zich op het kruispunt van twee vaak tegenstrijdige belangen: de noodzaak om de energie-efficiëntie van het gebouwenpark drastisch te verbeteren en de plicht om het onroerend erfgoed te vrijwaren voor toekomstige generaties. Dit hoofdstuk schetst het regelgevende kader waarbinnen dit onderzoek zich situeert en verduidelijkt de specifieke rol van luchtdichtheid binnen de energieprestatieregelgeving.

2.1 Regelgevend kader in Vlaanderen (EPB)

2.1.1 Historische context en de Europese impuls

De drijvende kracht achter de huidige energieprestatieregelgeving is de internationale bezorgdheid omtrent de klimaatverandering en de uitputting van fossiele brandstoffen. In reactie op het Kyoto-protocol (1997) en de daaropvolgende Europese 20-20-20 doelstellingen, werd de Europese Richtlijn betreffende de energieprestatie van gebouwen (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive 2002/91/EG) uitgevaardigd. (*Vernimme, 2013*)

In Vlaanderen werd deze richtlijn vertaald naar het Energiedecreet en de invoering van de EPB-regelgeving (Energieprestatie en Binnenklimaat), die sinds 1 januari 2006 van kracht is voor bouwaanvragen. Het doel van deze regelgeving is het integreren van energiebesparende maatregelen, thermische isolatie en een gezond binnenklimaat in het bouwproces. Sinds de invoering zijn de eisen stelselmatig verstrengd, evoluerend van basisisolatienormen naar de huidige BEN-eisen (Bijna-EnergieNeutraal) voor nieuwbouw. (*Vernimme, 2013*)

2.1.2 Indicatoren: E-peil en de rol van luchtdichtheid

De energieprestatie van een wooneenheid wordt in Vlaanderen uitgedrukt aan de hand van het E-peil, een maat voor het primaire energieverbruik. Dit peil is afhankelijk van diverse factoren, waaronder de compactheid van het gebouw, de thermische isolatie (K-peil of S-peil), de efficiëntie van installaties en de luchtdichtheid. (*Vernimme, 2013*)

Hoewel er in de regelgeving geen strikte minimumwaarde voor luchtdichtheid wordt opgelegd bij renovaties, speelt deze parameter een cruciale rol in de berekening van het E-peil. In de EPB-rekenmethodiek wordt de luchtdichtheid uitgedrukt als de n_{50} -waarde (de ventilatievoud bij een drukverschil van 50 Pa) of de v_{50} -waarde (het lekdebiet per vierkante meter verliesoppervlakte). Indien er geen luchtdichtheidsmeting (blowerdoortest) wordt uitgevoerd, hanteert de software een strafwaarde van $12 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, wat een negatieve impact heeft op het berekende E-peil. (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*)

2.1.3 De impact van buitenschrijnwerk op de luchtdichtheid

Binnen de gebouwschil vormt het buitenschrijnwerk een kritieke component voor de globale luchtdichtheid. De luchtdoorlatendheid van het raamgeheel wordt bepaald door twee factoren: ten eerste het raam op zich, via de infiltratie door de voegen tussen vleugel en kader en tussen glas en profiel. De prestatie van vensters wordt geclassificeerd volgens de norm NBN EN 12207 in

klassen 1 tot 4, waarbij Klasse 4 de hoogste dichtheid vertegenwoordigt. (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*)

Een tweede bepalende factor is de bouwaansluiting, oftewel de infiltratie via de voeg tussen het raamkader en de ruwbouw. Een gebrekkige aansluiting kan de prestaties van een performant raam tenietdoen. Onderzoek wijst uit dat traditionele aansluitingen zonder specifieke luchtdichting, zoals het louter opvullen met PU-schuim, vaak ontoereikend zijn en tot aanzienlijke luchtlekken leiden. (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*)

2.2 Erfgoedstatuten en juridische consequenties

De impact van de erfgoedregelgeving op een renovatieproject wordt bepaald door het juridische statuut van het gebouw. In Vlaanderen maken we een strikt onderscheid tussen 'beschermd erfgoed' en 'geïnteriseerd erfgoed'. Dit onderscheid bepaalt niet alleen de procedurele weg (welke vergunningen zijn nodig?), maar ook de marge waarbinnen energetische ingrepen mogelijk zijn.

2.2.1 Beschermd Monument: De strikte instandhoudingsplicht

Een gebouw wordt bij ministerieel besluit beschermd als monument omwille van zijn uitzonderlijke historische, artistieke, industrieel-archeologische of andere sociaal-culturele waarde. Dit is de hoogste graad van bescherming. (*Vernimme, 2013*)

Restricties en verplichtingen: Voor een beschermd monument geldt een passieve en actieve behoudsplicht. Eigenaars zijn verplicht het goed in goede staat te houden (actief) en mogen het niet ontsieren of slopen (passief). Voor *alle* werken aan een monument, ook werken die normaal vrijgesteld zijn van vergunning, zoals het vervangen van ramen naar oorspronkelijk model of het plaatsen van voorzetramen, is een toelating of een omgevingsvergunning nodig. Hierbij is het advies van het agentschap Onroerend Erfgoed bindend. (*Vernimme, 2013*)

Impact op EPB: Vanwege deze strikte beperkingen erkent de wetgever dat standaard EPB-eisen vaak onhaalbaar zijn. Voor beschermde monumenten kan daarom een vrijstelling van de EPB-eisen worden aangevraagd indien kan worden aangetoond dat de ingrepen afbreuk zouden doen aan de erfgoedwaarde. Dit betekent echter niet dat men geen inspanningen moet leveren; de focus verschuift naar 'redelijke verbetering' in plaats van strikte normconformiteit. (*Mahieu, 2017*)

2.2.2 Vastgestelde Inventaris Bouwkundig Erfgoed: Zorgplicht

De 'Vastgestelde Inventaris van het Bouwkundig Erfgoed' is een lijst van gebouwen die lokaal of regionaal waardevol zijn, maar niet de uitzonderlijke waarde van een monument hebben. Het gaat hier vaak om typische herenhuizen, arbeiderswoningen of 19e-eeuwse burgerwoningen.

Restricties en verplichtingen: Gebouwen op de inventaris zijn *niet* beschermd in de strikte zin. Er is geen algemene instandhoudingsplicht zoals bij monumenten. Wel geldt er een zorgplicht en een verbod op sloop zonder vergunning. Bij verbouwingen die vergunningsplichtig zijn (zoals het wijzigen van het geveluitzicht door het vervangen van schrijnwerk), zal de vergunningverlenende overheid (meestal de gemeente) aftoetsen of de erfgoedwaarden gerespecteerd worden. Het

advies van Onroerend Erfgoed is hierbij vaak adviserend, maar niet altijd bindend, afhankelijk van het gemeentelijk beleid. (*Vernimme, 2013*)

Impact op EPB: Voor panden op de inventaris is een volledige EPB-vrijstelling doorgaans *niet* mogelijk. Wel kan men een afwijking aanvragen voor specifieke deeleisen. Concreet: als het plaatsen van dikke isolerende profielen het gevelbeeld zou verstoren, kan men een afwijking krijgen om dunner, minder isolerend schrijnwerk te plaatsen, mits dit goed gemotiveerd wordt. De EPB-plicht blijft bestaan, maar de 'lat' wordt lokaal verlaagd om de esthetiek te redden. (*Vernimme, 2013*); (*Mahieu, 2017*)

2.2.3 De afweging in de praktijk: behoud vs. comfort

In de praktijk betekent dit dat voor een beschermd monument het materieel behoud (de originele materie) primeert. Het vervangen van een 19e-eeuws raam door een kopie is hier in principe *niet* toegestaan, tenzij het origineel onherstelbaar verloren is. Restauratie en kierdichting zijn hier de norm. (*Mahieu, 2017*)

Voor een pand op de inventaris primeert het beeldbehoud (de esthetische verschijningsvorm). Hier is het vervangen van het schrijnwerk door een (hoogwaardige) reproductie vaak wel bespreekbaar, zolang de profilering en detaillering (zoals de 'neuzen' van de regels en de breedte van de stijlen) overeenkomen met het historische beeld. (*Monumentenwacht Vlaanderen, 2004*)

2.3 De paradox van ventilatie en infiltratie

Het streven naar een verhoogde luchtdichtheid in historische gebouwen brengt een inherente spanning met zich mee. Terwijl moderne passiefbouw zweert bij het adagium 'build tight, ventilate right', zijn historische gebouwen vaak geconcipieerd (bewust of onbewust) om te functioneren bij gratie van een zekere luchtdoorlatendheid. Dit hoofdstuk analyseert het fundamentele verschil tussen infiltratie en ventilatie en de hygrothermische risico's die gepaard gaan met het verstoren van het historische evenwicht.

2.3.1 Infiltratie versus gecontroleerde ventilatie

Hoewel beide termen verwijzen naar luchtverversing, is het onderscheid tussen infiltratie en ventilatie essentieel voor een correcte renovatiestrategie. Infiltratie betreft de ongecontroleerde toetreding van buitenlucht doorheen onbedoelde openingen in de gebouwschil, zoals kieren rondom schrijnwerk, slecht aansluitende voegen of poreuze materialen. Deze luchtstromen zijn afhankelijk van de weersomstandigheden (winddruk en temperatuurverschil) en leiden vaak tot tochtklachten, comfortverlies en onnodig energieverlies, aangezien ze niet geregeld kunnen worden in functie van de behoefte. (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*)

Ventilatie daarentegen is het proces van doelbewuste luchtverversing met als doel een gezond binnenklimaat te garanderen en vervuilde stoffen (zoals CO₂ en vocht) af te voeren. In tegenstelling tot infiltratie is ventilatie regelbaar, hetzij natuurlijk (via roosters), hetzij mechanisch. Het energetisch optimaliseren van historisch schrijnwerk heeft als doel de parasitaire infiltratie (de n₅₀-waarde) te minimaliseren, zodat de luchtverversing exclusief via gecontroleerde ventilatievoorzieningen kan verlopen. (*Becker, 1979*); (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*)

2.3.2 Het verstoorde vochteevenwicht

Historische gebouwen hebben vaak een 'ademend' karakter, waarbij een constante, zij het ongecontroleerde, luchtstroom helpt om de interne vochtproductie af te voeren en de relatieve vochtigheid binnen de perken te houden. Wanneer men ingrijpt op de luchtdichtheid van het schrijnwerk (bijvoorbeeld door het plaatsen van rubberdichtingen), wordt dit historische evenwicht verstoord. Zonder compenserende maatregelen op het vlak van ventilatie kan de afname van natuurlijke infiltratie leiden tot een stijging van de relatieve vochtigheid binnenshuis. *(Vernimme, 2013)*

Dit verhoogde vochtgehalte brengt aanzienlijke risico's met zich mee, met name oppervlaktecondensatie en schimmelvorming. In historische gebouwen zijn er vaak koudebruggen aanwezig (bijvoorbeeld bij niet-geïsoleerde muren of dagkanten). Wanneer de luchtvochtigheid stijgt en de ventilatievoud daalt, zal de waterdamp in de binnenlucht sneller condenseren op deze koude oppervlakken. *(WTCB, 2012)*

2.3.3 Verschuiving van het condensatiepunt

Een specifiek risico bij ingrepen aan vensters is de verplaatsing van het koudste oppervlak. Bij een historisch raam met enkel glas fungeert de beglazing als het 'opofferingsvlak': condensatie treedt hier als eerste op, wat zichtbaar is en meestal geen structurele schade veroorzaakt (afgezien van mogelijke houtrot aan de onderdorpel). Indien men echter enkel het glas vervangt door hoogrendementsbeglazing of achterzetramen plaatst zonder de omringende muren te isoleren of de kierdichting te verbeteren, kan het koudste punt verschuiven naar de dagkanten of de muur, met onzichtbare condensatie en schimmeligroei tot gevolg. *(WTCB, 2012); (Vernimme, 2013)*

3. Historisch schrijnwerk

Een correcte analyse van de luchtdichtheidsproblematiek bij historisch schrijnwerk vereist een grondig inzicht in de constructiewijze en de specifieke materiaaltechnische eigenschappen. In tegenstelling tot hedendaags schrijnwerk, dat ontworpen is als een geassembleerd systeem met meervoudige dichtingsrubbers en drukkamers, vertrouwt het 19e-eeuwse raam op de nauwkeurigheid van de houtverbinding en eenvoudige profileringen om water en wind te weren.

3.1 Typologie en constructieprincipes

3.1.1 Houttechnologie en verbindingen

Het 19e-eeuwse buitenschrijnwerk wordt gekenmerkt door het gebruik van massief hout, veelal eikenhout of harshoudende naaldhoutsoorten met een hoge natuurlijke duurzaamheid. De assemblage van stijlen en regels gebeurt traditioneel door middel van pen-en-gatverbindingen. Deze verbindingen werden in de regel niet verlijmd, maar gefixeerd met houten toogpennen. Dit liet toe dat de constructie kon 'werken' onder invloed van vochtschommelingen zonder te scheuren, maar impliceert tevens dat de structurele stijfheid van de vleugel doorheen de tijd kan afnemen. (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*)

3.1.2 Profileren en beglazing

De profilering van het raamhout was in de 19^e eeuw niet louter esthetisch, maar vervulde een cruciale waterwerende functie. Kenmerkend zijn de 'waterholletjes' en druiplijsten aan de onderregels en de wisselstijlen (bij stolpramen), bedoeld om het regenwater weg te leiden van de kwetsbare naden. De beglazing betreft doorgaans enkel glas (getrokken of geblazen), dat in een sponning is geplaatst en wind- en waterdicht is afgewerkt met lijnoliehoudende stopverf. De stopverfzoom vormt de enige barrière tussen het glas en het hout want rubberdichtingen waren in deze periode onbestaande. (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*); (*Monumentenwacht Vlaanderen, 2004*)

3.2 Kritieke lekkagepaden

De luchtdoorlatendheid van een historisch venster is niet diffuus, maar concentreert zich rond specifieke lineaire lekpaden. Voor het energetisch onderzoek onderscheiden we drie primaire zones van infiltratie.

3.2.1 De functionele voeg (vleugel-kader)

De grootste bron van luchtlekken bevindt zich ter plaatse van de aansluiting tussen de draaiende vleugel en het vaste kader (de sponning). Bij historisch schrijnwerk betreft dit doorgaans een 'koud' contact hout-op-hout. Zonder de aanwezigheid van een flexibele dichting is de luchtdichtheid hier volledig afhankelijk van de vlakheid van het hout en de sluitkracht van het beslag. Zelfs bij een perfect geproduceerd raam blijft er een minimale speling noodzakelijk om het klemmen van de vleugel door uitzetting te voorkomen, wat resulteert in een intrinsiek lekdebiel. (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*); (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*)

3.2.2 De beglazingsvoeg

Een tweede, vaak onderschat lekpad bevindt zich tussen het glas en het houtprofiel. Na verloop van tijd verliest de traditionele stopverf zijn elasticiteit door uitdroging (verlies van lijnolie). Dit leidt tot het verpulveren of barsten van de kitzoom, waardoor capillaire naden ontstaan waarlangs lucht en water vrij spel krijgen. In geavanceerde stadia van degradatie kan het glas zelfs loskomen in de sponning, wat leidt tot aanzienlijke infiltratie. (*Monumentenwacht Vlaanderen, 2004*)

3.2.3 De bouwaansluiting (kader-muur)

De aansluiting van het houten kader op het metselwerk (de dagkant) vormt een derde kritieke zone. In de 19^e-eeuwse bouwpraktijk werden kozijnen vaak ingemetst of achter slag geplaatst met een afdichting van kalkmortel of strijkwerk. Na verloop van tijd krimpt het hout en kunnen er zettingsscheuren in het pleisterwerk ontstaan. Aangezien er historisch geen gebruik werd gemaakt van luchtdichte folies of zwellende banden, vormt deze naad (de 'aansluitvoeg') een directe verbinding tussen binnen en buiten. (*Van Den Bossche & Desanghere, 2022*); (*WTCB, 2012*)

3.2.4 Degradatie en invloed op prestaties

De initiële luchtdichtheid van het raam degradeert doorheen de levensduur onder invloed van mechanische en fysische belastingen. Dit inzicht is relevant voor de interpretatie van in situ metingen versus labo-testen.

3.2.5 Vervorming en kromtrekken

Hout is een hygroscopisch materiaal dat streeft naar een vochtevenwicht met de omgeving. Verschillen in vochtigheid en temperatuur tussen de binnen- en buitenzijde van het raamprofiel veroorzaken differentiële krimp en zwellen. Dit kan leiden tot het kromtrekken (schotelen of torderen) van de vleugels. Wanneer de vleugel niet meer vlak aansluit in de sponning, ontstaan er kieren die niet meer door de sluiting kunnen worden dichtgedrukt. Dit fenomeen maakt het plaatsen van moderne, stijve tochtprofielen vaak ineffectief, aangezien deze niet voldoende speling hebben om de onregelmatige kier te overbruggen. (*Monumentenwacht Vlaanderen, 2004*); (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*)

3.2.6 Slijtage van hang- en sluitwerk

Het hang- en sluitwerk (paumelles, espagnoletten) is onderhevig aan mechanische slijtage. Het uitslijten van scharnieren leidt tot het 'afhangen' van de raamvleugel, waardoor de bovenste naad breder wordt en de vleugel onderaan sleept. Daarnaast verliezen espagnoletten (krukspanjoletten) na verloop van tijd hun sluitkracht, waardoor de vleugel niet meer met voldoende druk in de sponning wordt getrokken om een eventuele dichting te comprimeren. (*Monumentenwacht Vlaanderen, 2004*)

4. Restauratie- en verbeteringstechnieken

Het verbeteren van de bouwfysische prestaties van historisch schrijnwerk vereist een genuanceerde aanpak. In de monumentenzorg hanteert men hierbij doorgaans de 'ladder van interventie', een hiërarchisch beslissingsmodel waarbij behoud van authentiek materiaal primeert. Pas wanneer minder ingrijpende maatregelen ontoereikend blijken om het gebouw functioneel te houden, wordt opgeschaald naar meer invasieve technieken.

4.1 De basis: onderhoud en herstel

Alvorens energetische verbeteringen door te voeren, dient het schrijnwerk in een goede staat van onderhoud te verkeren. Achterstallig onderhoud is immers vaak de primaire oorzaak van luchtlekken en waterinfiltratie.

4.1.1 Houttechnisch herstel

Houtrot, vaak gesitueerd aan de onderdorpels en de verbindingen, ondermijnt de structurele integriteit en de luchtdichtheid. Traditioneel herstel omvat het uitstukken van aangetaste delen met gezond hout van dezelfde soort en kwaliteit. Een correct uitgevoerd houttechnisch herstel herstelt de oorspronkelijke geometrie van het raam, wat een essentiële voorwaarde is voor een sluitende naad. (*Monumentenwacht Vlaanderen, 2004*)

4.1.2 Schilderwerk en stoppasta

Het schilderwerk vormt de eerste verdedigingslinie tegen vocht, maar draagt ook bij aan de luchtdichtheid door het afdichten van poriën en haarscheurtjes in het hout. Even cruciaal is de staat van de stoppasta (mastië). Oude, verharde stopverf barst en onthecht, wat leidt tot luchtinfiltratie langs de glasrand. Het vervangen van de stopverfzoom is een standaard onderhoudsingreep die de winddichtheid van de beglazingsvoeg herstelt. (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*)

4.2 Kierdichting

Het aanbrengen van dichtingsprofielen is de meest efficiënte maatregel om infiltratieverliezen en tochtklachten te reduceren bij bestaand schrijnwerk. We onderscheiden hierin twee hoofdcategorieën, afhankelijk van de montagewijze.

4.2.1 Ingefreesde profielen

De esthetisch meest discrete oplossing is het infrezen van een dichting in de sponning (de slag) van het vaste kader of de vleugel. Hierbij wordt doorgaans gebruik gemaakt van siliconenprofielen of EPDM-rubbers die in een groef van 3 à 4 mm worden gedrukt. Deze methode vereist dat het hout in goede staat is en dat er voldoende 'vlees' (houtdikte) aanwezig is in de sponning om de groef te frezen zonder de constructie te verzwakken. (*WTCB, 2012*); (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*)

4.2.1.1 Dichtingsprofielen

Dichtingsprofielen worden ingedeeld naar hun dwarsdoorsnede vorm, doorgaans aangeduid met letters die de geometrie beschrijven. Holle profielen (D-, P- en O-vorm) bevatten een luchtkamer die samendrukking vergemakkelijkt en een groter herstellvermogen biedt na herhaalde belasting. Het D-profiel heeft een halfcirkelvormige doorsnede en is geschikt voor middelgrote kieren. Het P-profiel combineert een bevestigingsvoet met een holle kop en biedt goede afdichting bij variërende kierbreedte. Het O-profiel (buisvormig) is het meest comprimeerbaar en daardoor geschikt voor onregelmatige of grotere spleten. (*EKI, z.d.*)

Massieve profielen (E- en I-vorm) bieden meer weerstand bij compressie. Het E-profiel bestaat uit meerdere evenwijdige vinnen die trapsgewijs indrukken, geschikt voor kleinere, regelmatige kieren. Het I-profiel is een eenvoudige rechthoekige strip voor minimale spleten. (*ERIKS, z.d.*)

Een belangrijk selectie criterium is de *werkende slag* van een profiel: het bereik waarbinnen effectieve afdichting optreedt. Bij historisch schrijnwerk, waar kiervariatie langs de omtrek aanzienlijk kan zijn door kromtrekking of slijtage, is een profiel met groot werkingsinterval cruciaal. Deventer Profielen biedt hiervoor specifieke hoogtolerantieprofielen met een vergroot werkingsbereik. (*Deventer Profielen, z.d.-a*)

Gangbare materialen zijn TPE (thermoplastisch elastomeer), EPDM (ethyleen-propyleen-dieen-monomeer) en siliconen. TPE combineert de elasticiteit van rubber met de verwerkbaarheid van thermoplasten, wat resulteert in goede vormstabiliteit en duurzaamheid. EPDM biedt uitstekende weerstand tegen UV-straling en veroudering. Siliconen zijn zeer temperatuurbestendig maar doorgaans duurder. In de praktijk is de materiaalkeuze echter secundair ten opzichte van geometrische randvoorwaarden: een correct gepositioneerd profiel met uniform contact over de volledige omtrek presteert beter dan een hoogwaardig materiaal in een suboptimale configuratie.

In dit onderzoek worden profielen uit de Deventer-reeks toegepast, waaronder het SPV12 (VarioSoft dichtingsprofiel met gesloten-cellig microschuim), S5510 (hoekprofiel) en S0032 (sponningprofiel). Deze profielen zijn vervaardigd van hoogwaardig TPE en voldoen aan luchtdichtheidsklasse 4 conform NEN-EN 12207. De technische tekeningen van deze profielen zijn opgenomen in de bijlagen. (*Deventer Profielen, z.d.-b*)

4.2.2 De houten aanslaglat met geïntegreerde dichting (opdeklat)

Een alternatieve strategie voor het infrezen in het bestaande hout, is het toevoegen van materiaal om een nieuwe, gecontroleerde aanslag te creëren. In dit onderzoek wordt deze techniek toegepast onder de noemer "opdeklatten".

Hierbij wordt een geprofileerde houten lat op de raamvleugel (of het kader) bevestigd die de naad tussen vleugel en kader fysiek overbrugt. In deze lat is aan de achterzijde (de contactzijde) een uitsparing of groef voorzien waarin een modern dichtingsrubber wordt gemonteerd. Wanneer het raam sluit, drukt deze dichting tegen het vlak van het kader (of de vleugel).

4.2.3 Beperkingen bij kromgetrokken ramen

Een cruciale randvoorwaarde voor kierdichting is de pasvorm van de vleugel. Historische raamvleugels vertonen vaak vervormingen (tats of kromtrekking). Standaard dichtingsrubbers hebben een beperkt werkingsbereik (de 'werkende slag'). Indien de variatie in de kierbreedte langs de omtrek van het raam groter is dan het compenserend vermogen van het rubber, zal de dichting lokaal niet aanliggen, waardoor het lekdebiët slechts gedeeltelijk wordt gereduceerd. (*De Stadswinkel – Le Centre Urbain, 2008*)

4.3 Beglazingsinterventies (thermische verbetering)

Hoewel de focus van dit onderzoek op luchtdichtheid ligt, wordt in de praktijk vaak ingegrepen op het glas om de thermische isolatiewaarde (U-waarde) te verbeteren. Deze ingrepen hebben bouwfysische neveneffecten die relevant zijn voor de globale prestatie.

4.3.1 Vervanging door dubbele of hoogrendementsbeglazing

Het vervangen van enkel glas door dubbel glas in bestaande vleugels is vaak technisch problematisch. De sponningdiepte van 19e-eeuws schrijnwerk is doorgaans te beperkt om een dubbele glasplaat (minimaal 10-14 mm) inclusief glaslatten te huisvesten. Bovendien zorgt het aanzienlijke meergewicht van dubbel glas voor een extra belasting op de, vaak reeds versleten, scharnieren en houtverbindingen, wat op termijn kan leiden tot het afhangen van de vleugels en het ontstaan van nieuwe luchtlekken. (*WTCB, 2012*); (*Vernimme, 2013*)

4.3.2 Ultradun dubbel glas en vacuümglas

Als antwoord op de gewichtsproblematiek zijn er specifieke beglazingstypes ontwikkeld voor de restauratiesector. Dit omvat 'getrokken' dubbel glas met een zeer dunne spouw (totale dikte ca. 10 mm) of vacuümglas (dikte ca. 6-8 mm). Deze types benaderen de isolatiewaarde van standaard hoogrendementsglas, maar passen fysiek in de historische sponning en hebben een lager gewicht, waardoor de mechanische belasting op het raamhout beperkt blijft. (*Mahieu, 2017*)

4.4 Secundaire beglazing (achterzetramen)

Een niet-destructieve methode om zowel de thermische, akoestische als luchtdichtheidsprestaties te verbeteren, is het plaatsen van een secundair raam.

4.4.1 Principe en werking

Bij deze techniek wordt het historische raam ongemoeid gelaten en wordt er aan de binnenzijde (achterzetraam) of, minder courant, aan de buitenzijde (voorzetraam) een volledig nieuw raamkader geplaatst. De luchtsponw tussen beide ramen fungeert als thermische buffer. (*WTCB, 2012*)

4.4.2 Impact op luchtdichtheid

Indien het achterzetraam zelf is voorzien van moderne dichtingen, neemt dit de functie van primaire luchtdichtingsbarrière over. Het buitenraam fungeert dan enkel nog als regenscherm. Er dient aandacht besteed te worden aan condensatierisico's in de tussenruimte want een lichte

ventilatie van de spouw met buitenlucht is vaak noodzakelijk om vochtophoping te vermijden, al vermindert dit het thermisch rendement enigszins. *(WTCB, 2012); (Vernimme, 2013)*

4.5 Vervanging (reproductie)

Wanneer herstel technisch of economisch niet meer haalbaar is, kan overgegaan worden tot reproductie.

4.5.1 Eisen aan reproductie

Bij een reproductie in een erfgoedcontext wordt verwacht dat de profilering, de houtsoort en de detaillering van het origineel exact worden gekopieerd. Echter, modern machinaal vervaardigd schrijnwerk wordt doorgaans voorzien van dubbele dichtingsrubbers en zwaarder beslag, waardoor deze ramen voldoen aan de huidige normen voor luchtdichtheid (Klasse 4 volgens NBN EN 12207). Toch, later zal blijken dat dat niet altijd het geval is. *(Mahieu, 2017)*

5. Meetmethodiek en normering

Om de invloed van de verschillende restauratietechnieken objectief te kwantificeren, is een gestandaardiseerde meetmethodiek noodzakelijk. Dit hoofdstuk bespreekt de fysische wetmatigheden die aan de basis liggen van luchtstroming door kieren en de normatieve kaders die gebruikt worden om de prestaties van buitenschrijnwerk te classificeren.

5.1 Algemene fysische principes van luchtdoorstroming

Luchtdoorstroming door bouw- en raamelementen wordt veroorzaakt door een drukverschil tussen twee zijden van een constructie. Dit drukverschil kan ontstaan door windbelasting, thermische effecten of mechanisch opgelegde druk via een ventilator. In luchtdichtheidsmetingen wordt dit drukverschil kunstmatig opgelegd om het resulterende luchtdebiet door kieren, voegen en openingen te kunnen kwantificeren.

Het verband tussen het opgelegde drukverschil en het gemeten luchtdebiet wordt in de normen beschreven aan de hand van de stromingsvergelijking:

$$Q = C * \Delta P^n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Hierbij is:	Q	=	volumetrisch luchtdebiet	$[\text{m}^3/\text{h}]$
	C	=	stromingscoëfficiënt	$[\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)]$
	Δp	=	drukverschil	$[\text{Pa}]$
	n	=	stromingsexponent $[0,5 < n < 1,0]$	$[-]$

Wanneer $n \approx 0,5$ is er sprake van een turbulente stroming. Dit treedt doorgaans op bij grotere openingen waar de traagheidskrachten domineren. Bij $n \approx 1,0$ is er sprake van een laminaire stroming. Dit is kenmerkend voor zeer fijne capillaire lekken (zoals in poreuze materialen of zeer nauwe kieren) waar viskeuze krachten domineren. Voor kieren in buitenschrijnwerk ligt de waarde in de praktijk meestal tussen 0,6 en 0,7 (gemengde stroming). (*Becker, 1979*)

Aangezien het luchtdebiet niet lineair afhankelijk is van het drukverschil, schrijven de normen voor dat metingen worden uitgevoerd bij meerdere drukkiveaus. Op basis van deze meetpunten wordt de relatie tussen Q en Δp bepaald via regressie, doorgaans op een logaritmische schaal:

$$\log(Q) = \log(C) + n * \log(\Delta p) \quad [-]$$

De bekomen parameters C en n maken het mogelijk om het luchtdebiet te herleiden naar vooraf vastgelegde referentiedrukken, zoals 50 Pa of 100 Pa. Deze referentiedrukken worden gebruikt om meetresultaten onderling vergelijkbaar te maken en vormen de basis voor verdere normalisatie en classificatie volgens de normen.

5.2 EN 1026 – Beproevingsmethode voor ramen en deuren

5.2.1 Toepassingsgebied en doel van de norm

EN 1026 beschrijft de laboratoriumbeproevingsmethode voor het bepalen van de luchtdoorlatendheid van volledig geassembleerde ramen en deuren. Het testelement wordt gemonteerd in een stijve testwand of testkamer en beproefd onder opgelegde positieve en/of negatieve drukverschillen.

5.2.2 Testopstelling en randvoorwaarden

Het testelement wordt luchtdicht gemonteerd in een testwand, waarbij uitsluitend luchtlekken door het raam- of deurelement zelf worden gemeten. De testopstelling moet voldoende stijf zijn zodat vervormingen onder testdruk de resultaten niet beïnvloeden. Ventilatioeroosters worden afgedicht, tenzij hun luchtdoorlatendheid expliciet deel uitmaakt van de test.

De norm stelt eisen aan de omgevingscondities en meetapparatuur. Typisch gelden:

- temperatuur- en RV-grenzen voor de testomgeving;
- bekende atmosferische druk;
- gekalibreerde druk- en debietsensoren.

De nauwkeurigheid van de gemeten luchtdoorlatendheid moet binnen $\pm 10\%$ liggen; bij zeer lage debieten geldt een absolute foutgrens (orde van grootte: $\pm 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$).

5.2.3 Drukstappen en meetprocedure

Het drukverschil over het testelement wordt stapsgewijs opgelegd. EN 1026 schrijft drukstappen voor van 50 Pa tot 300 Pa (stappen van 50 Pa), en hogere stappen indien vereist (in stappen van 150 Pa). Voor elk drukniveau wordt het volumetrisch luchtdebiet gemeten nadat een stabiele toestand is bereikt. Metingen kunnen onder positieve en/of negatieve druk gebeuren.

5.2.4 Lek van de testkamer

De luchtdoorlatendheid van de testkamer moet bekend zijn. Indien het kamerlek kleiner is dan 5% van de maximaal toegelaten luchtdoorlatendheid van de beoogde klasse, mag het worden verwaarloosd. In geen geval mag het kamerlek meer bedragen dan 30% van het gemeten totale debiet. Indien nodig wordt het kamerlek van het gemeten debiet afgetrokken.

5.2.5 Correcties en verwerking

EN 1026 vereist dat meetresultaten worden herleid naar gestandaardiseerde condities. Dit omvat:

- correctie voor temperatuur en luchtdichtheid van de lucht;
- nuldrukcorrectie van de drukmeting;
- toepassing van gekende meetonnauwkeurigheden van de apparatuur.

De correcties worden toegepast op de gemeten waarden vóór regressiebepaling van C en n.

5.2.6 Rapportage en koppeling aan EN 12207

De luchtdoorlatendheid wordt gerapporteerd als volumetrisch debiet bij vastgelegde referentiedrukken. Deze waarden vormen de input voor classificatie volgens EN 12207, waarin het debiet bij 100 Pa wordt genormaliseerd per voeglengthe of raamoppervlakte.

5.3 EN 12207 – Classificatie

EN 12207 specificeert de classificatie van de luchtdoorlatendheid van ramen en deuren op basis van meetresultaten verkregen overeenkomstig EN 1026. De norm beschrijft geen meetprocedure, maar definieert de normalisatie, referentiedruk en klassengrenzen voor de evaluatie van luchtdoorlatendheid.

De classificatie is gebaseerd op het luchtdebiet bij een referentiedruk van 100 Pa, en kan gebeuren:

- in verhouding tot de totale raamoppervlakte, of
- in verhouding tot de totale lengte van de openende voegen.

5.3.1 Referentiewaarde en normalisatie

Het luchtdebiet bij 100 Pa wordt bepaald als:

$$Q_{100} = Q_p * \left(\frac{100}{p}\right)^{2/3} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Voor classificatie wordt dit debiet uitgedrukt als:

$$q_{100}L = \frac{Q_{100}}{L} \quad [\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})]$$

$$q_{100}A = \frac{Q_{100}}{A} \quad [\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)]$$

Hierbij is:	Q_p	=	luchtdebiet bij testdruk p	$[\text{m}^3/\text{h}]$
	p	=	testdruk	$[\text{Pa}]$
	L	=	totale lengte van bewegende voegen	$[\text{m}]$
	A	=	raamoppervlakte	$[\text{m}^2]$

5.3.2 Luchtdichtheidsklassen volgens EN 12207

Classificatie op basis van voeglengthe en oppervlakte:

Klasse	$q_{100}L$ $[\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})]$	$q_{100}A$ $[\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)]$
4	$\leq 0,75$	≤ 3
3	$\leq 2,25$	≤ 9
2	$\leq 6,75$	≤ 27
1	$\leq 12,50$	≤ 50
0	$> 12,50$	> 50

5.3.3 Geldigheid van de classificatie

Een raam wordt geclassificeerd op basis van de gemiddelde luchtdoorlatendheid bij positieve en negatieve druk. Indien classificatie op basis van oppervlakte en voeglengte tot verschillende klassen leidt:

- geldt de ongunstigste klasse;
- bij een verschil van meer dan twee klassen wordt geen classificatie toegekend.

5.4 EN 12114 – Laboratoriummethode

EN 12114 specificeert een laboratoriummethode om de luchtdoorlatendheid van bouwcomponenten/-elementen te bepalen via een drukgestuurde meting. De norm definieert de testopstelling, de drukprocedure, de verwerking van meetpunten via regressie tot lekparameters C en n, en de bepaling van onzekerheden op deze parameters.

5.4.1 Basisrelatie, correctie naar referentiecondities en spreiding tussen de meetpunten

Aan de hand van de stromingsvergelijking (zie 5.1, p.13) laat de norm toe om C en n afzonderlijk te bepalen voor positieve en negatieve drukrichtingen.

Wanneer omgevingscondities (atmosferische druk, temperatuur en relatieve vochtigheid) buiten het gespecificeerde bereik vallen, wordt het gemeten debiet gecorrigeerd naar referentiecondities conform de norm.

De logaritmische spreiding tussen de meetpunten gebeurt eveneens volgens de formulering in EN 12114, in tegenstelling tot EN 1026, die vaste drukstappen oplegt.

5.4.2 Bepaling van C en n via regressie

Door logatimering van de machtwet wordt een lineair regressiemodel bekomen:

$$\ln(Q) = \ln(C) + n \cdot \ln(\Delta p)$$

Met: $x = \ln(\Delta p)$, $y = \ln(Q)$ en $a = \ln(C)$ wordt dit:

$$y = a + nx$$

De regressieparameters worden dan bepaald als:

$$n = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

$$a = \bar{y} - n\bar{x}$$

$$C = e^a$$

Die ontstaan vanuit:

$$\bar{x} = (1/N) \cdot \sum x_i \text{ en } \bar{y} = (1/N) \cdot \sum y_i$$

$$s_x^2 = \sum (x_i - \bar{x})^2 / (N-1) \text{ en } s_y^2 = \sum (y_i - \bar{y})^2 / (N-1)$$

$$s_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / (N-1)$$

5.4.1 Onzekerheden en foutmarges op regressieparameters

EN 12114 voorziet expliciet in een statistische foutanalyse van de regressieparameters. De residuele variantie van de regressie wordt bepaald als:

$$\sigma_n = (1/s_x) \cdot \sqrt{[(s_y^2 - n \cdot s_{xy}) / (N-2)]}$$

$$\sigma_a = \sigma_n \cdot \sqrt{[\sum x_i^2 / N]}$$

Hieruit volgen de standaardafwijkingen:

$$I_n = \sigma_n \cdot t(P, N-2) \text{ en } I_a = \sigma_a \cdot t(P, N-2)$$

De betrouwbaarheidsintervallen worden bepaald met de Student-t-verdeling (met N-2 vrijheidsgraden):

$$n \in [n - I_n, n + I_n] \text{ en } a \in [a - I_a, a + I_a] \text{ (met waarschijnlijkheid P)}$$

5.4.2 Bronnen van meetonzekerheid

EN 12114 identificeert meerdere bronnen van meetonzekerheid, waaronder:

- nauwkeurigheid van debiet- en druksensoren;
- stabiliteit van het opgelegde drukverschil;
- herhaalbaarheid van de afdichting en montage;
- spreiding van meetpunten binnen de drukreeks.

Door het gebruik van regressie over meerdere drukpunten en door expliciete foutanalyse op C en n, wordt de invloed van individuele meetfouten beperkt en wordt een robuuste beschrijving van het luchtlekgedrag bekomen.

5.5 Meetapparatuur en meetnauwkeurigheid volgens de normen

De normen die in dit hoofdstuk worden besproken veronderstellen het gebruik van meetapparatuur die in staat is om een gecontroleerd drukverschil op te leggen en het resulterende volumetrisch luchtdebiet betrouwbaar te registreren. Hoewel de normen geen merkspecifieke of toestelspecifieke vereisten opleggen, formuleren zij wel functionele eisen met betrekking tot meetgrootheden, nauwkeurigheid en stabiliteit.

Zowel EN 1026 als EN 12114 vereisen dat het drukverschil over het testelement actief kan worden geregeld en gemeten met voldoende resolutie. De meetapparatuur moet toelaten om voor elk drukniveau een quasi-stationaire toestand te bereiken, aangezien de verdere verwerking van de meetresultaten (herleiding, regressie en foutanalyse) veronderstelt dat de gemeten waarden representatief zijn voor het opgelegde drukverschil.

Voor de meting van het luchtdebiet vereisen de normen dat het gebruikte meetsysteem gekalibreerd is en dat het debiet wordt gemeten binnen het gespecificeerde nauwkeurigheidsbereik van het toestel. EN 1026 legt hierbij een maximale meetonzekerheid op voor het gerapporteerde luchtdebiet, terwijl EN 12114 expliciet rekening houdt met meetonzekerheden in de statistische verwerking van de meetgegevens.

Daarnaast vereisen de normen dat relevante omgevingsparameters worden gemeten of gecontroleerd, met name: luchttemperatuur, atmosferische druk, en relatieve vochtigheid.

Deze parameters zijn noodzakelijk voor de correctie van het gemeten luchtdebiet naar referentiecondities. De normen gaan ervan uit dat de onzekerheid die voortvloeit uit deze correcties beperkt is ten opzichte van andere foutbronnen, maar vereisen wel dat de onderliggende meetgegevens beschikbaar zijn.

6. Probleemstelling

De literatuurstudie toont aan dat de energetische renovatie van historisch schrijnwerk zich in een complex spanningsveld bevindt. Enerzijds dwingt de regelgeving (zie hoofdstuk 2. p.3) tot een drastische reductie van infiltratieverliezen om aan de EPB-eisen te voldoen. Anderzijds vereist de erfgoedzorg (zie hoofdstuk 2. p.3) dat ingrepen reversibel zijn en het authentieke materiaal respecteren, wat standaardoplossingen zoals integrale vervanging vaak uitsluit.

De analyse van het 19e-eeuwse venster (zie hoofdstuk 3. p.7) identificeert de aansluiting tussen vleugel en kader als het meest kritieke lepad. Hoewel er diverse restauratietechnieken beschikbaar zijn – variërend van ingefreesde dichtingen tot het toevoegen van aanslaglatten (zie hoofdstuk 4. p.9) – ontbreekt het aan vergelijkende kwantitatieve data die de effectiviteit van deze specifieke erfgoedinterventies objectief positioneert ten opzichte van moderne reproducties. Bovendien blijkt uit de bespreking van de meetmethodieken (zie hoofdstuk 5. p.13) dat in-situ metingen vaak vertroebeld worden door randinvloeden, zoals lekken in de bouwknop, waardoor de zuivere prestatie van de restauratietechniek moeilijk te isoleren is.

Om deze leemte te vullen, is een gecontroleerd experimenteel onderzoek noodzakelijk. De volgende hoofdstukken beschrijven de methodologie en de resultaten van dit onderzoek, waarbij de besproken meetnormen worden gehanteerd als referentiekader, zonder te streven naar formele normconformiteit. Naast in-situ-metingen wordt daarbij gebruikgemaakt van een gecontroleerde, maar niet-genormeerde atelieropstelling. Deze opstelling laat toe om randinvloeden te reduceren en specifieke restauratie-ingrepen op componentniveau systematisch te analyseren, zonder dat de resultaten als productclassificatie of conformiteitsbeoordeling worden geïnterpreteerd. Hierbij wordt onderzocht in welke mate reversibele aanpassingen de luchtdichtheid van historisch schrijnwerk relatief kunnen verbeteren en positioneren ten opzichte van hedendaagse comfort- en energieverwachtingen.

7. Experimenteel onderzoek

7.1 Inleiding en onderzoeksvragen

In de voorgaande hoofdstukken werd de luchtdichtheidsproblematiek van historisch buitenschrijnwerk gesitueerd binnen het spanningsveld tussen erfgoedbehoud en energetische prestatie. Daarbij werd duidelijk dat deze component zich bevindt op het kruispunt van bouwfysica, regelgeving en erfgoedzorg, terwijl bestaande kaders slechts beperkt houvast bieden voor onderbouwde renovatiebeslissingen.

Bestaand onderzoek focust hoofdzakelijk op gebouwglobale indicatoren of theoretische benaderingen, waardoor empirische meetdata over concrete restauratie-ingrepen schaars blijven. In het bijzonder ontbreekt een systematische evaluatie van *gangbare* restauratiepraktijken zoals deze vandaag in de praktijk worden toegepast.

Deze lacune vormde de aanleiding voor het voorliggende experimentele onderzoek. Aan de hand van een zorgvuldig geselecteerde case study wordt de luchtdoorlatendheid van historisch buitenschrijnwerk onderzocht en worden de *relatieve* effecten van verschillende restauratie- en afdichtingsstrategieën met elkaar vergeleken. De focus ligt daarbij niet op normatieve beoordeling, maar op het inzichtelijk maken van prestatieverschillen binnen een erfgoedcontext.

Het onderzoek combineert de analyse van minimale, erfgoedconforme ingrepen met het verkennen van bijkomende afdichtingsstrategieën in een gecontroleerde experimentele context. De bekomen resultaten worden gepositioneerd ten opzichte van een hedendaags, erfgoedconform reproductiemodel, opgevat als referentiepunt. Daarnaast wordt expliciet aandacht besteed aan de invloed van meetcontext en testopstelling, door verschillen tussen in-situ- en ateliermetingen en de gekozen afdichtingsmethode systematisch mee te nemen in de analyse.

Het onderzoek werd gestuurd door de volgende centrale onderzoeksvragen:

- In welke mate leidt een minimale, *erfgoedconforme restauratieve ingreep* tot een meetbare wijziging in de luchtdoorlatendheid van historisch buitenschrijnwerk?
- Welke relatieve invloed hebben het aantal, de positionering en het type *rubberen dichtingen* op het gemeten luchtlekgedrag van een historisch raamcomponent?
- Hoe positioneren de gemeten prestaties van gerestaureerd historisch schrijnwerk zich ten opzichte van die van een erfgoedconform *reproductiemodel* binnen een vergelijkend kader?
- Welke systematische verschillen treden op tussen luchtdichtheidsmetingen uitgevoerd *in situ* en metingen uitgevoerd in een *atelieromgeving*, en hoe beïnvloeden deze verschillen de interpretatie van de resultaten?
- In welke mate beïnvloedt de gekozen *afdichtingsmethode* van de testopstelling het gemeten luchtlekdebiet en de reproduceerbaarheid van de metingen?

7.2 Case-selectie

Het onderzoek werd uitgevoerd binnen het kader van het *HeriTACE-project*, dat de aandacht vestigt op het structurele tekort aan onderbouwde kennis over de energetische performantie van historische bouwcomponenten. In het bijzonder wordt binnen dit project gewezen op de beperkte beschikbaarheid van gevalideerde meetdata omtrent buitenschrijnwerk en op de nood aan componentgerichte analyses die verder gaan dan gebouwglobale benaderingen.

Tegen deze achtergrond werd het buitenschrijnwerk van de voormalige *Materniteit op de Bijlokesite* geselecteerd als case study, waar bouwfirma *Denys* de restauratieve ingrepen uitvoert. Deze keuze werd ingegeven door de aanwezigheid van een groot aantal onderling identieke ramen, vervaardigd volgens 19de-eeuwse bouwtechnieken en materialen. De repetitiviteit van het raamtype bood de mogelijkheid om variaties in restauratie- en afdichtingsstrategieën systematisch te onderzoeken binnen een consistent historisch raamconcept.

De onderzochte ramen vertonen karakteristieke eigenschappen van historisch schrijnwerk, waaronder slanke houten profielen, traditionele houtverbindingen, enkelvoudige beglazing met stopverf en een uitgesproken beperkte initiële luchtdichtheid. Deze combinatie maakte het schrijnwerk bijzonder geschikt als onderzoeksobject voor het analyseren van luchtdichtheidsverbeteringen op componentniveau.

Het schrijnwerk maakt deel uit van een beschermd erfgoedensemble, waardoor duidelijke erfgoedkundige randvoorwaarden van toepassing waren. De oorspronkelijke raamgeometrie, profilering, bedieningsprincipes en het visuele karakter dienden behouden te blijven. Ingrepen met een zichtbare impact op het buitenschrijnwerk werden daardoor in principe uitgesloten van toepassing in situ en enkel in experimentele context onderzocht. Binnen deze randvoorwaarden werd prioriteit gegeven aan minimale en reversibele ingrepen.

De combinatie van een representatieve historische case, een uitgesproken erfgoedcontext en de inbedding binnen het *HeriTACE-project* maakte deze case study bijzonder geschikt om de spanningsrelatie tussen erfgoedbehoud en energetische optimalisatie op raamcomponentniveau te onderzoeken.

7.3 Onderzoekopzet en experimentele strategie

De onderzoeksstrategie is opgevat als een componentgericht en vergelijkend experiment. Naast de invloed van ingrepen op luchtdoorlatendheid wordt ook de meetgevoeligheid voor uitvoeringscontext (in situ versus atelier) en meetopstelling (folie versus plaatmateriaal) expliciet meegenomen. Het programma is stapsgewijs: het oorspronkelijke schrijnwerk vormt het uitgangspunt; opeenvolgende ingrepen worden doelgericht toegepast om (i) relatieve verbeteringen te kwantificeren en (ii) resterende beperkingen bloot te leggen.

7.3.1 Naamgeving en sequentie van testelementen

Omwille van praktische overwegingen, bestond de mogelijkheid niet om elk (sub-)type van de restauratiemodellen zowel in situ als in het atelier te meten. Sommige objecten konden enkel in situ worden gemeten, andere konden enkel in het atelier worden gemeten. Daaruit volgt dat de naamgeving werkt als volgt:

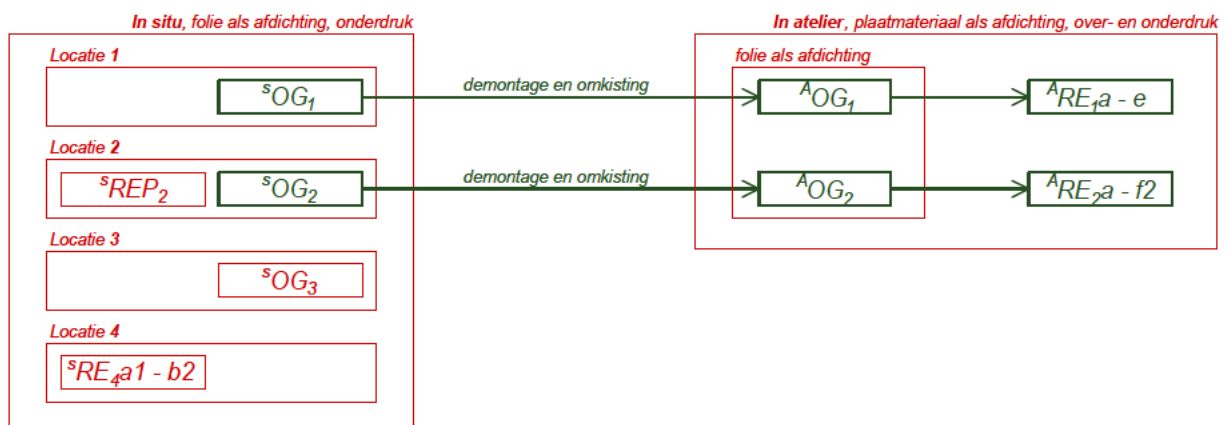
$$Omgeving_{Status_{Locatie}} + Letter + Nummer$$

Status geeft de aard van het schrijnwerk weer: Oorspronkelijk schrijnwerk (*OG*), gerestaureerd schrijnwerk (*RE*) of gereproduceerd schrijnwerk (*REP*).

Omgeving beschrijft de testomgeving, het type testopstelling en de gebruikte belastingsrichtingen: in situ met onderdrukbelasting (*S*) en in het atelier met zowel over- als onderdrukbelasting (*A*).

Locatie is index die verwijst naar de betreffende raamopening in het Materniteitsgebouw. Schrijnwerk werd getest in, of is oorspronkelijk afkomstig van de locatie gekoppeld aan het nummer van die index.

De *letter* en het *nummer* zijn varianten en sub-verwijzingen die respectievelijk wijzigingen van parameters en de afstelling of sub-wijzigingen daarvan definiëren.



Figuur 1: grafische weergave onderzoeksobjecten

Bovenstaande figuur weergeeft grafisch de verschillende modellen, de belastingsregimes, afdichtingsmethodiek en de omgeving waarin de meting werd uitgevoerd.

7.3.2 Onderzoeksubjecten en restauratiestrategieën

7.3.2.2 Oorspronkelijk schrijnwerk

OG-configuraties dienen als referentie voor het initiële luchtlekgedrag. De ramen bevinden zich in bestaande toestand, zonder rubberen dichtingen of expliciete luchtdichtheidsmaatregelen.

De raamvleugels vertoonden initieel vervormingen tot ca. 10 mm, die in latere fasen werden gereduceerd tot doorgaans < 5 mm. Lokale houtschade was beperkt en niet constructief. Variaties in sluitingsmechanismen, verflagen en tolerantieopbouw resulteren in een discontinu contactvlak tussen vleugel en kader, dat bepalend is voor het luchtlekgedrag.

7.3.2.3 Minimaal gerestaureerd schrijnwerk

${}^A RE_1$ en ${}^S RE_{3a}$ vertegenwoordigen gangbare, erfgoedconforme restauratiepraktijken waarbij één aanvullende rubberen dichting wordt aangebracht, zonder wijziging van raamconcept of bedieningsprincipe.

- ${}^A RE_1$ en ${}^S RE_{3a}$: enkelvoudige dichting tussen vleugel en kader
 - lokaal opschonen en frezen voor correcte werking (rechttrekken)
 - in atelier: stapsgewijze afstelling (${}^A RE_{1a}$, ${}^A RE_{1b}$, ...)
 - in situ: geen afdichting ter hoogte van wolfbekken
- ${}^S RE_{3b}$: ${}^S RE_{3a}$ gecombineerd met een achterzetraam
 - achterzetraam losgekoppeld van het oorspronkelijke schrijnwerk
 - luchtdichtheid van het achterzetraam zelf valt buiten scope

7.3.2.4 Experimentele restauratie

De ${}^A RE_2$ -configuraties zijn opgevat als een analytische verdieping van de minimale restauratiestrategieën ${}^A RE_1$ en ${}^S RE_{3a}$. Op basis van de in deze fases vastgestelde beperkingen wordt binnen ${}^A RE_2$ onderzocht in welke mate bijkomende, gecontroleerde afdichtingsmaatregelen deze beperkingen kunnen reduceren of elimineren. Variatie werd geïntroduceerd via:

- aantal en positionering van dichtingen (binnen, midden, buiten),
- type rubberprofiel,
- additieve elementen zoals opdeklatten/aanslaglatten.

In tegenstelling tot ${}^S RE_{3a}$ werden binnen ${}^A RE_2$ ook dichtingen aangebracht ter hoogte van wolfbekken, aangezien de ateliercontext gecontroleerde uitvoering toeliet.

7.3.2.5 Reproductiemodel

Het reproductiemodel (${}^S REP_2$) betreft een nieuw vervaardigd houten raam, ontworpen als erfgoedconforme reproductie van het historische raamtype. In tegenstelling tot het oorspronkelijke schrijnwerk wordt gewerkt met gecontroleerde toleranties, doorlopende rubberdichtingen en een profieldikte die dubbele beglazing toelaat. Het

model fungeert als referentiepunt voor de maximaal haalbare luchtdichtheid binnen een erfgoedconform ontwerp.

7.3.3 Afbakening en gecontroleerde variabelen

Om de vergelijkbaarheid van de meetresultaten te waarborgen, werd een duidelijke afbakening gemaakt tussen constante en variabele parameters. De volgende parameters werden doorheen het onderzoek constant gehouden:

- raamtypologie, -aansluiting en geometrie,
- materiaalgebruik van kader en vleugels,
- type beglazing (behoudens bij sREP_2),
- sluitingsmechanismen,
- globale afmetingen van het raam.

Binnen deze afbakening werden de volgende parameters doelgericht gevarieerd:

- het aantal en het type rubberen dichtingen;
- de positionering van deze dichtingen (binnenzijde, midden, buitenzijde);
- de testcontext (in situ versus atelier);
- de afdichtingsmethode van de testopstelling (folie of plaatmateriaal);
- de richting van het drukverschil.

Deze gecontroleerde variatie maakte het mogelijk om de invloed van afzonderlijke ingrepen op de luchtdichtheid systematisch te analyseren. Variaties in gebouwschil, gebruikscondities en globale luchtdichtheid vallen buiten de scope van dit onderzoek.

7.3.4 Drukrichting en mechanisch effect op het schrijnwerk

In dit onderzoek wordt bewust afgeweken van de klassieke terminologie van *onderdruk* en *overdruk* om de testcondities te beschrijven. Aangezien de positie van de testopstelling verschilt tussen in situ-metingen (opstelling aan de binnenzijde van het raam) en ateliermetingen (opstelling aan de buitenzijde), leidt eenzelfde drukconfiguratie niet noodzakelijk tot een identiek mechanisch effect op de raamvleugel en de rubberen dichtingen.

Voor de luchtdoorlatendheid van schrijnwerk is niet het teken van het drukverschil ten opzichte van de omgeving bepalend, maar de richting van de resulterende kracht op de raamvleugel en de daaruit voortvloeiende contactdruk ter hoogte van de dichtingen. Dit principe wordt ook beschreven in vroeg experimenteel onderzoek naar raamcomponenten, waarin wordt aangetoond dat luchtlekken sterk afhankelijk zijn van de belastingsrichting van het raam ten opzichte van zijn sluitvlak, eerder dan van de absolute drukconfiguratie zelf (Becker, 1979).

Om testresultaten uit verschillende opstellingen op een consistente manier te kunnen interpreteren, worden in dit onderzoek daarom twee functionele belastingsrichtingen onderscheiden:

- **DI (dichtzuigen):** de raamvleugel wordt in sluitrichting belast, waardoor de rubberen dichtingen worden samengedrukt en de contactdruk toeneemt;

- **OP (openduwen):** de raamvleugel wordt uit sluitrichting belast, waardoor de contactdruk op de dichtingen afneemt.

	Opstelling	Ventilator	Effect op raam	Naam
In situ	binnen	onderdruk	Naar buiten gezogen (open)	OP
In situ	binnen	overdruk	Naar binnen gedrukt (dicht)	DI
Atelier	buiten	onderdruk	Naar binnen gezogen (dicht)	DI
Atelier	buiten	overdruk	Naar buiten gedrukt (open)	OP

Deze terminologie focust op het mechanische effect dat bepalend is voor de luchtdoorlatendheid van het schrijnwerk. Hierdoor kunnen meetresultaten die onder verschillende drukconfiguraties zijn verkregen, maar een identiek mechanisch effect op de dichtingen veroorzaken, op een betekenisvolle manier met elkaar worden vergeleken.

7.3.5 Toepassing van het normatieve meetkader en vergelijkingsstrategie

De experimentele meetmethodiek in dit onderzoek is gebaseerd op bestaande normering voor luchtdichtheidsmetingen, zonder te streven naar formele normconformiteit. De normen worden gehanteerd als technisch en methodologisch referentiekader, waarbij hun toepassingsgebied bewust wordt afgebakend in functie van het onderzoeksdoel.

Het meetprincipe voor de bepaling van de luchtdoorlatendheid van raamcomponenten sluit inhoudelijk aan bij EN 1026, die het opleggen van een gecontroleerd drukverschil en de registratie van het resulterende volumetrisch luchtdebiet beschrijft. Deze norm wordt gebruikt als referentie voor de meetlogica en de interpretatie van druk-debietrelaties, zowel voor in-situ-metingen als voor metingen in ateliercontext. De toegepaste meetopstellingen wijken echter af van een genormeerde productbeproeving, waardoor de resultaten niet kunnen worden geïnterpreteerd als normconforme producttesten of gebruikt voor formele classificatie.

Voor de verwerking van de meetgegevens wordt de methode uit EN 12114 toegepast. Het gemeten luchtdebiet wordt hierbij gemodelleerd volgens de stromingsvegelijking waarbij de parameters C (lekcoëfficiënt) en n (stromingsexponent) via regressieanalyse worden bepaald op basis van meerdere drukniveaus. Deze benadering laat toe om het stromingsgedrag van het raamcomponent expliciet te karakteriseren en is beter geschikt voor het analyseren van incrementele restauratie-ingrepen dan herleiding met een vaste exponent. De regressieanalyse maakt het bovendien mogelijk om betrouwbaarheidsintervallen en foutmarges op de parameters C en n te bepalen.

Hoewel de bepaling van foutmarges en betrouwbaarheidsintervallen essentieel is voor een correcte en normconforme verwerking van de meetgegevens, is hun invloed op de globale interpretatie van de resultaten in dit onderzoek beperkt. De analyse richt zich voornamelijk op relatieve prestatieverschillen tussen configuraties in eenzelfde testopstelling. De foutanalyse fungeert daarom in hoofdzaak als kwaliteitscontrole van de meetreeksen en ter onderbouwing van waargenomen trends, eerder dan als beoordelingsinstrument voor grensgevallen.

De norm EN 12207 wordt in dit onderzoek uitsluitend gebruikt als contextueel referentiekader. De in deze norm gedefinieerde luchtdichtheidsklassen worden aangewend om de orde van grootte van de gemeten luchtdoorlatendheid te positioneren ten opzichte van gangbare productprestaties. Deze vergelijking gebeurt expliciet los van normatieve toetsing.

Samenvattend worden de normen in dit onderzoek complementair ingezet: EN 1026 als referentie voor het meetprincipe, EN 12114 voor dataverwerking, regressie en foutanalyse, en EN 12207 voor contextuele duiding van prestaties. Deze aanpak laat toe om gecontroleerde en vergelijkende metingen uit te voeren op historisch schrijnwerk, zonder normconformiteit te claimen.

7.3.6 Onderzoeksstructuur en vergelijkbaarheid

Het experimentele onderzoek is opgevat als een lineaire testsequentie, waarbij opeenvolgende configuraties op hetzelfde raamobject worden gemeten. Deze aanpak maakt het mogelijk om elk raam te beschouwen als zijn eigen referentie, waardoor variaties in geometrie, materiaalgebruik en beslag geen invloed hebben op de vergelijking van resultaten.

Vergelijkingen tussen configuraties worden uitsluitend uitgevoerd binnen identieke meetcontexten en belastingsrichtingen. Metingen uitgevoerd in situ worden enkel vergeleken met andere in-situ-metingen, en ateliermetingen enkel met ateliermetingen. Absolute meetwaarden uit verschillende contexten worden niet rechtstreeks met elkaar vergeleken. De analyse focust op relatieve verschillen tussen configuraties onder gelijkwaardige randvoorwaarden.

Door deze onderzoeksstructuur kunnen prestatieverschillen eenduidig worden toegeschreven aan de uitgevoerde restauratie-ingreep of afdichtingsstrategie. De gekozen opzet laat toe om zowel incrementele verbeteringen als verzadigingseffecten te identificeren, zonder dat interpretatie wordt vertroebeld door externe randinvloeden.

7.4 Testopstellingen

De luchtdichtheid van raamcomponenten werd gemeten via afzonderlijke, lokaal afgeschermd testopstellingen, losgekoppeld van de globale gebouwschil. Dit liet toe het luchtlekgedrag van het raam zelf te isoleren en rechtstreeks te relateren aan de onderzochte ingrepen.

Afhankelijk van de testcontext werden twee hoofdopstellingen toegepast: in situ en in het atelier. Beide opstellingen volgden dezelfde meetlogica en druksequenties, maar verschilden in uitvoeringswijze en randvoorwaarden. Hoewel de atelieropstelling meer gecontroleerd is dan de in-situ-opstelling, betreft het geen genormeerde testopstelling en worden de resultaten niet geïnterpreteerd als normconform.

7.4.1 Testopstelling in situ

De in-situ-metingen werden uitgevoerd op ramen die zich in hun oorspronkelijke inbouwsituatie bevonden, verankerd in de gevels van het gebouw. De testopstelling werd zodanig uitgewerkt dat het raamcomponent luchtdicht werd afgeschermd ten opzichte van de omliggende constructie, *zonder permanente ingrepen* aan schrijnwerk of erfgoedwaardige afwerkingen.



Figuur 2: Testopstelling (in situ)



Figuur 3: Meettoestel (in situ)



Figuur 4: Aansluiting op mal (in situ)

De afscherming werd gerealiseerd met behulp van luchtdichte folie en tape, aangebracht op de omliggende muurvlakken rondom het raam. De folie werd bewust op de muur en niet op het raamkader aangebracht. Deze beslissing werd genomen om beschadiging van het schrijnwerk te vermijden, aangezien de tape een zeer hoge hechtingsgraad vertoonde. Ook kan de aanwezigheid van uitstekende elementen (ornamenten, scharnieren, sluitingsmechanisme) leiden tot het scheuren van de folie wanneer deze rechtstreeks tegen het raamkader wordt bevestigd.



Figuur 5: dichting van de naden



Figuur 6: dichtgeplakte aansluiting muur

Voorafgaand aan het aanbrengen van de folie werden alle zichtbare openingen en discontinuïteiten tussen raamkader, muur en vensterbank gecontroleerd en tijdelijk afgedicht met tape, kit of polyurethaanschuim. Ook de toestand van glas en stopverf werd gecontroleerd, aangezien deze geen deel uitmaakten van het onderzoek.



Figuur 7: losgetrokken tape (drukverschil te groot)



Figuur 8: zwakke tape

De positionering van de folie bepaalde rechtstreeks de haalbare drukrichting. Binnen de in-situ-opstelling werd uitsluitend gemeten onder OP-belasting waarbij het raam weg van zijn aanslag werd gezogen. Metingen onder DI-belasting bleken in deze context niet haalbaar, aangezien de folie bij omgekeerde drukrichting loskwam van de muur en de luchtdichte afdichting niet kon worden gegarandeerd.

7.4.2 Testopstelling in het atelier

De atelieropstelling bestond uit een niet-genormeerde, maar gecontroleerde omkasting rond het raamcomponent, opgebouwd uit betonplex plaatmateriaal. Afhankelijk van de testconfiguratie

werd de achterzijde van de opstelling afgesloten met luchtdichte folie of met rigide plaatmateriaal. Het raam werd mechanisch bevestigd in een houten frame en rondom afgedicht met elastische kit (*Soudal Soudaseal*) en luchtdichte tape (*Pro Clima Tescon Vana* en aluminiumtape). Alle naden tussen plaatmateriaal, frame en raamkader werden systematisch afgedicht. De aansluiting tussen testkast en raam werd bewust volledig luchtdicht uitgevoerd, zodat uitsluitend de functionele voeg tussen vleugel en kader werd gemeten.



Figuur 9: plaatopstelling (atelier)



Figuur 10: folieopstelling (atelier)



Figuur 11: folie-aansluiting (atelier)

De gecontroleerde ateliercontext liet toe om metingen uit te voeren onder zowel DI- als OP-belasting, zonder beperkingen opgelegd door de afdichting van de testopstelling. Daarnaast konden opeenvolgende restauratieve ingrepen op hetzelfde raamobject worden uitgevoerd en onmiddellijk worden geëvalueerd, wat essentieel was voor de lineaire testsequentie.

7.4.3 Meetapparatuur en normatief kader

Voor alle metingen werd gebruikgemaakt van de *Lindab Leakage Tester LT 600*, waarmee drukgestuurde meetsequenties konden worden uitgevoerd en het bijhorende drukverschil en volumetrisch luchtdebiet per meetstap werden geregistreerd. De meetdata werden digitaal opgeslagen en geëxporteerd voor verdere verwerking en analyse.

De koppeling tussen de meetapparatuur en de testopstelling werd afhankelijk van de meetcontext op twee manieren gerealiseerd. In configuraties met een folieafsluiting werd een opening in de folie voorzien waarin een koppelstuk luchtdicht werd bevestigd. In andere gevallen werd gebruikgemaakt van een speciaal ontworpen hulpstuk, dat toeliet om het gewicht van de meetbuis mechanisch te ontlasten en scheurvorming of lokale vervorming van de folie ter hoogte van de aansluiting te vermijden. Op die manier werd een stabiele en reproduceerbare meetaansluiting gerealiseerd.

Voor de afdichting van de drukmeetleiding werd gebruikgemaakt van *Terostat-IX*, een niet-uithardende, plastische afdichtingspasta. Dit materiaal liet toe om luchtdichte maar reversibele aansluitingen te realiseren, zonder spanningen op de folie te introduceren. Lekverliezen ter hoogte van de meetaansluitingen konden hierdoor betrouwbaar worden uitgesloten.

Er werd geen afzonderlijke tarra-meting uitgevoerd om de luchtdoorlatendheid van de lege testkast te kwantificeren. Gezien het vergelijkende karakter van het onderzoek en de consequente toepassing van identieke afdichtingsmethoden voor alle configuraties, wordt verondersteld dat eventuele restlekken van de testopstelling constant blijven en geen invloed hebben op de relatieve vergelijking tussen testconfiguraties. De meetresultaten worden daarom niet geïnterpreteerd als absolute luchtdichtheidswaarden, maar uitsluitend als relatieve prestatieverschillen.



Figuur 12: meettoestel



Figuur 13: manuele bevestiging



Figuur 14: unieke mal

De gebruikte meetapparatuur heeft een nauwkeurigheid van $\pm 0,5$ Pa voor drukmetingen en $\pm 2,5\%$ voor het gemeten luchtdebiet. Temperatuur, relatieve vochtigheid en atmosferische druk bevonden zich tijdens de metingen binnen de toepassingsvoorwaarden van EN 12114. Gezien de orde-van-grootteverschillen tussen de onderzochte configuraties worden de foutmarges hoofdzakelijk beschouwd als kwaliteitscontrole van de meetreeksen en niet als bepalende factor voor de interpretatie van de resultaten.

De meetprocedure volgt in grote lijnen de principes uit EN 1026, maar werd aangepast aan de mechanische beperkingen van historisch schrijnwerk. De voorgeschreven vaste druktrappen konden niet steeds worden aangehouden, aangezien sommige ramen reeds bij lagere drukken vervormden of mechanisch ontlast werden. Daarom werd gewerkt met variabele druktrappen, waarbij telkens werd gemeten tot de maximaal haalbare druk voor de betreffende configuratie. Bij minder performante ramen lagen deze drukken typisch tussen 20 en 160 Pa, terwijl beter presterende configuraties tot 450 à 600 Pa konden worden belast.

Voorafgaand aan elke meetreeks werden drie drukstoten uitgevoerd met een drukniveau dat circa 10% hoger lag dan de maximale meetdruk, overeenkomstig het principe van voorbelasting uit EN 1026. Het in de norm vermelde minimum van 500 Pa voor deze drukstoten kon bij historisch schrijnwerk niet steeds worden gehaald en wordt beschouwd als een beperking van de meetopstelling.

7.5 Beschrijving van de onderzoeksobjecten

7.5.1 Origineel schrijnwerk

Het oorspronkelijke schrijnwerk (getest in situ: $^{SOG}_{1,2 \text{ en } 3}$ en in het atelier: $^{AOG}_1 \text{ en } 2$) werd opgenomen als referentieconfiguratie voor de initiële luchtdichtheid van het onderzochte raamtype. De ramen bevonden zich in hun bestaande toestand, zonder toevoeging van rubberen dichtingen of andere expliciet luchtdichtheidsverhogende maatregelen.



Figuur 15: AOG1(atelier)



Figuur 16: SOG1 (in situ)

Het schrijnwerk (ca. 1,50m bij 3,20m) is opgebouwd uit slanke houten kader- en vleugelprofielen, vervaardigd volgens 19de-eeuwse bouwtechnieken. De houtverbindingen zijn traditioneel uitgevoerd en vertonen geen moderne afdichtingsvoorzieningen. De raamvleugels zijn scharnierend bevestigd aan de binnenzijde van het kader, zonder enige voorziening voor herafstelling.

Binnen het onderzochte raamtype werd variatie vastgesteld in de sluitingsmechanismen. Naast klassieke espagnoletsluitingen komen ook gelijkaardige sluitingen voor die zijn verborgen onder een houten profiel. In meerdere gevallen werden ramen doorheen de gebruiksgeschiedenis bijkomend dichtgeschroefd om tocht te beperken of om vastzittende vleugels in gesloten positie te houden. Deze ingrepen zijn niet uniform uitgevoerd en resulteren in lokaal sterk uiteenlopende sluitcondities.

Opeenvolgende verflagen, vervuiling en vervorming van het hout beperken lokaal de bewegingsvrijheid van de vleugels en leiden tot een onregelmatige en plaatselijk verhoogde frictie bij openen en sluiten.



Figuur 17: scharnier

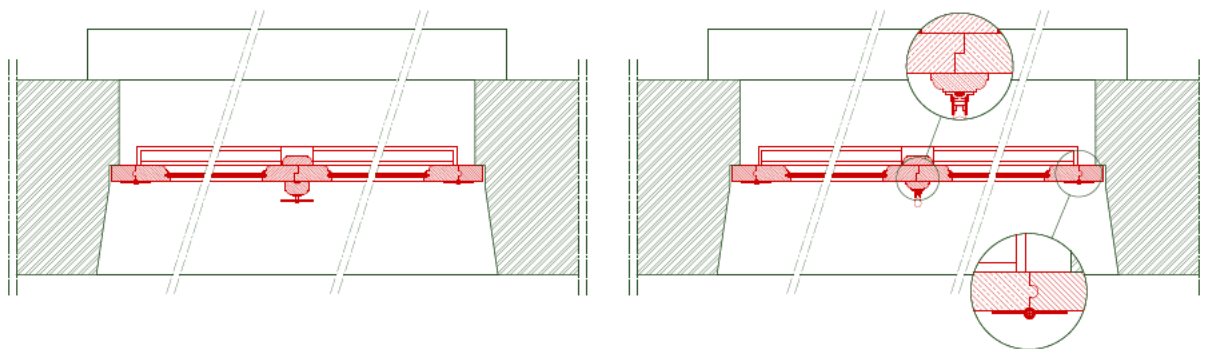


Figuur 18: espagnolet



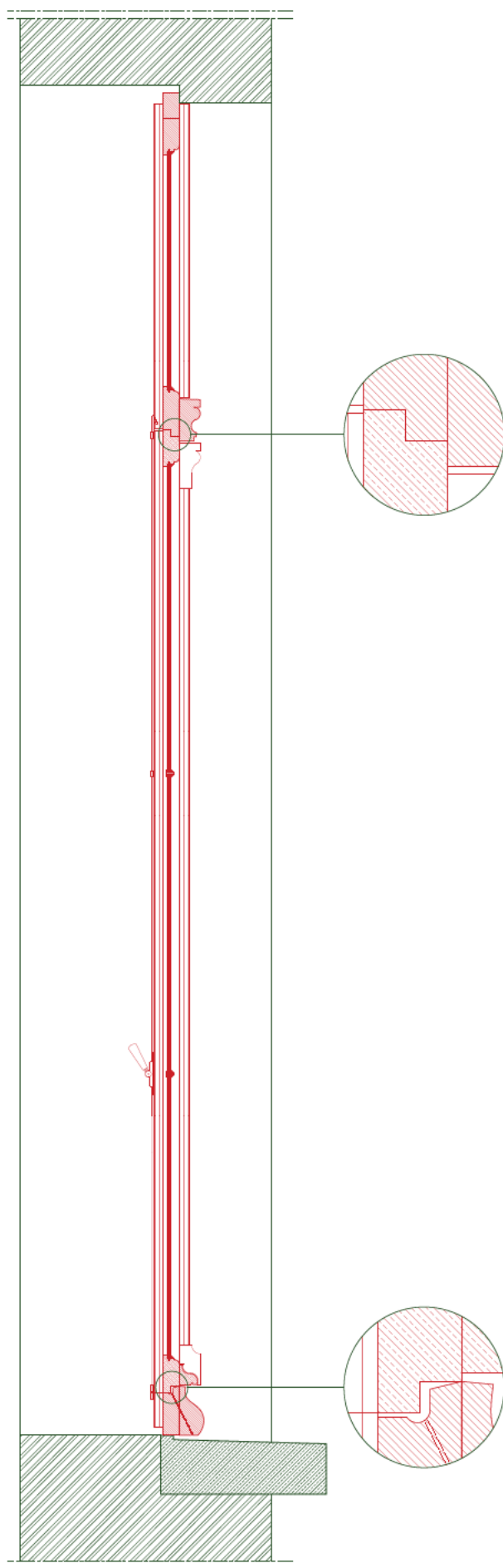
Figuur 19: profiel vleugel

De beglazing bestaat uit enkelvoudig getrokken glas, geplaatst met stopverf in de vleugelsponning. Deze werd vernieuwd want luchtlekken ter hoogte van de glasaansluiting maken geen deel uit van dit onderzoek.



Figuur 20: horizontale snede OG

Door de combinatie van slanke profilering, variabele sluitcondities, gebruiksslijtage en tolerantieopbouw ontstaat een discontinu contactvlak tussen raamvleugel en kader. Deze geometrische en mechanische onregelmatigheden bepalen het luchtlekgedrag van het oorspronkelijke schrijnwerk en vormen het uitgangspunt voor de vergelijking met de geresiteerde en gereproduceerde configuraties.



Figuur 21: verticale snede OG

7.5.2 Minimaal gerestaureerd schrijnwerk

Het minimaal gerestaureerde schrijnwerk ($^{ARE}_1$ en $^{SRE}_3$) wordt gedefinieerd als een restauratietoestand waarbij het oorspronkelijke raamconcept behouden blijft en slechts één aanvullende afdichtingsmaatregel wordt geïntroduceerd. Deze configuratie vertegenwoordigt een gangbare restauratiepraktijk van bouwfirma *Denys* waarin wordt gestreefd naar een beperkte verbetering van de luchtdichtheid, zonder ingrijpende wijzigingen aan raamgeometrie, profilering of bedieningsprincipes (conform de erfgoedvoorschriften).

Bij $^{SRE}_3$ werd onderscheid gemaakt tussen de basisconfiguratie ($^{SRE}_{3a}$) en een additieve configuratie waarbij een bijkomend element werd toegevoegd ($^{SRE}_{3b}$). $^{SRE}_{3a}$ vertegenwoordigt een volledig uitgevoerde restauratie van bouwfirma *Denys*, zonder externe input.

Het resultaat van die restauratie ($^{SRE}_{3a}$) werd geanalyseerd en de verschillende ingerepen werden stapsgewijs uitgevoerd op de $^{ARE}_1$ -sequentie ($^{ARE}_{1a-e}$), vertrekkend van $^{SOG}_1$. Op die manier werd het mogelijk om de invloeden van iedere fase te evalueren en de meest cruciale randvoorwaarden te onderscheiden.

7.5.2.1 Enkelvoudige dichting ($^{SRE}_{3a}$ en $^{ARE}_{1a-e}$)

De minimale restauratie omvat het toevoegen van één rubberen dichting in de aansluiting tussen raamvleugel en kader. Sluitingsmechanismen en scharnieren beglazing bleven ongewijzigd en functioneerden volgens het oorspronkelijke principe. Het glas daartegen, werd vervangen naar nieuw enkelvoudig getrokken glas.



Figuur 22: profiel linke ($^{SRE}_3$)



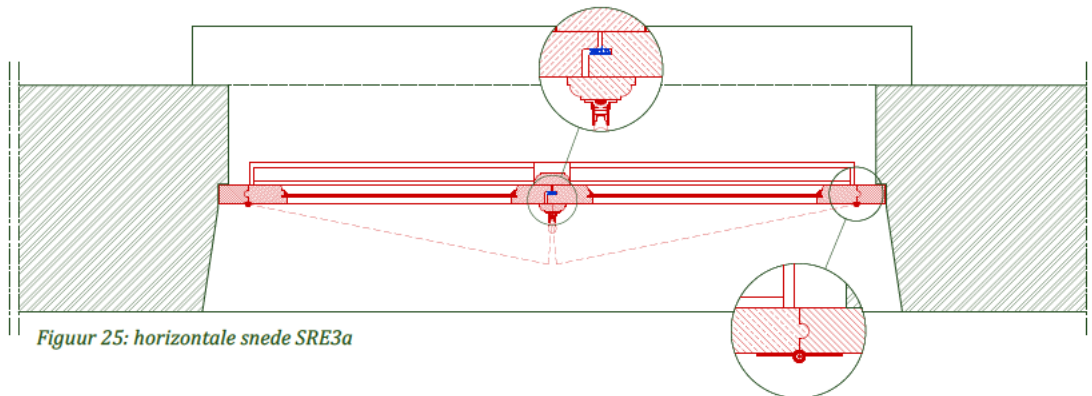
Figuur 23: profiel rechts ($^{SRE}_3$)



Figuur 24: wolfbek ($^{SRE}_3$)

De uitvoering van deze ingreep vereist significante voorbereiding van het bestaande schrijnwerk. De contactvlakken tussen raamvleugel en kader werden lokaal opgeschoond en genivelleerd om onregelmatigheden te reduceren. Indien nodig werd het kader terug 'recht rechtgetrokken' en werden de pen-in-gatverbindingen vervangen of hersteld. Bijkomend worden scheuren, spleten, en kieren opgevuld.

Waar nodig werd het hout plaatselijk gefreesd om voldoende speling te creëren voor de correcte plaatsing en werking van de rubberen dichting.



Voor de in-situ-uitvoeringen van SRE3a werd *geen rubberen dichting aangebracht ter hoogte van de bol- en holverbindingen (wolfbekken)*. Deze zones bleven, volgens Denys, bewust ongewijzigd om het risico op beschadiging van het schrijnwerk te beperken en om de ingreep erfgoedkundig minimaal te houden. In de ateliersequentie wordt deze wel toegevoegd.

7.5.2.2 Enkelvoudige dichting met achterzetraam

De configuratie SRE3b wordt gedefinieerd als een uitbreiding van de SRE3a -configuratie door toevoeging van een achterzetraam aan de binnenzijde. Het reeds gerestaureerde raam, inclusief de aangebrachte rubberen dichting, bleef ongewijzigd.



Figuur 26: scharnier SRE3b



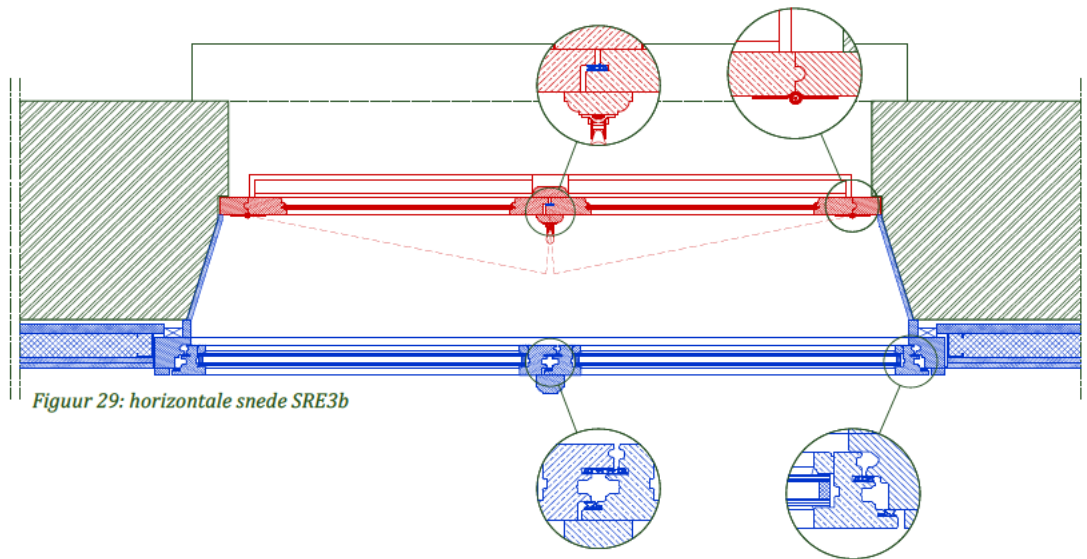
Figuur 27: profiel SRE3b



Figuur 28: profiel SRE3b

Het achterzetraam werd geplaatst aan de binnenzijde van het bestaande raamkader en functioneert als een secundaire schil. De aansluiting tussen achterzetraam en omliggende constructie werd uitgevoerd los van het oorspronkelijke schrijnwerk, zodat beide raamlagen als afzonderlijke componenten konden worden beschouwd. De

luchtdichtheid van het achterzetraam zelf maakt geen deel uit van het onderzochte raamcomponent en werd niet afzonderlijk gemodificeerd binnen het onderzoek.

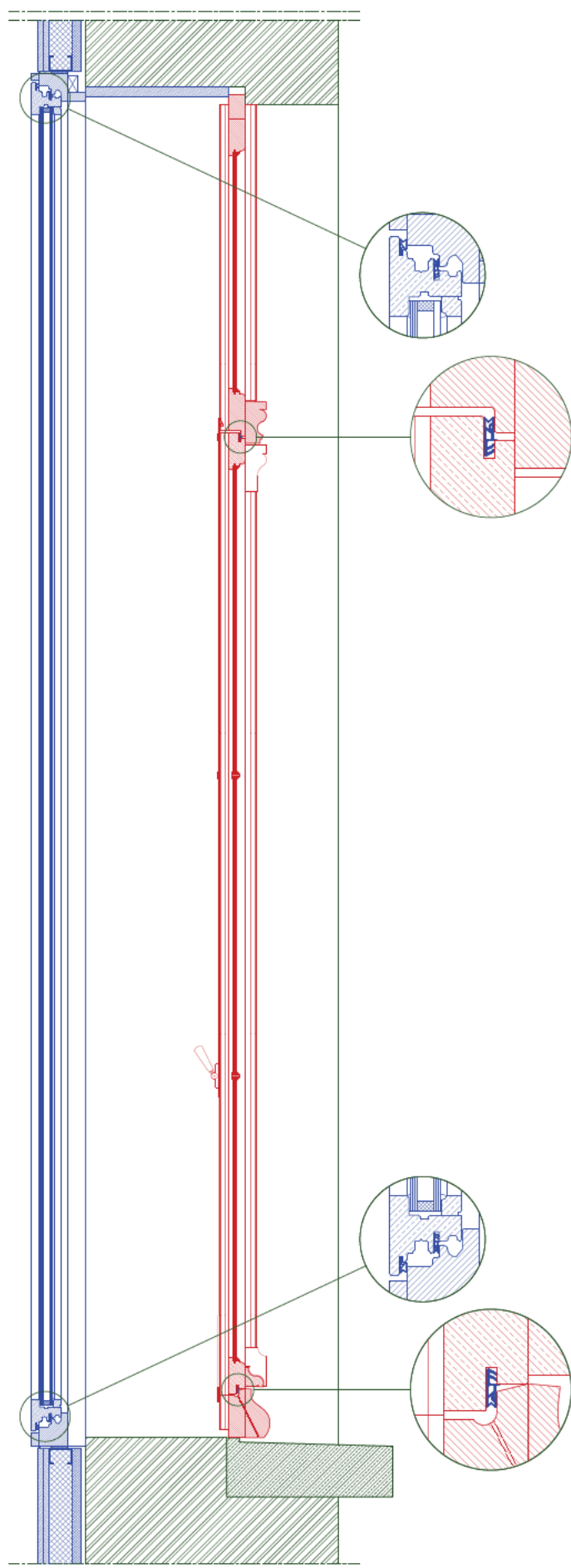


Figuur 29: horizontale snede SRE3b

7.5.2.3 De ${}^A RE_1$ -sequentie

Om de restauratiestappen grondig te kunnen analyseren wordt de erfgoedconforme restauratie in het atelier stapsgewijs uitgevoerd, na het meten van de initiële luchtlekken van ${}^A OG_1$. Deze stappen simuleren de handelingen die werden uitgevoerd bij de restauratie van ${}^S RE_{3a}$.

- ${}^A RE_{1a}$: de toevoeging van een enkelvoudige rubberen dichting (SPV12 en S0032, zie bijlagen),
- ${}^A RE_{1b}$: het afdichten van het bovenluik en andere niet bewegende verbindingen,
- ${}^A RE_{1c}$: het compenseren van scheefstand in de draaiende delen,
- ${}^A RE_{1d}$: controle optimalisatie van speling rubberprofiel (vullatjes), en
- ${}^A RE_{1e}$: het toepassen van een alternatief rubberprofiel (S5510 en S1320, zie bijlagen).



Figuur 30: verticale snede SRE3a en b

7.5.3 Meervoudige experimentele restauratie

De ARE_2 -configuraties vormen een ontwerpend-experimentele verdieping van de minimale, erfgoedconforme restauratiestrategieën (ARE_1a -e en sRE_3a). Waar zij primair worden ingezet om het effect en de beperkingen van gangbare restauratie-ingrepen te kwantificeren, vertrekt ARE_2 expliciet vanuit de in deze fases geïdentificeerde knelpunten en randvoorwaarden.

Binnen ARE_2 wordt onderzocht in welke mate deze bepalende factoren doelgericht kunnen worden *geëlimineerd* en hoe ver de luchtdichtheid van historisch schrijnwerk technisch kan worden *gemaximaliseerd*, vertrekkend van de bestaande raamgeometrie. De onderzochte ingrepen zijn daarbij niet per se afgeleid uit bestaande restauratierichtlijnen of normatieve literatuur, maar worden ontwerpmatig ontwikkeld als analytische interventies, afgestemd op de vastgestelde lekmechanismen.

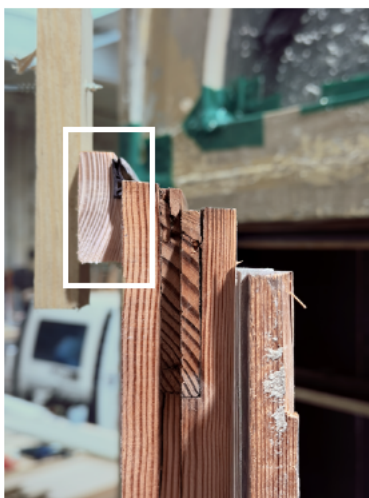
Het gebruik van *opdeklatten* en meervoudige afdichtingsniveaus binnen ARE_2 maakt alternatieve positioneringen van afdichtingen mogelijk en isoleert hun invloed op het luchtlekgedrag. Deze benadering bevindt zich bewust op de grens tussen experimenteel onderzoek en ontwerpmatig verkennen. De opdeklatten worden uitsluitend toegepast binnen een gecontroleerde ateliercontext, omdat ze in dit geval haaks staan op de erfgoedkundige voorschriften.

7.5.3.4 Enkelvoudige middenafdichting (ARE_2a)

Deze configuratie (ARE_2a) wordt gedefinieerd als de toevoeging van één rubberen dichting in de middenaansluiting tussen raamvleugel en kader. ARE_2a is gelijk aan het eindresultaat van de sRE_1 -sequentie die in het atelier getest werd (zie 7.5.2.1 *Enkelvoudige dichting*).

7.5.3.1 Enkelvoudige binnenafdichting (ARE_2b)

Om een enkelvoudige binnenafdichting (ARE_2b) te realiseren werd gebruik gemaakt van *opdeklatten*. De opdeklatten werden over de voeg tussen raamvleugel en kader geplaatst en voorzien van een uitsparing waarin de rubberen dichting werd gemonteerd. In gesloten toestand rust de dichting tegen het raamkader.

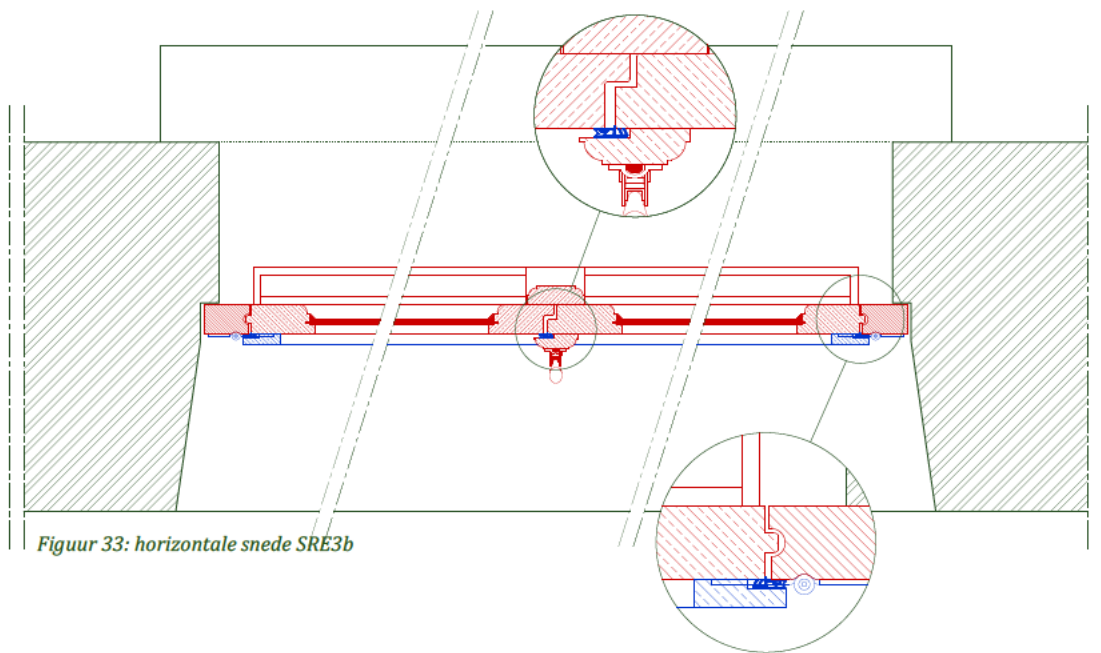


Figuur 31: profiel ARE2b



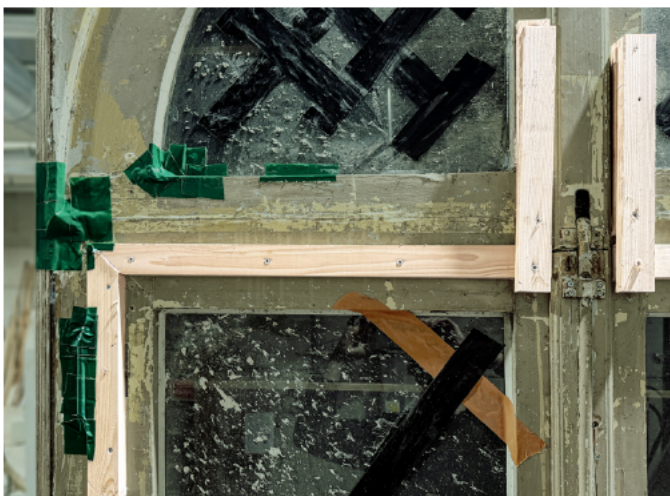
Figuur 32: aanzicht ARE2b

Het gebruik van opdekklatten verminderd risico op schade en is quasi-omkeerbaar. Daarnaast is het mogelijk om het raakvlak tussen de rubberen dichting en het schrijnwerk te inspecteren. Het schrijnwerk dat gerestaureerd werd voor atelier testen werd niet volledig opgeschuurd en rechtgetrokken. Door middel van testopstellingen werden de vleugel haaks gehouden, zonder excessief druk uit te oefenen op de dichtingen.



Figuur 33: horizontale snede SRE3b

De scharnieren werden vervangen en herpositioneerd om de integratie van opdekklatten aan de binnenzijde van het raam mogelijk te maken. Deze aanpassing was noodzakelijk om de beoogde afdichtingsconfiguraties technisch realiseerbaar te houden binnen de bestaande raamgeometrie.



Figuur 34: aanzicht ARE2b

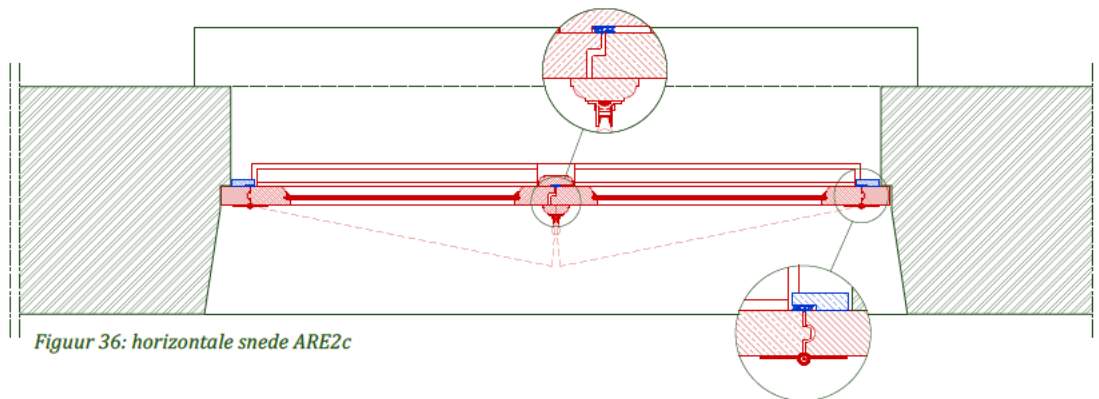


Figuur 35: profiel ARE2b

Aangezien de oorspronkelijke scharniertypes niet beschikbaar waren en de scharniergeometrie bepalend is voor de werking van de afdichtingen, werd gebruik gemaakt van alternatieve scharnieren. Om te vermijden dat deze afwijking een grote invloed zou hebben op het gemeten luchtlekdebiet, werden de scharnieren tijdens de metingen tijdelijk luchtdicht afgeschermd. Op die manier kon het meetresultaat hoofdzakelijk worden toegeschreven aan de onderzochte afdichtingsconfiguraties.

7.5.3.2 Enkelvoudige buitenafdichting ($^{4}RE_{2c}$)

De configuratie $^{4}RE_{2c}$ omvatte een enkelvoudige buitenafdichting, eveneens gerealiseerd door middel van opdeklatten. Door de aanwezigheid van de raamneus kon de opdeklat niet aan de onderzijde van het raam worden toegepast, waardoor de afdichting beperkt bleef tot stijlen en bovendorpel.



Figuur 36: horizontale snede $^{4}RE_{2c}$

In tegenstelling tot $^{4}RE_{2b}$ was er bij $^{4}RE_{2c}$ geen noodzaak om de scharnieren aan te passen voor deze ingreep. De binnenzijde van het schrijnwerk kon zo in zijn originele toestand blijven.



Figuur 37: profiel wolfbek $^{4}RE_{2c}$



Figuur 38: profiel $^{4}RE_{2c}$



Figuur 39: scharnier $^{4}RE_{2c}$

7.5.3.3 Buiten- en middenafdichting (${}^A RE_2d1-2$)

In ${}^A RE_2d$ werd een dubbele afdichtingsopbouw gerealiseerd, bestaande uit een middenafdichting (${}^A RE_2a$) in combinatie met een buitenafdichting via opdekklatten (${}^A RE_2c$). Binnen deze configuratie werd gevarieerd in het type rubberprofiel, terwijl de positionering van de dichtingen ongewijzigd bleef. Deze configuratie onderzocht het gecombineerde effect van een interne en externe afdichting.



Figuur 40: profiel ARE2d



Figuur 41: centerlijn ARE2d



Figuur 42: bovenhoek ARE2d

7.5.3.4 Binnen- en middenafdichting (${}^A RE_2e1-3$)

De configuratie ${}^A RE_2e$ bestaat uit een dubbele afdichting met een midden- en een binnenafprofiel (${}^A RE_2a + {}^A RE_2b$). Ook binnen deze configuratie werd gevarieerd in het type rubberprofiel, terwijl de geometrische opbouw constant bleef.



Figuur 43: Profiel ARE2e



Figuur 44: bovenhoek ARE2e



Figuur 45: centerlijn ARE2e

Zoals zichtbaar op bovenstaande figuren, kon de dichting niet volledig doorlopen over de bovenzijde van de veugel. Met behulp van testopstellingen werd getracht om het effect van een doorlopende dichting te simuleren.

7.5.3.5 Drievoudige dichting (${}^A RE_{2f}1-2$)

${}^A RE_{2f}$ vertegenwoordigde het hoogste ingreepniveau binnen ${}^A RE_2$ en omvatte een drievoudige afdichtingsopbouw met dichtingen aan de binnenzijde, in de middenaansluiting en aan de buitenzijde. Binnen deze configuratie werd uitsluitend gevarieerd in het type rubberprofiel, terwijl de positionering van de dichtingen vast bleef.

In tegenstelling tot de in-situ-uitvoeringen van ${}^S RE_{3a}$ werden binnen alle ${}^A RE_2$ -configuraties ook rubberen afdichtingen aangebracht ter hoogte van de bol- en holverbindingen (wolfbekken). Deze zones werden expliciet meegenomen in de experimentele restauratie, aangezien de ateliercontext toeliet om deze ingrepen gecontroleerd uit te voeren zonder randvoorwaarden voor hergebruik.



Figuur 46: sluiting ARE_{2f}



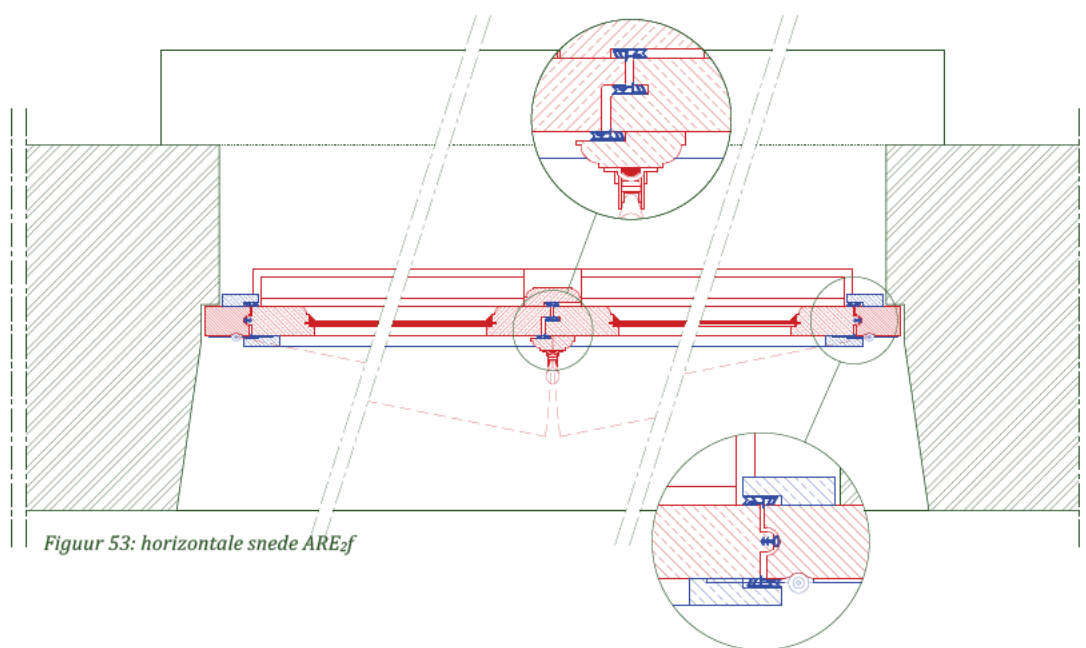
Figuur 47: vleugelprofiel ARE_{2f}



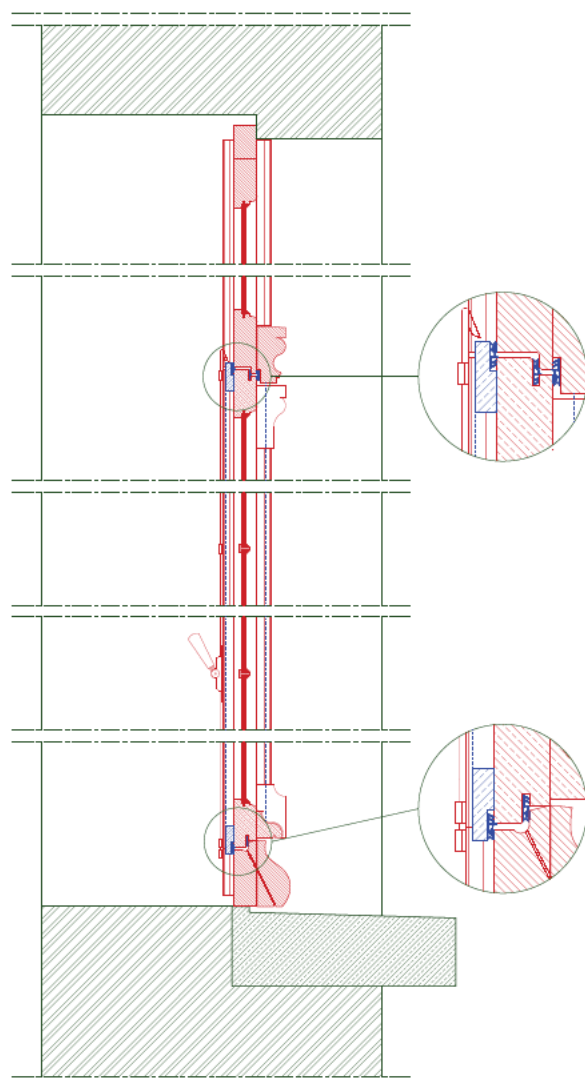
Figuur 48: wolfbek en scharnier ARE_{2f}



Figuur 49: aanzicht ARE_{2f}



Figuur 53: horizontale snede ARE_{2f}



Figuur 54: verticale snede ARE_{2f}

7.5.3.6 Soorten dichtingen

Binnen $^{ARE}_2$ wordt gevarieerd in het aantal, de positie en het type van de rubberen dichtingen. In *Tabel 1* wordt een overzicht van de gebruikte types rubberen dichtingen, van het merk Deventer, gepresenteerd. Deze types zijn de meest gangbare en geschikte dichtingen. De benoemde O-profielen worden uitsluitend gebruikt in de wolfbekken van het raam.

configuraties in atelier	Dichtingen Aantal	Buiten Type dichting	Midden Type profiel	Midden Type O-profiel	Binnen Type dichting
ARE2a	1	-	SPV12	S0032	-
ARE2b	1	-	-	-	S5510
ARE2c	1	S5510	-	-	-
ARE2d1	2	SPV12	SPV12	S0032	-
ARE2d2	2	S5510	SPV12	S0032	-
ARE2e1	2	-	SPV12	S0032	bruin*
ARE2e2	2	-	SPV12	S0032	SPV12
ARE2e3	2	-	SPV12	S0032	S5510
ARE2f1	3	SPV12	SPV12	S0032	bruin*
ARE2f2	3	S5510	S5510	S0032	S5510

Tabel 1: Dichtingssoorten ARE2

*De bruine dichting wordt niet meer geproduceerd, productnaam onbekend.

7.5.4 Reproductiemodel

Een laatste testobject is het reproductiemodel. Het betreft een nieuw vervaardigd houten raam dat ontworpen is als een zo getrouw mogelijke reproductie van het oorspronkelijke raamtype, met behoud van de globale vormgeving, ornamentiek, geleding en visuele proporties van het historisch schrijnwerk.

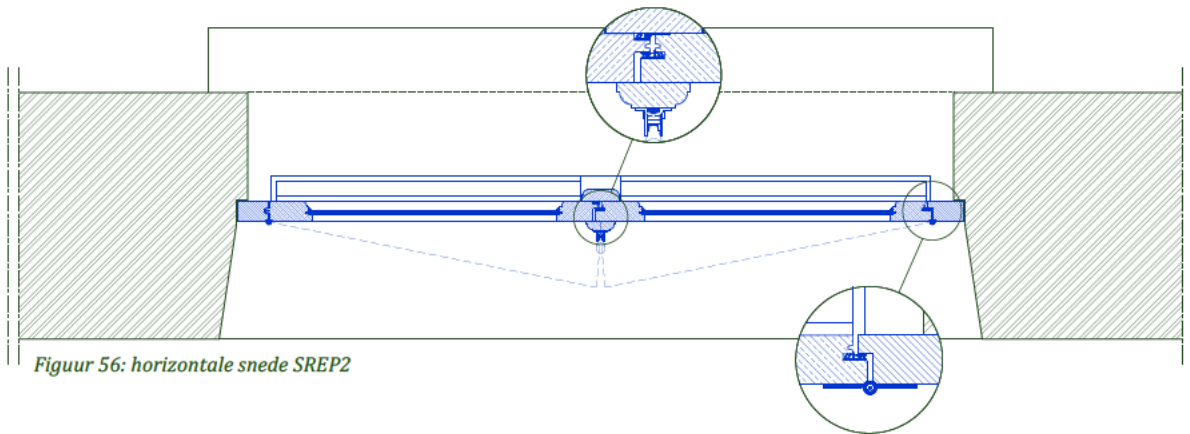


Figuur 55: OG in situ

In tegenstelling tot het originele raamwerk worden deze reproductiemodellen geproduceerd volgens hedendaagse fabricagetechnieken en kwaliteitsnormen. De ramen zijn uitgevoerd in nieuw hout, zonder vervormingen of scheeftrekking, wat toelaat om gecontroleerde en uniforme toleranties aan te houden tussen kader en vleugel. Rondom het bewegende raamdeel wordt een consistente marge voorzien, waardoor een vlotte bediening mogelijk blijft en de aangebrachte afdichtingen optimaal kunnen functioneren.

De reproductiemodellen vertonen geen open kieren of spleten in gesloten toestand. De ophanging gebeurt via nieuwe, maar visueel en functioneel vergelijkbare scharnieren, afgestemd op de historische typologie. De detaillering van voegen en afwateringsvoorzieningen werd licht gemoderniseerd, met het oog op een verbeterde duurzaamheid en vochtbeheersing, zonder afbreuk te doen aan het historische karakter van het raam.

In functie van de erfgoedconformiteit worden de reproductieramen eveneens uitgerust met een traditionele espagnoletsluiting. Dit sluitingsmechanisme sluit aan bij het historische gebruik en draagt bij tot het behoud van het oorspronkelijke bedieningsprincipe.



Figuur 56: horizontale snede SREP2

In tegenstelling tot het originele schrijnwerk zijn de reproductiemodellen uitgerust met een doorlopende rubberen dichting rondom de volledige omtrek van de vleugel. Ter hoogte van de aansluiting tussen de twee vleugels wordt bovendien een tweede afdichting voorzien, wat de luchtdichtheid in gesloten toestand verder verhoogt. Deze afdichtingen zijn zodanig ontworpen dat ze onder sluitdruk gelijkmatig worden samengedrukt.



Figuur 57: Profiel (RE₁)



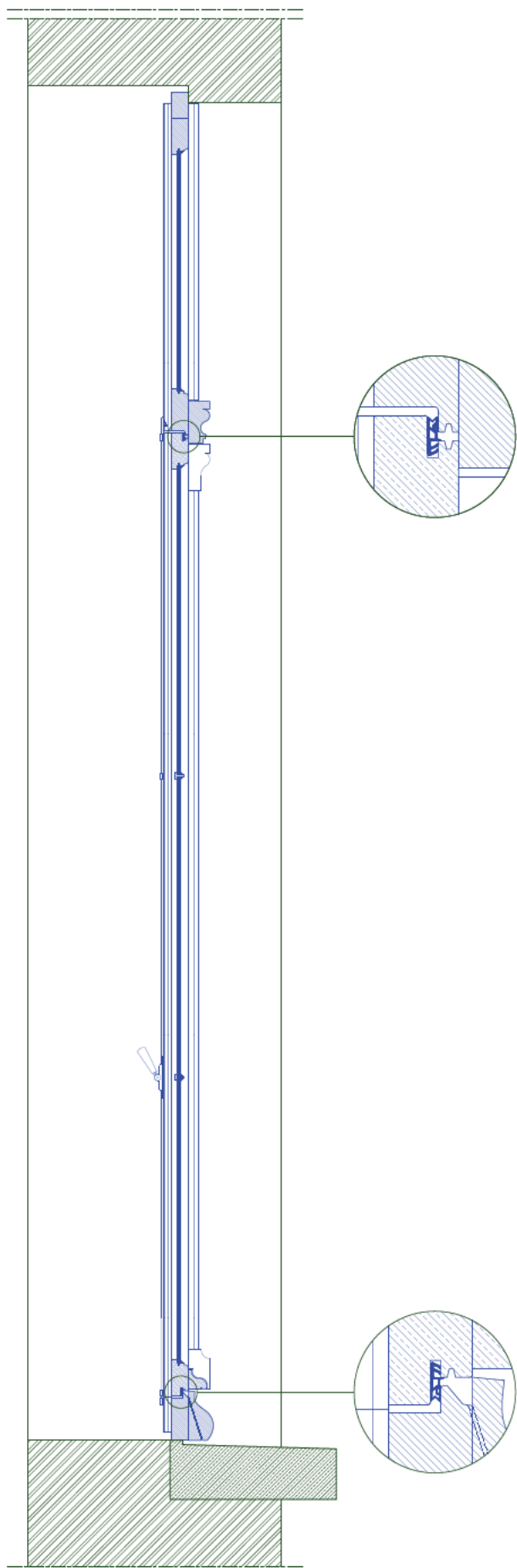
Figuur 58: Profiel (RE₁)



Figuur 59: Profiel (RE₁)

In tegenstelling tot $^{SRE}_{3a}$ en $^{ARE}_{1-2}$ waar de dichting zich tussen de afwateringsgaten en het buitenvlak bevindt, zit deze hier aan de binnenzijde van het afwateringsgat, waardoor er geen rechtstreekse verbinding is tussen de buitenlucht en het binnenklimaat.

Daarnaast is het kader van de reproductieramen uitgevoerd met een verhoogde profieldikte, waardoor de plaatsing van dubbele beglazing mogelijk wordt, wat resulteert in een aanzienlijk verbeterde thermische prestatie ten opzichte van het oorspronkelijke glas.



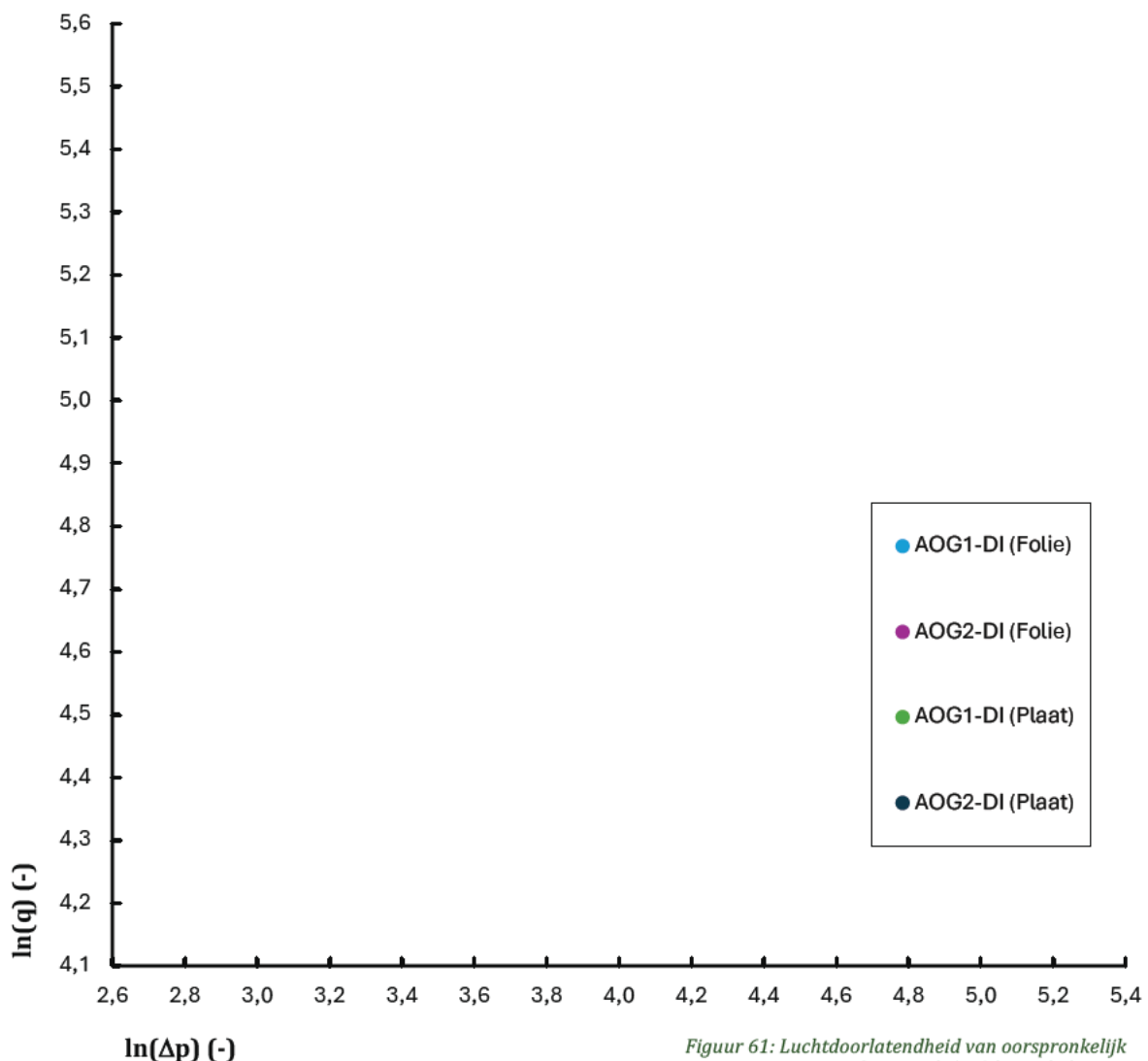
Figuur 60: verticale snede SREP2

8. Onderzoeksresultaten

8.1 Referentiemetingen ($^{A}OG_{1,2}$ en $^{S}OG_{1,2,3}$)

8.1.1 Resultaten bij DI-belasting (atelier)

De druk-debietrelaties van het oorspronkelijke schrijnwerk vertonen in alle configuraties een quasi-lineair verloop in de dubbel-logaritmische voorstelling, wat bevestigt dat het luchtlekgedrag adequaat kan worden beschreven met een machtsfunctie.



Figuur 61: Luchtdoorlatendheid van oorspronkelijk schrijnwerk (OG) bij DI-belasting

De regressielijnen lopen nagenoeg evenwijdig, wat wijst op een identiek dominant lekmechanisme voor alle configuraties (folie/plaat, $^{A}OG_1/^{A}OG_2$). Verschillen manifesteren zich hoofdzakelijk als een schaalverschuiving van het debiet.

De curves situeren zich op een vergelijkbaar niveau op de verticale as, wat wijst op een gelijkaardige orde van grootte van het luchtlekdebiet. Er wordt geen systematisch effect vastgesteld van de afdichtingsmethode van de testopstelling.

De determinatiecoëfficiënt bedraagt in alle gevallen $r^2 > 0,99$, wat wijst op een zeer goede correlatie en stabiele meetcondities in ateliercontext.

	C (m ³ /(h·Pa ⁿ))	n (-)	q_{50,DI}L_{min} (m ³ /(h·m))	q_{50,DI}L_{max} (m ³ /(h·m))	q_{50,DI}A (m ³ /(h·m ²))	q_{50,DI}L (m ³ /(h·m))
AOG1-DI (folie)	14,24	0,55	12,12	13,44	26,04	12,76
AOG2-DI (folie)	14,67	0,54	10,81	14,91	25,91	12,70
AOG1-DI (plaat)	13,65	0,56	12,47	13,26	26,24	12,86
AOG2-DI (plaat)	15,28	0,54	11,42	14,97	26,68	13,07

Tabel 2: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en q_{50A}/L van AOG (DI)

De lekcoëfficiënt C varieert voor alle DI-configuraties tussen circa 13,6 en 15,3 m³/(h·Paⁿ), wat bevestigt dat de totale lekoppervlakte van het oorspronkelijke schrijnwerk vergelijkbaar is tussen de verschillende opstellingen.

De stromingsexponent n ligt tussen 0,54 en 0,56, wat duidt op een turbulent tot gemengd stromingsregime, typerend voor historisch schrijnwerk met brede kieren en discontinu contactvlakken.

De q_{50,DI}L-waarden situeren zich rond 12,7–13,1 m³/(h·m), met overeenkomstige q_{50,DI}A-waarden rond 26 m³/(h·m²). De onderlinge verschillen blijven beperkt.

Het 95%-betrouwbaarheidsinterval (q_{50,DI}L_{min} – q_{50,DI}L_{max}) is voor alle metingen smal, wat wijst op een hoge meetnauwkeurigheid en een geringe spreiding rond de regressielijn.

	q_{100,DI}A (m ³ /(h·m ²))	klasse (-)	q_{100,DI}L (m ³ /(h·m))	klasse (-)
AOG1-DI (folie)	38,11	1	18,67	0
AOG2-DI (folie)	37,69	1	18,47	0
AOG1-DI (plaat)	38,74	1	18,98	0
AOG2-DI (plaat)	38,72	1	18,97	0

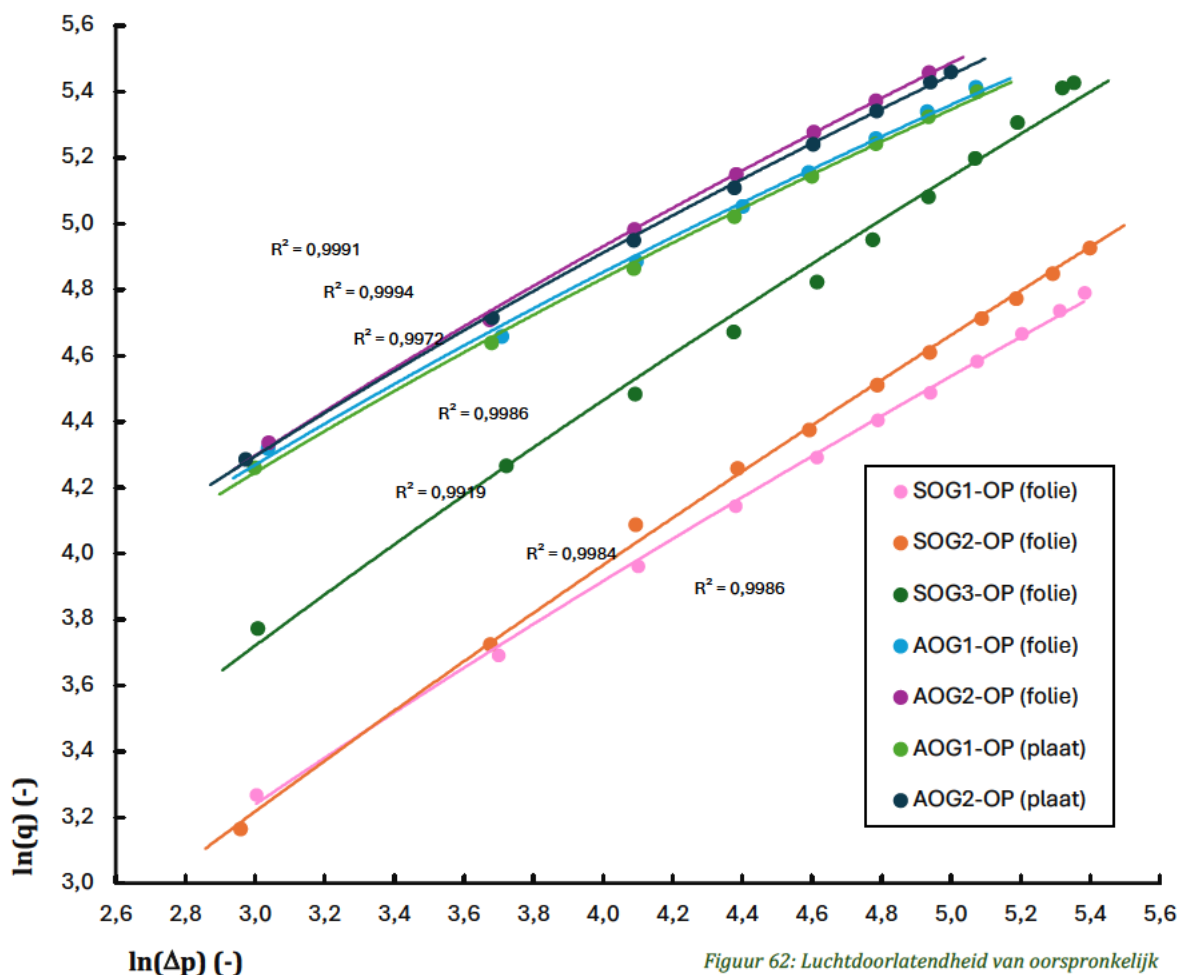
Tabel 3: klassen en q_{100A}/L van AOG (DI)

Op basis van de q₁₀₀-waarden wordt het oorspronkelijke schrijnwerk geclassificeerd als: klasse 1 (q_{100,A}) en klasse 0 (q_{100,L}). Conform EN 12207 geldt de gunstigste klasse als eindbeoordeling, resulterend in klasse 1 (q₁₀₀).

8.1.2 Resultaten bij OP-belasting (in situ en in atelier)

De druk–debietrelaties onder OP-belasting vertonen voor alle configuraties een quasi-lineair verloop in de dubbel-logaritmische voorstelling. Dit bevestigt dat ook onder OP-belasting het luchttekgedrag adequaat kan worden beschreven met een machtsfunctie.

De regressielijnen van de ateliermetingen (AOG) lopen nagenoeg evenwijdig, wat wijst op een vergelijkbaar stromingsregime en een consistente drukafhankelijkheid. De in-situ-metingen (SOG) vertonen een grotere spreiding en minder evenwijdigheid ten opzichte van de ateliermetingen. Dit wijst op een grotere variabiliteit in het gemeten lekgedrag onder OP-belasting in reële omstandigheden.



De determinatiecoëfficiënt r^2 blijft voor de ateliermetingen hoog ($> 0,99$), terwijl bij de in-situ-metingen een grotere spreiding wordt waargenomen, wat wijst op minder stabiele meetcondities (SOG_3).

	C ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$)	n (-)	$q_{50,OPLmin}$ ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)	$q_{50,OPLmax}$ ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)	$q_{50,OPA}$ ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$)	$q_{50,OPL}$ ($\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$)
SOG1-OP (folie)	3,82	0,64	4,59	5,17	9,94	4,87
SOG2-OP (folie)	3,08	0,71	3,93	6,64	10,43	5,11
SOG3-OP (folie)	5,03	0,71	6,26	11,08	17,00	8,33
AOG1-OP (folie)	14,30	0,54	11,48	13,63	25,54	12,51
AOG2-OP (folie)	12,55	0,60	11,62	15,66	27,53	13,49

AOG1-OP (plaat)	13,75	0,55	11,95	12,59	25,04	12,27
AOG2-OP (plaat)	13,22	0,58	12,13	14,39	26,97	13,22

Tabel 4: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en q_{50A}/L van A/SOG (OP)

Voor de in-situ OP-metingen (sOG) liggen de C-waarden tussen circa 3,1 en 5,0 $m^3/(h \cdot Pa^n)$, met stromingsexponenten n tussen 0,64 en 0,71. Dit wijst op een gemengd tot eerder laminariserend stromingsregime, waarbij kleine variaties in geometrie en sluitcondities een grotere invloed hebben op het gemeten debiet. Voor de ateliermetingen (AOG) liggen de C-waarden aanzienlijk hoger (ca. 12,5–14,3 $m^3/(h \cdot Pa^n)$), terwijl de n -waarden zich situeren tussen 0,54 en 0,60. Deze waarden zijn vergelijkbaar met die onder DI-belasting en wijzen op een turbulent tot gemengd stromingsregime, typisch voor brede kieren in historisch schrijnwerk. De beperkte spreiding van n bevestigt een consistent lekmechanisme onder OP-belasting in meer gecontroleerde omstandigheden.

De $q_{50,OPL}$ -waarden voor de in-situ-metingen variëren tussen circa 4,9 en 8,3 $m^3/(h \cdot m)$, met overeenkomstige $q_{50,OPA}$ -waarden tussen ongeveer 9,9 en 17,0 $m^3/(h \cdot m^2)$. De betrouwbaarheidsintervallen zijn relatief breed, wat wijst op een grotere meetonzekerheid in in-situ-context. Voor de ateliermetingen situeren de $q_{50,OPL}$ -waarden zich rond 12,3–13,5 $m^3/(h \cdot m)$, met $q_{50,OPA}$ -waarden tussen circa 25,0 en 27,5 $m^3/(h \cdot m^2)$. De betrouwbaarheidsintervallen zijn hier relatief smaller, wat wijst op stabiele meetcondities en een hoge reproduceerbaarheid.

	$q_{100,OPA}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100,OPL}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)
SOG1-OP (folie)	15,49	2	7,59	1
SOG2-OP (folie)	17,03	2	8,35	1
SOG3-OP (folie)	27,73	1	13,59	0
AOG1-OP (folie)	37,21	1	18,23	0
AOG2-OP (folie)	41,61	1	20,39	0
AOG1-OP (plaat)	36,61	1	17,94	0
AOG2-OP (plaat)	40,24	1	19,72	0

Tabel 5: klassen en q_{100A}/L van AOG en SOG (OP)

Op basis van de q_{100} -waarden onder OP-belasting worden klassen tussen 1 en 2 bekomen in-situ, waar in het atelier de klasse constant 1 bedraagt. Conform EN 12207 wordt telkens de gunstigste klasse aangehouden als eindbeoordeling.

8.1.3 Samenvattende observaties

Voor de ateliermetingen (AOG) liggen de $q_{50,DI A}$ -waarden geconcentreerd rond 25,6–26,8 $m^3/(h \cdot m^2)$, terwijl de $q_{50,DI L}$ -waarden zich situeren tussen 12,6 en 13,2 $m^3/(h \cdot m)$. De overeenkomstige $q_{50,OPA}$ - en $q_{50,OPL}$ -waarden liggen in dezelfde orde van grootte. De afgeleide gemiddelde waarden q_{50A} en q_{50L} vertonen slechts marginale verschillen tussen AOG_1 en AOG_2 en tussen folie- en plaatafdichting, wat wijst op een beperkte invloed van zowel raamindex als afdichtingsmethode op de globale luchtdoorlatendheid in ateliercontext.

Voor de in-situ-metingen (sOG) zijn uitsluitend OP-belastingen beschikbaar. De $q_{50,OPA}$ -waarden variëren tussen 9,9 en 17,0 $m^3/(h \cdot m^2)$, met overeenkomstige $q_{50,OPL}$ -waarden tussen 4,9 en 8,3 $m^3/(h \cdot m)$. De spreiding tussen sOG_1 , sOG_2 en sOG_3 is groter dan bij de ateliermetingen, maar de onderlinge spreiding tussen sOG_1 en sOG_2 is van dezelfde orde van grootte als diezelfde raamobjecten getest in het atelier. Opmerkelijk is het verschil in grootte van de C -waarden gemeten in situ versus gemeten in het atelier op identieke raamobjecten.

	$q_{50,DI A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50,DI L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	$q_{50,OP A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50,OP L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	$q_{50 A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50 L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)
AOG1 (folie)	26,04	12,76	25,54	12,51	25,79	12,64
AOG2 (folie)	25,91	12,70	27,53	13,49	26,72	13,10
AOG1 (plaat)	26,24	12,86	25,04	12,27	25,64	12,57
AOG2 (plaat)	26,68	13,07	26,97	13,22	26,83	13,15

Tabel 6: Samenvattende waarden voor q_{50} van AOG

	$q_{50,DI A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50,DI L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	$q_{50,OP A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50,OP L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	$q_{50 A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50 L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)
SOG1 (folie)	-	-	9,93	4,87	-	-
SOG2 (folie)	-	-	10,49	5,14	-	-
SOG3 (folie)	-	-	16,97	8,32	-	-

Tabel 7: Samenvattende waarden voor q_{50} van SOG

Voor de in-situ-metingen (sOG) worden hogere klassen bekomen op basis van oppervlakte (Klasse 1–2), terwijl de classificatie op basis van voeg lengte varieert tussen Klasse 0 en 1. Door het ontbreken van DI-metingen worden geen gemiddelde klassen afgeleid voor deze configuraties. Conform EN 12207 wordt de gunstigste klasse gehanteerd als eindbeoordeling, wat resulteert in Klasse 1 voor alle AOG -configuraties.

	$q_{100,OP A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100,OP L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)	$q_{100 A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100 L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)
AOG1 (folie)	37,21	1	18,23	0	37,66	1	18,45	0
AOG2 (folie)	41,61	1	20,39	0	39,65	1	19,43	0
AOG1 (plaat)	36,61	1	17,94	0	37,68	1	18,46	0
AOG2 (plaat)	40,24	1	19,72	0	39,48	1	19,35	0

Tabel 8: Samenvattende waarden voor q_{100} en klassen van AOG

	$q_{100,OP A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100,OP L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)	$q_{100 A}$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100 L}$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)
SOG1 (folie)	15,49	2	7,59	1	-	-	-	-
SOG2 (folie)	17,03	2	8,35	1	-	-	-	-
SOG3 (folie)	27,73	1	13,59	0	-	-	-	-

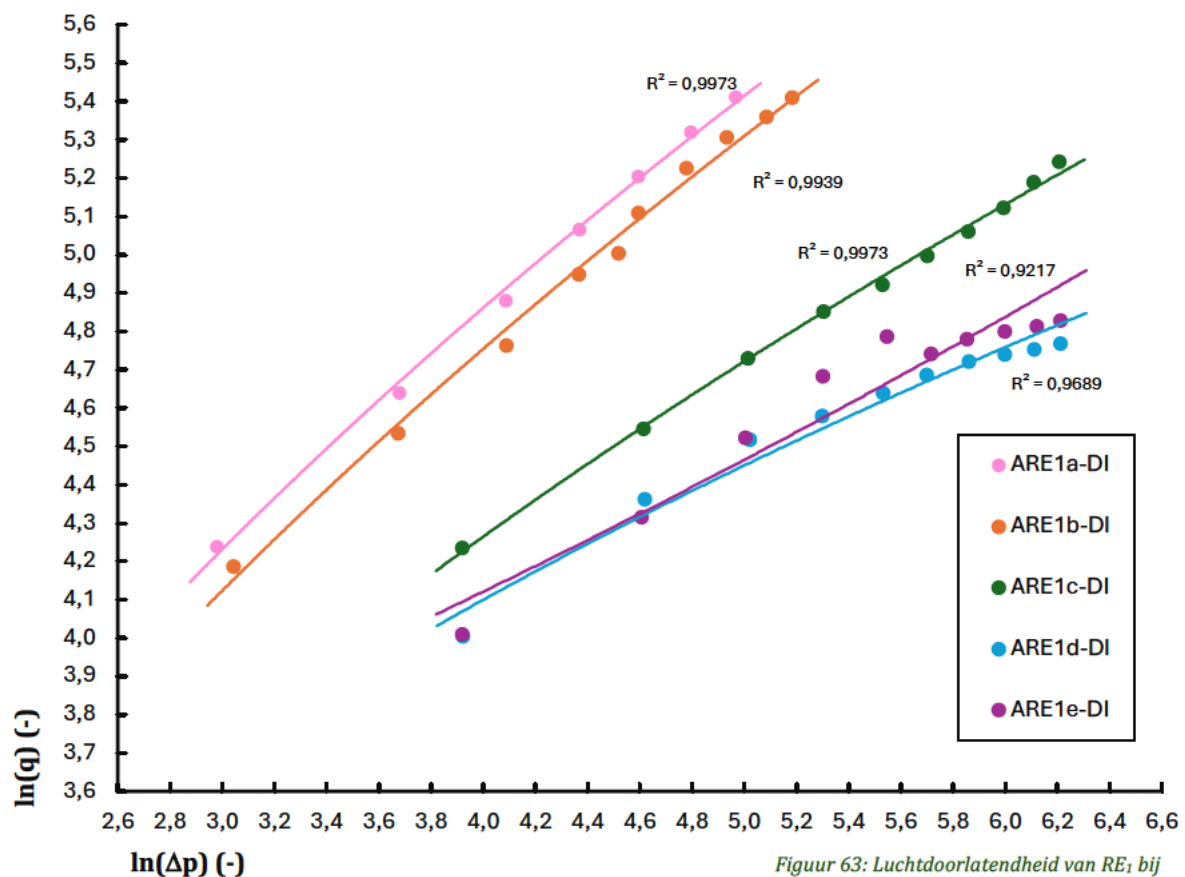
Tabel 9: Samenvattende waarden voor q_{100} en klassen van SOG

8.2 Minimale restauratie (${}^A RE_1$ en ${}^S RE_3$)

8.2.1 Resultaten bij DI-belasting (atelier)

De druk-debietcurves van de opeenvolgende ${}^A RE_1$ -configuraties verschuiven systematisch naar lagere debieten naarmate bijkomende ingrepen worden toegepast. De regressielijnen blijven grotendeels quasi-lineair, maar verliezen hun onderlinge evenwijdigheid in de latere configuraties.

De wijziging in helling wijst op een verandering van het dominante lekmechanisme: waar ${}^A RE_{1a-b}$ nog een gemengd tot turbulent stromingsregime vertonen, evolueren ${}^A RE_{1c-e}$ naar een meer laminaire stroming. Deze verschuiving van n bevestigt dat brede kieren progressief worden geëlimineerd en dat het resterende lekgedrag wordt gedomineerd door fijnere, meer spleetvormige lekken.



Figuur 63: Luchtdoorlatendheid van RE_1 bij DI-belasting

De $q_{50,DI}$ -waarde reduceert van circa $12,6 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ naar ongeveer $6,2 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$, wat overeenkomt met een reductie van ongeveer 50%. De betrouwbaarheidsintervallen worden breder bij de latere configuraties, wat samenhangt met de lagere debieten en verhoogde meetgevoeligheid bij sterk verbeterde luchtdichtheid.

	C (m ³ /(h*Pa ⁿ))	n (-)	q_{50,DI}L_{min} (m ³ /(h*m))	q_{50,DI}L_{max} (m ³ /(h*m))	q_{50,DI}A (m ³ /(h*m ²))	q_{50,DI}L (m ³ /(h*m))
ARE1a-DI (plaat)	11,64	0,60	11,17	14,15	25,65	12,57
ARE1b-DI (plaat)	10,91	0,59	8,89	14,36	23,07	11,30
ARE1c-DI (plaat)	12,93	0,43	6,31	8,35	14,80	7,25
ARE1d-DI (plaat)	17,35	0,32	3,65	10,82	12,82	6,28
ARE1e-DI (plaat)	14,75	0,36	3,02	12,85	12,71	6,23

Tabel 10: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en q_{50A}/L van ARE1 (DI)

	q_{100,DI}A (m ³ /(h*m ²))	klasse (-)	q_{100,DI}L (m ³ /(h*m))	klasse (-)
ARE1a-DI (plaat)	38,80	1	19,01	0
ARE1b-DI (plaat)	34,64	1	16,97	0
ARE1c-DI (plaat)	19,94	2	9,77	1
ARE1d-DI (plaat)	15,97	2	7,83	1
ARE1e-DI (plaat)	16,27	2	7,97	1

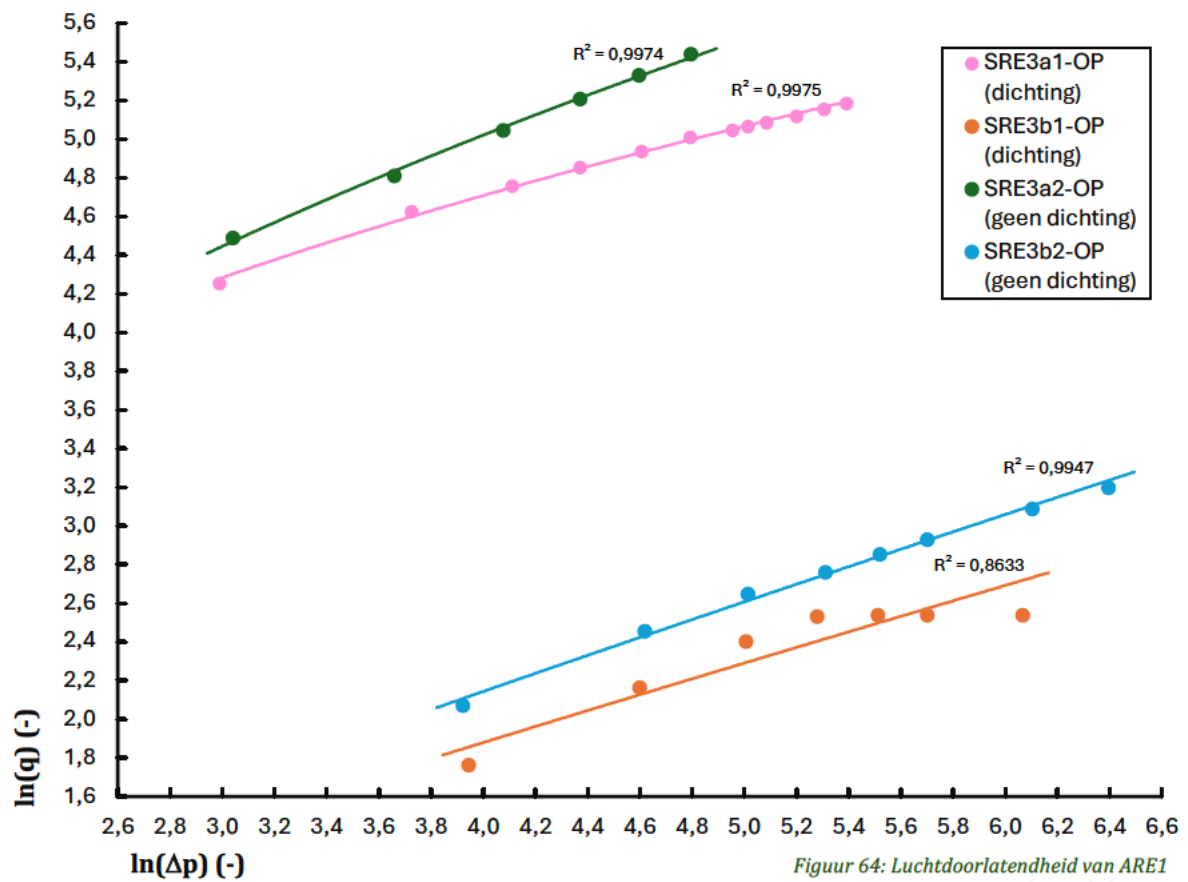
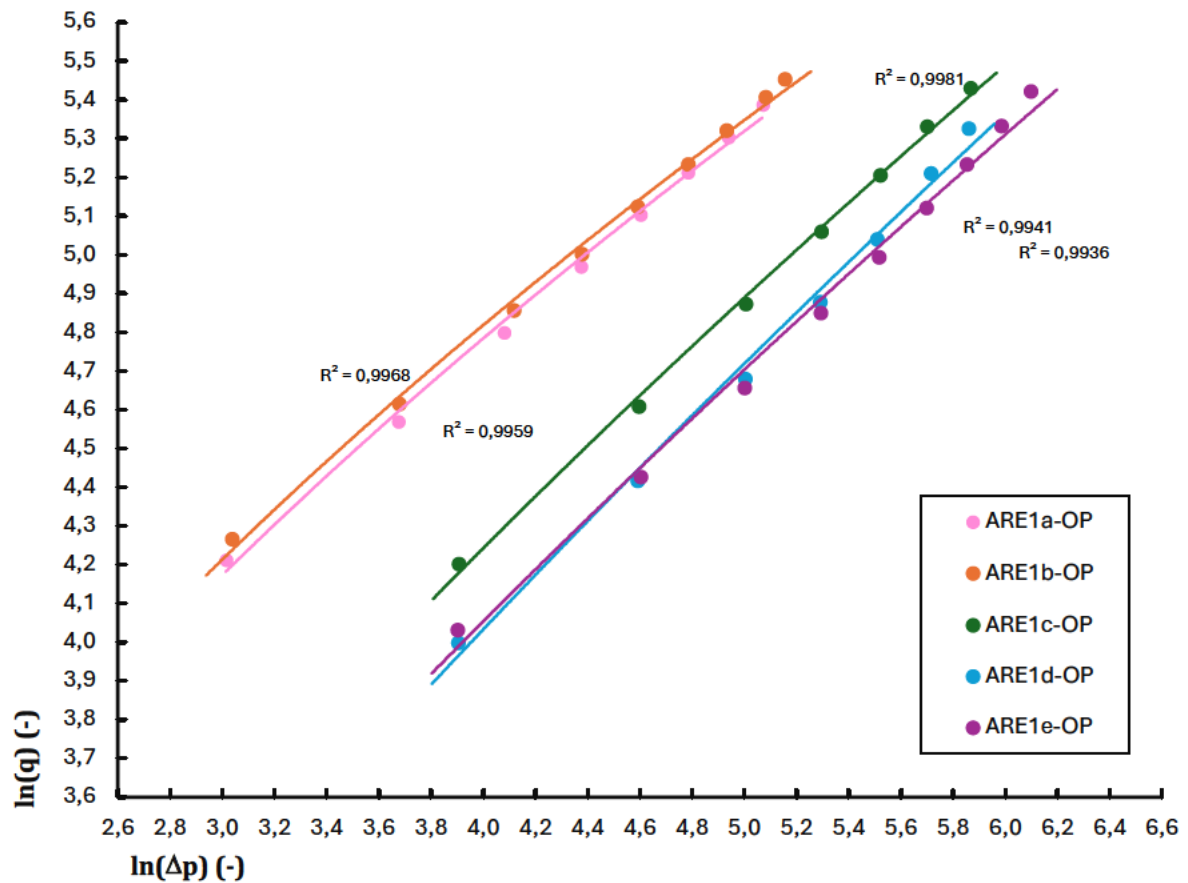
Tabel 11: klassen en q_{100A}/L van ARE1 (DI)

De DI-configuraties evolueren van klasse 1 naar klasse 2 per oppervlakte en van klasse 0 naar 1 per lengtevoeg.

8.2.2 Resultaten bij OP-belasting (in situ en in atelier)

Onder OP-belasting vertonen alle ^ARE₁-configuraties een quasi-lineair druk-debietverband met hoge correlatie ($r^2 > 0,99$). De regressielijnen verschuiven systematisch naar lagere debieten, maar blijven grotendeels evenwijdig. De in-situ metingen tonen een duidelijke scheiding tussen de verschillende functionele configuraties. De toevoeging van een rubberen dichting (^SRE_{3a}) resulteert in een merkbare verschuiving van de regressielijn naar lagere debieten.

In tegenstelling tot DI-belasting blijft de helling van de curves relatief constant over de ^ARE₁-sequentie. Dit wijst op een gelijkaardig drukafhankelijk stromingsgedrag tussen de configuraties. Bijkomend situeren de configuraties met achterzetraam (^SRE_{3b}) zich op een duidelijk lager debietniveau en onderscheiden zich visueel van alle andere metingen.



Figuur 64: Luchtdoorlatendheid van ARE1 en SRE3 bij OP-belasting

De stromingsexponent n varieert in het atelier beperkt tussen circa 0,56 en 0,68. De reductie van het luchtlekdebiet manifesteert zich hoofdzakelijk via een daling van de schaafactor C .

	C (m ³ /(h*Pa ⁿ))	n (-)	q_{50,0PL}min (m ³ /(h*m))	q_{50,0PL}max (m ³ /(h*m))	q_{50,0PA} (m ³ /(h*m ²))	q_{50,0PL} (m ³ /(h*m))
ARE1a-OP (plaat)	11,88	0,57	10,40	13,04	23,77	11,65
ARE1b-OP (plaat)	12,88	0,56	11,30	12,87	24,61	12,06
ARE1c-OP (plaat)	5,59	0,63	5,94	8,03	14,10	6,91
ARE1d-OP (plaat)	3,76	0,68	3,64	8,47	11,33	5,55
ARE1e-OP (plaat)	4,57	0,63	4,19	7,76	11,64	5,70
SRE3a1-OP (dichting, f)	24,54	0,37	8,71	13,96	22,51	11,03
SRE3b1-OP (dichting, f)	1,47	0,38	0,14	3,46	1,40	0,68
SRE3a2-OP (geen, f)	16,91	0,54	13,60	16,25	30,34	14,87
SRE3b2-OP (geen, f)	1,43	0,45	0,62	1,22	1,77	0,87

Tabel 12: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en q50A/L van ARE1 en SRE3 (OP)

De q_{50,0PL}-waarden dalen van circa 11,7 m³/(h*m) (^{ARE1a}) tot circa 5,6 m³/(h*m) (^{ARE1e}). De betrouwbaarheidsintervallen blijven vergelijkbaar tussen de configuraties en wijzen op stabiele meetcondities.

In situ bevestigen de q_{50,0PL}-waarden het dominante effect van het achterzetraam, met waarden < 1 m³/(h*m). De reductie is een orde van grootte groter dan het effect van de rubberen dichting alleen.

	q_{100,0PA} (m ³ /(h*m ²))	klasse (-)	q_{100,0PL} (m ³ /(h*m))	klasse (-)
ARE1a-OP (plaat)	35,35	1	17,32	0
ARE1b-OP (plaat)	36,30	1	17,79	0
ARE1c-OP (plaat)	21,84	2	10,70	1
ARE1d-OP (plaat)	18,11	2	8,87	1
ARE1e-OP (plaat)	18,06	2	8,85	1
SRE3a1-OP (dichting, f)	29,14	1	14,28	0
SRE3b1-OP (dichting, f)	1,82	4	0,89	3
SRE3a2-OP (geen, f)	44,25	1	21,68	0
SRE3b2-OP (geen, f)	2,42	4	1,18	3

Tabel 13: klassen en q100A/L van ARE1 en SRE3 (OP)

In situ heeft de toevoeging van een dichting geen invloed op de klasse van het raam. Een stijging van 3 klassen wordt consistent waargenomen wanneer een achterzetraam wordt geïntroduceerd. In het atelier stijgt de klasse één punt doorheen de ^{ARE1}-sequentie.

8.2.3 Samenvattende observaties

De samenvattende q_{50} -waarden tonen een duidelijke en monotone reductie van de luchtdoorlatendheid over de ${}^A RE_I$ -sequentie.

	$q_{50,DI}A$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50,DI}L$ ($m^3/(h \cdot m)$)	$q_{50,OP}A$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50,OP}L$ ($m^3/(h \cdot m)$)	$q_{50}A$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	$q_{50}L$ ($m^3/(h \cdot m)$)
ARE1a (plaat)	25,65	12,57	23,77	11,65	24,71	12,11
ARE1b (plaat)	23,07	11,30	24,61	12,06	23,84	11,68
ARE1c (plaat)	14,80	7,25	14,10	6,91	14,45	7,08
ARE1d (plaat)	12,82	6,28	11,33	5,55	12,08	5,92
ARE1e (plaat)	12,71	6,23	11,64	5,70	12,18	5,97

Tabel 14: Samenvattende waarden voor q_{50} van ARE1

Voor DI-belasting daalt $q_{50,DI}L$ stapsgewijs van $12,57 m^3/(h \cdot m)$ (${}^A RE_{1a}$) tot $6,23 m^3/(h \cdot m)$ (${}^A RE_{1e}$), wat overeenkomt met een reductie van ongeveer 50%. De overeenkomstige $q_{50,A}$ -waarden vertonen een gelijkaardige trend.

Onder OP-belasting wordt een vergelijkbare reductie waargenomen, met $q_{50,OP}L$ -waarden die afnemen van $11,65 m^3/(h \cdot m)$ tot $5,70 m^3/(h \cdot m)$. De verschillen tussen DI- en OP-belasting blijven beperkt in de latere configuraties, wat wijst op een convergent luchtlekgedrag.

	$q_{100,OP}A$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100,OP}L$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)	$q_{100}A$ ($m^3/(h \cdot m^2)$)	klasse (-)	$q_{100}L$ ($m^3/(h \cdot m)$)	klasse (-)
ARE1a (plaat)	35,35	1	17,32	0	37,07	1	18,17	0
ARE1b (plaat)	36,30	1	17,79	0	35,47	1	17,38	0
ARE1c (plaat)	21,84	2	10,70	1	20,89	2	10,24	1
ARE1d (plaat)	18,11	2	8,87	1	17,04	2	8,35	1
ARE1e (plaat)	18,06	2	8,85	1	17,17	2	8,41	1

Tabel 15: Samenvattende waarden voor q_{100} en klassen van ARE1

De classificatie op basis van q_{100} toont een duidelijke verbetering tussen ${}^A RE_{1a-b}$ en ${}^A RE_{1c-e}$. Waar ${}^A RE_{1a-b}$ onder OP- en DI-belasting in klasse 1 (per A) en klasse 0 (per L) vallen, bereiken ${}^A RE_{1c-e}$ consequent klasse 2 (per A) en klasse 1 (per L). Conform EN 12207 resulteert dit in een eindklasse die verbetert van klasse 1 naar klasse 2.

De in-situ-metingen bevestigen het effect van zowel de rubberen dichting als het achterzetraam onder OP-belasting.

	q_{50,DI}A (m ³ /(h·m ²))	q_{50,DI}L (m ³ /(h·m))	q_{50,OP}A (m ³ /(h·m ²))	q_{50,OP}L (m ³ /(h·m))	q₅₀A (m ³ /(h·m ²))	q₅₀L (m ³ /(h·m))
SRE3a1-OP (dichting, folie)	-	-	22,51	11,03	-	-
SRE3b1-OP (dichting, folie)	-	-	1,40	0,68	-	-
SRE3a2-OP (geen, folie)	-	-	30,34	14,87	-	-
SRE3b2-OP (geen, folie)	-	-	1,77	0,87	-	-

Tabel 16: Samenvattende waarden voor q₅₀ van SRE3

De toevoeging van een rubberen dichting (^sRE_{3a}) leidt tot een reductie van q_{50,OP}L van 14,87 m³/(h·m) naar 11,03 m³/(h·m). Dit effect blijft echter beperkt in vergelijking met de invloed van het achterzetraam.

De configuraties met achterzetraam (^sRE_{3b}) vertonen een uitgesproken reductie van de luchtdoorlatendheid, met q_{50,OP}L-waarden lager dan 1 m³/(h·m), onafhankelijk van de aanwezigheid van een dichting in het oorspronkelijke schrijnwerk.

	q_{100,OP}A (m ³ /(h·m ²))	klasse (-)	q_{100,OP}L (m ³ /(h·m))	klasse (-)	q₁₀₀A (m ³ /(h·m ²))	klasse (-)	q₁₀₀L (m ³ /(h·m))	klasse (-)
SRE3a1 (dichting, folie)	29,14	1	14,28	0	-	-	-	-
SRE3b1 (dichting, folie)	1,82	4	0,89	3	-	-	-	-
SRE3a2 (geen, folie)	44,25	1	21,68	0	-	-	-	-
SRE3b2 (geen, folie)	2,42	4	1,18	3	-	-	-	-

Tabel 17: Samenvattende waarden voor q₁₀₀ en klassen van SRE3

Op basis van de q₁₀₀-waarden behalen de configuraties zonder achterzetraam klasse 1 (per A) en klasse 0 (per L), terwijl de configuraties met achterzetraam klasse 4 (per A) en klasse 3 (per L) bereiken. Conform EN 12207 resulteert dit in een eindklasse 4 voor ^sRE_{3b}.

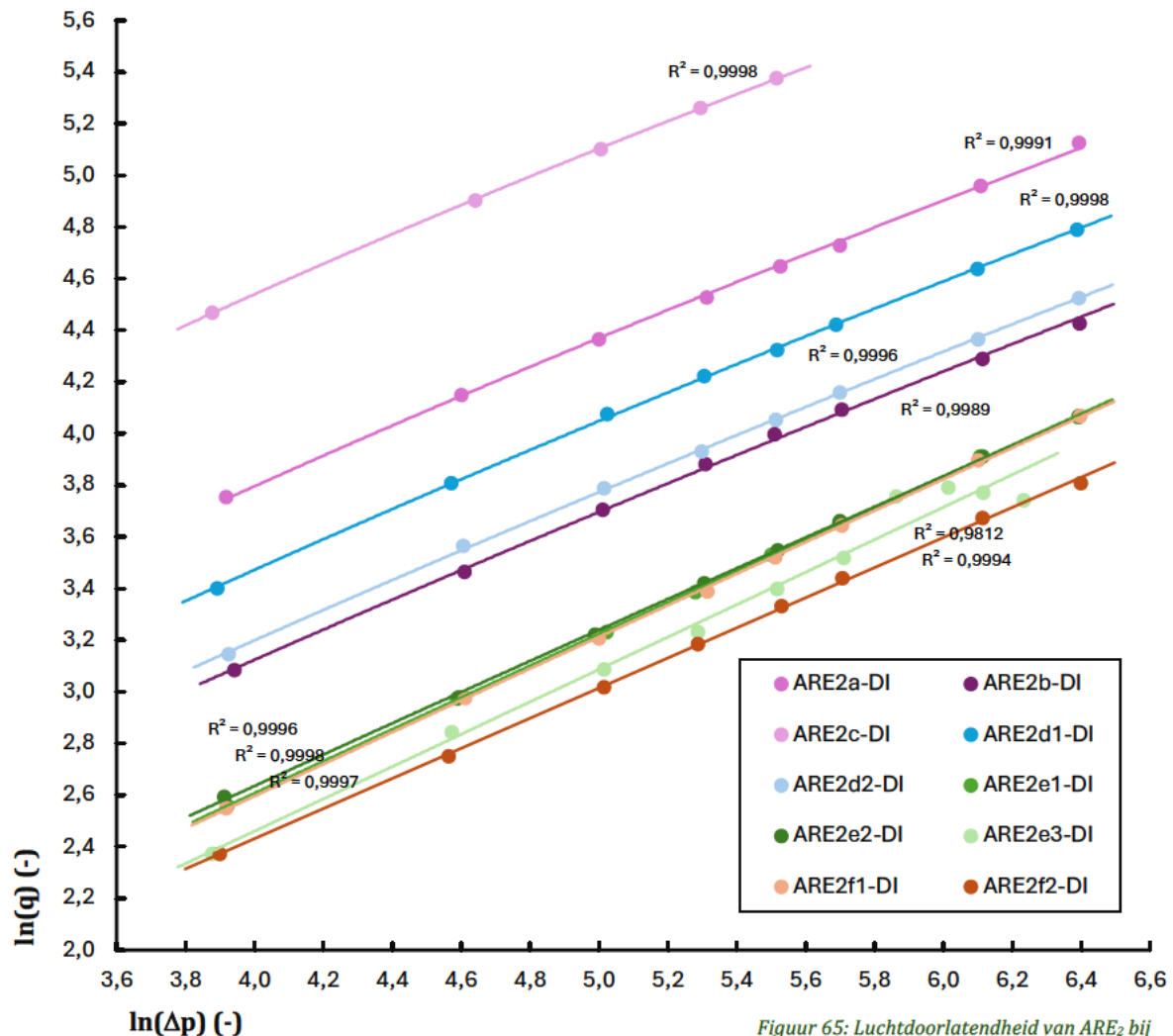
8.3 Uitgebreide en experimentele restauratie (ARE_2)

8.3.1 Resultaten bij DI-belasting (atelier)

De druk-debietcurves van de ARE_2 -configuraties vertonen over het volledige drukbereik een quasi-lineair verloop in de log-log voorstelling (r^2 doorgaans $> 0,99$). Dit bevestigt dat ook bij uitgebreide afdichtingsstrategieën het luchtlekgedrag correct wordt beschreven met een machtsfunctie.

Ten opzichte van ARE_1 verschuiven de curves bij ARE_2 systematisch naar lagere debieten, met duidelijke verschillen tussen de configuraties. Configuraties met enkelvoudige afdichting (ARE_{2a} , ARE_{2c}) situeren zich merkbaar hoger dan configuraties met meervoudige afdichtingen (ARE_{2d-f}).

De helling van de regressielijnen neemt licht toe bij configuraties met meerdere dichtingsniveaus. Dit wijst op een evolutie van een overwegend turbulent lekregime naar een meer spleet- en contactgedomineerd stromingsgedrag.



Figuur 65: Luchtdoorlatendheid van ARE_2 bij DI-belasting

De schaalfactor C neemt sterk af naarmate bijkomende afdichtingen worden toegevoegd. Enkelvoudige configuraties (${}^A RE_{2a}$, ${}^A RE_{2c}$) vertonen relatief hoge C -waarden. Meervoudige configuraties (${}^A RE_{2e-f}$) bereiken de laagste C -waarden, wat wijst op een sterke reductie van de effectieve lekoppervlakte.

De stromingsexponent n stijgt van circa 0,55 naar waarden tot ongeveer 0,63. Dit bevestigt dat brede kieren grotendeels zijn geëlimineerd en dat het resterende lekgedrag wordt bepaald door fijnere, beter gecontroleerde lekpaden.

	C (m ³ /(h*Pa ⁿ))	n (-)	q_{50,DI}L_{min} (m ³ /(h*m))	q_{50,DI}L_{max} (m ³ /(h*m))	q_{50,DI}A (m ³ /(h*m ²))	q_{50,DI}L (m ³ /(h*m))
ARE2a-DI (plaat)	5,02	0,55	4,11	4,91	9,16	4,49
ARE2b-DI (plaat)	2,54	0,55	1,79	2,95	4,68	2,30
ARE2c-DI (plaat)	10,15	0,56	8,33	10,46	19,05	9,33
ARE2d1-DI (plaat)	3,58	0,55	2,70	3,91	6,63	3,25
ARE2d2-DI (plaat)	2,71	0,55	2,09	2,93	5,04	2,47
ARE2e1-DI (plaat)	1,17	0,61	1,24	1,46	2,75	1,35
ARE2e2-DI (plaat)	1,27	0,60	1,26	1,51	2,82	1,38
ARE2e3-DI (plaat)	0,96	0,63	0,60	2,25	2,37	1,16
ARE2f1-DI (plaat)	1,15	0,61	1,21	1,45	2,71	1,33
ARE2f2-DI (plaat)	1,10	0,58	0,98	1,30	2,30	1,13

Tabel 18: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en q_{50A}/L van ARE2 (DI)

De q_{50,DI}L-waarden dalen uitgesproken: van circa 4–9 m³/(h·m) bij enkelvoudige afdichting, tot circa 1,1–1,4 m³/(h·m) bij dubbele en drievoudige afdichting.

De betrouwbaarheidsintervallen blijven in alle configuraties beperkt, wat wijst op stabiele meetcondities en een hoge reproduceerbaarheid binnen de atelieropstelling.

	q_{100,DI}A (m ³ /(h*m ²))	klasse (-)	q_{100,DI}L (m ³ /(h*m))	klasse (-)
ARE2a-DI (plaat)	13,40	2	6,57	2
ARE2b-DI (plaat)	6,87	3	3,36	2
ARE2c-DI (plaat)	28,00	1	13,72	0
ARE2d1-DI (plaat)	9,73	2	4,77	2
ARE2d2-DI (plaat)	7,40	3	3,63	2
ARE2e1-DI (plaat)	4,20	3	2,06	3
ARE2e2-DI (plaat)	4,28	3	2,10	3
ARE2e3-DI (plaat)	3,66	3	1,79	3
ARE2f1-DI (plaat)	4,15	3	2,03	3
ARE2f2-DI (plaat)	3,45	3	1,69	3

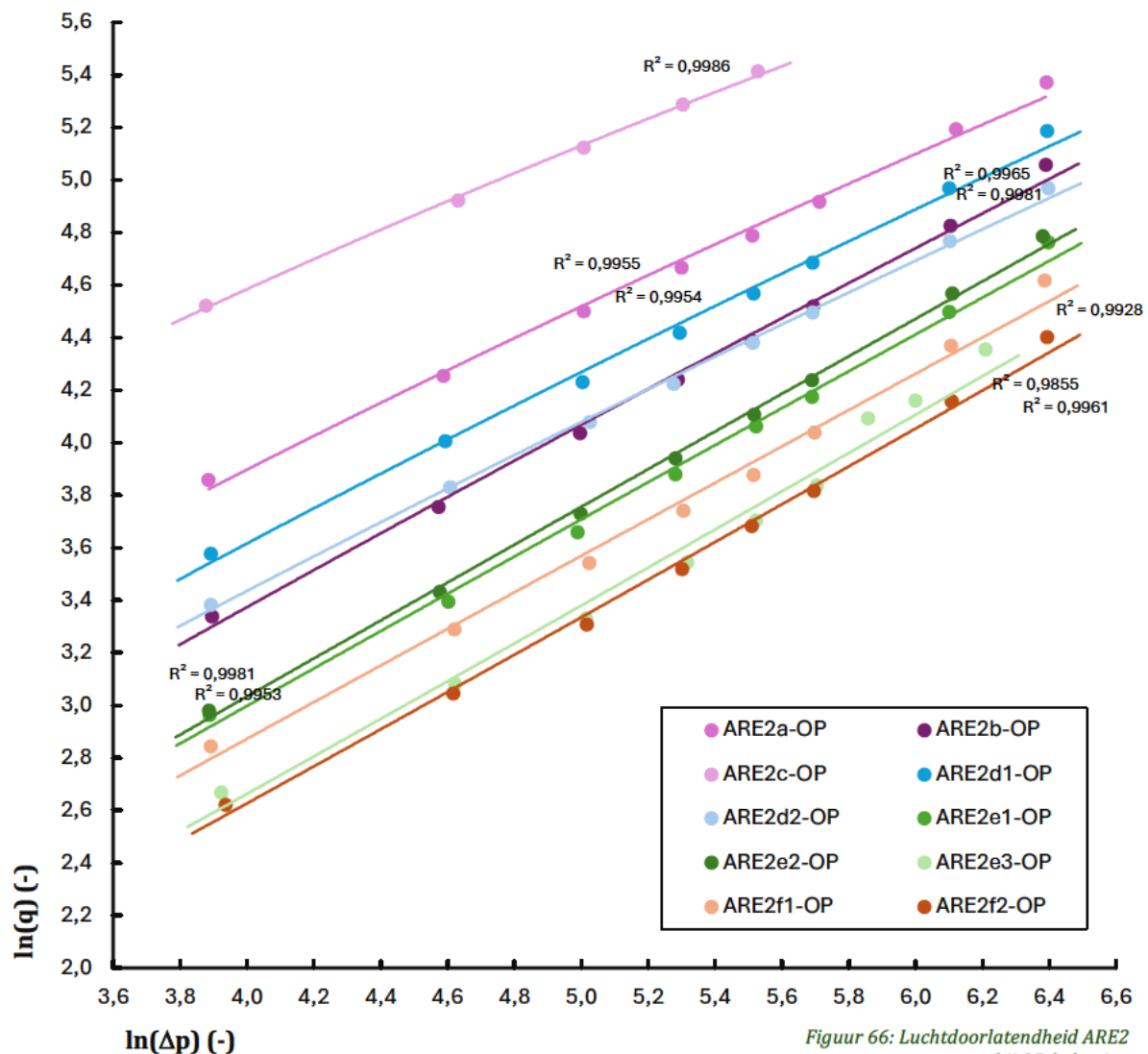
Tabel 19: klassen en q_{100A}/L van ARE2 (DI)

Onder DI-belasting evolueert de classificatie duidelijk met het aantal afdichtingen: enkelvoudige configuraties behalen maximaal Klasse 1–2. Dubbele en drievoudige configuraties behalen consistent Klasse 3 (op basis van $q_{100,A}$ en/of $q_{100,L}$).

8.3.2 Resultaten bij OP-belasting (atelier)

Net zoals bij DI-belasting is een duidelijke rangorde zichtbaar: ARE_{2c} (enkel buitenafdichting) vertoont het hoogste debiet, gevolgd door ARE_{2a} , terwijl configuraties met meervoudige afdichting opnieuw het laagste debiet vertonen.

De helling van de curves neemt bij de meest performante configuraties toe ($n \approx 0,70-0,74$), wat wijst op een verdere verschuiving naar een laminairer stromingsregime.



De C-waarden onder OP-belasting volgen dezelfde trend als bij DI-belasting, maar liggen systematisch hoger. Dit bevestigt dat OP-belasting kritischer is voor de afdichtingsprestatie.

	C (m ³ /(h*Pa ⁿ))	n (-)	q_{50,OP}L_{min} (m ³ /(h*m))	q_{50,OP}L_{max} (m ³ /(h*m))	q_{50,OP}A (m ³ /(h*m ²))	q_{50,OP}L (m ³ /(h*m))
ARE2a-OP (plaat)	4,45	0,60	3,89	6,19	10,01	4,91
ARE2b-OP (plaat)	1,85	0,69	2,12	3,87	5,84	2,86
ARE2c-OP (plaat)	11,34	0,54	8,76	10,89	19,93	9,76
ARE2d1-OP (plaat)	2,88	0,64	2,76	4,91	7,51	3,68
ARE2d2-OP (plaat)	2,51	0,63	2,64	3,60	6,29	3,08
ARE2e1-OP (plaat)	1,12	0,72	1,26	2,99	3,96	1,94
ARE2e2-OP (plaat)	1,13	0,73	1,55	2,64	4,12	2,02
ARE2e3-OP (plaat)	0,73	0,74	0,68	2,77	2,80	1,37
ARE2f1-OP (plaat)	1,02	0,71	0,99	2,95	3,49	1,71
ARE2f2-OP (plaat)	0,74	0,73	0,84	2,11	2,72	1,33

Tabel 20: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en q_{50A}/L van ARE2 (OP)

Ondanks de licht stijgende trend van de q₁₀₀-waarden, blijven de klassen onder OP-belasting quasi gelijk, op enkele uitzonderingen na.

	q_{100,OP}A (m ³ /(h*m ²))	klasse (-)	q_{100,OP}L (m ³ /(h*m))	klasse (-)
ARE2a-OP (plaat)	15,20	2	7,45	1
ARE2b-OP (plaat)	9,42	2	4,61	2
ARE2c-OP (plaat)	28,96	1	14,19	0
ARE2d1-OP (plaat)	11,70	2	5,73	2
ARE2d2-OP (plaat)	9,73	2	4,77	2
ARE2e1-OP (plaat)	6,52	3	3,19	2
ARE2e2-OP (plaat)	6,82	3	3,34	2
ARE2e3-OP (plaat)	4,67	3	2,29	2
ARE2f1-OP (plaat)	5,69	3	2,79	2
ARE2f2-OP (plaat)	4,49	3	2,20	3

Tabel 21: klassen en q_{100A}/L van ARE2 (OP)

8.3.3 Samenvattende observaties

De samenvattende tabellen voor ⁴ARE₂ tonen een duidelijke verdere reductie van de luchtdoorlatendheid ten opzichte van de minimale restauratiestrategieën (⁴ARE₁), maar met een ander karakter en verloop. Waar binnen ⁴ARE₁ vooral brede kieren progressief werden gereduceerd, wordt binnen ⁴ARE₂ het resterende lekgedrag systematisch verfijnd door gerichte variatie in afdichtingsconfiguraties.

	q_{50,DI}A (m ³ /(h*m ²))	q_{50,DI}L (m ³ /(h*m))	q_{50,OP}A (m ³ /(h*m ²))	q_{50,OP}L (m ³ /(h*m))	q₅₀A (m ³ /(h*m ²))	q₅₀L (m ³ /(h*m))
ARE2a (plaat)	9,16	4,49	10,01	4,91	9,59	4,70
ARE2b (plaat)	4,68	2,30	5,84	2,86	5,26	2,58

ARE2c (plaat)	19,05	9,33	19,93	9,76	19,49	9,55
ARE2d1 (plaat)	6,63	3,25	7,51	3,68	7,07	3,47
ARE2d2 (plaat)	5,04	2,47	6,29	3,08	5,67	2,78
ARE2e1 (plaat)	2,75	1,35	3,96	1,94	3,36	1,65
ARE2e2 (plaat)	2,82	1,38	4,12	2,02	3,47	1,70
ARE2e3 (plaat)	2,37	1,16	2,80	1,37	2,59	1,27
ARE2f1 (plaat)	2,71	1,33	3,49	1,71	3,10	1,52
ARE2f2 (plaat)	2,30	1,13	2,72	1,33	2,51	1,23

Tabel 22: Samenvattende waarden voor q_{50} van ARE2

De $q_{50,OPL}$ - en $q_{50,DIL}$ -waarden dalen verder over de opeenvolgende ARE_2 -configuraties. In vergelijking met de beste ARE_1 -configuraties wordt een bijkomende reductie waargenomen, zij het met afnemende absolute winst per stap. Dit wijst erop dat binnen ARE_2 voornamelijk het residuele lekdebiet wordt aangepakt, dat reeds aanzienlijk kleiner is dan in de uitgangssituatie.

De spreiding tussen $q_{50,OPL}$ en $q_{50,DIL}$ blijft beperkt, wat erop wijst dat de verbeteringen zich niet exclusief manifesteren onder één belastingsrichting, maar het globale luchtlekgedrag van het raam beïnvloeden. De gemiddelde waarden (q_{50A} en q_{50L}) bevestigen deze verdere verschuiving naar lagere orde van grootte, zonder abrupte sprongen tussen opeenvolgende configuraties.

	q_{100,OPA}	klasse	q_{100,OPL}	klasse	q_{100A}	klasse	q_{100L}	klasse
	(m ³ /(h*m ²))	(-)	(m ³ /(h*m))	(-)	(m ³ /(h*m ²))	(-)	(m ³ /(h*m))	(-)
ARE2a (plaat)	15,20	2	7,45	1	14,30	2	7,01	1
ARE2b (plaat)	9,42	2	4,61	2	8,14	3	3,99	2
ARE2c (plaat)	28,96	1	14,19	0	28,48	1	13,95	0
ARE2d1 (plaat)	11,70	2	5,73	2	10,71	2	5,25	2
ARE2d2 (plaat)	9,73	2	4,77	2	8,56	3	4,20	2
ARE2e1 (plaat)	6,52	3	3,19	2	5,36	3	2,63	2
ARE2e2 (plaat)	6,82	3	3,34	2	5,55	3	2,72	2
ARE2e3 (plaat)	4,67	3	2,29	2	4,16	3	2,04	3
ARE2f1 (plaat)	5,69	3	2,79	2	4,92	3	2,41	2
ARE2f2 (plaat)	4,49	3	2,20	3	3,97	3	1,95	3

Tabel 23: Samenvattende waarden voor q_{100} en klassen van ARE2

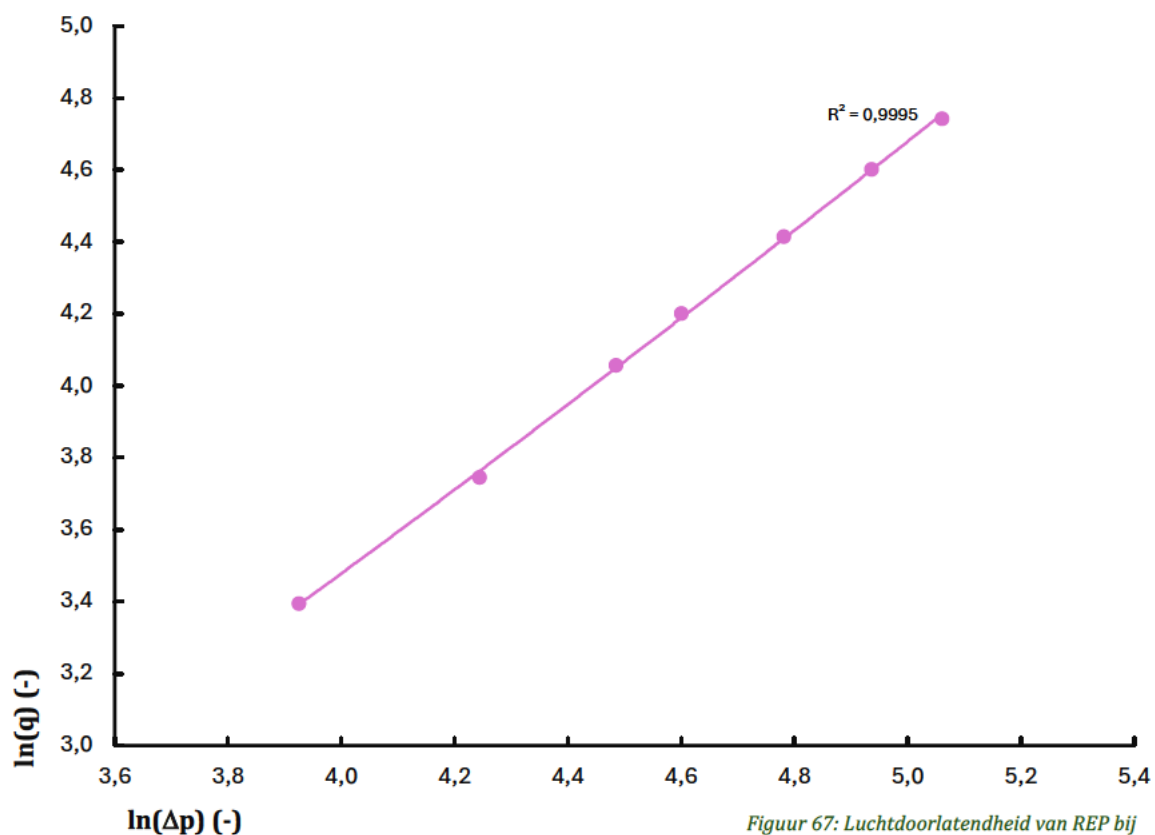
Op basis van de q_{100} -waarden situeren de meeste ARE_2 -configuraties zich in hogere luchtdichtheidsklassen dan ARE_1 . Zowel de classificatie per oppervlakte als per voeglengthe verbetert, waarbij in meerdere gevallen een hogere eindklasse wordt bereikt. De classificatie toont dat, hoewel ARE_2 niet is opgevat als normatief toepasbare restauratie, de experimentele afdichtingsconfiguraties prestaties benaderen die typisch zijn voor hoogwaardig nieuw schrijnwerk.

8.4 Reproductiemodel (SREP_2)

De druk-debietcurve van het reproductiemodel (SREP_2) vertoont een uitgesproken quasi-lineair verloop over het volledige gemeten drukbereik. De regressielijn situeert zich significant lager dan alle historische en gerestaureerde configuraties, wat wijst op een substantieel gereduceerd luchtlekdebiet.

De helling van de regressielijn is beduidend steiler dan bij vorige configuraties. Dit wijst op een fundamenteel verschillend stromingsregime, waarbij het luchtlekgedrag niet langer wordt gedomineerd door kieren of spleten, maar door zeer fijne restlekken.

De hoge determinatiecoëfficiënt ($r^2 \approx 1,00$) bevestigt de stabiliteit van de meting en de homogeniteit van het lekmechanisme.



Figuur 67: Luchtdoorlatendheid van REP bij OP-belasting (in situ)

De lekcoëfficiënt $C = 0,27 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ ligt een orde van grootte lager dan bij de experimentele ARE_2 -configuraties. Dit bevestigt dat de effectieve lekoppervlakte van het reproductiemodel minimaal is.

De stromingsexponent $n = 1,20$ wijkt sterk af van de waarden vastgesteld bij historisch schrijnwerk. Deze hoge n-waarde duidt op een quasi-laminaire stroming, wat consistent is met een raamconcept zonder doorlopende kieren en met uniforme, elastisch samengedrukte afdichtingen.

De $q_{50,0pL}$ bedraagt $3,03 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$, met een beperkt betrouwbaarheidsinterval $[2,34 - 3,94]$. De smalle intervalbreedte bevestigt een hoge meetnauwkeurigheid en een geringe gevoeligheid voor drukfluctuaties. Ook de $q_{50,0pA} = 6,19 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ situeert zich duidelijk onder alle historische en experimentele configuraties, wat de betere luchtdichtheid van het reproductiemodel bevestigt.

Op basis van de q_{100} -waarden wordt voor SREP2 bekomen: per oppervlakte ($q_{100,A} = 14,22 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$) klasse 2 en per voeglengte ($q_{100,L} = 6,97 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$): klasse 1. Conform EN 12207 wordt de gunstigste klasse gehanteerd als eindbeoordeling. Het reproductiemodel wordt aldus geclassificeerd als Klasse 2.

	C ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Pa}^n)$)	n (-)	$q_{50,0pL_{\min}}$ ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$)	$q_{50,0pL_{\max}}$ ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$)	$q_{50,0pA}$ ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)	$q_{50,0pL}$ ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$)
SREP2 (folie)	0,27	1,20	2,34	3,94	6,19	3,03

Tabel 24: regressieparameters, betrouwbaarheidsintervallen en $q_{50A/L}$ van SREP2 (OP)

	$q_{100,0pA}$ ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$)	klasse (-)	$q_{100,0pL}$ ($\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$)	klasse (-)
SREP2 (folie)	14,22	2	6,97	1

Tabel 25: klassen en $q_{100A/L}$ van SREP2 (OP)

Het reproductiemodel vertoont een fundamenteel ander luchtlekgedrag dan historisch schrijnwerk, gekenmerkt door een sterk gereduceerde lekcoëfficiënt en een stromingsexponent die wijst op quasi-laminaire stroming. De luchtdichtheid ligt systematisch hoger dan bij alle gerestaureerde en experimentele configuraties, en vormt daarmee een bovengrens voor de prestaties die binnen een erfgoedconform raamconcept haalbaar zijn.

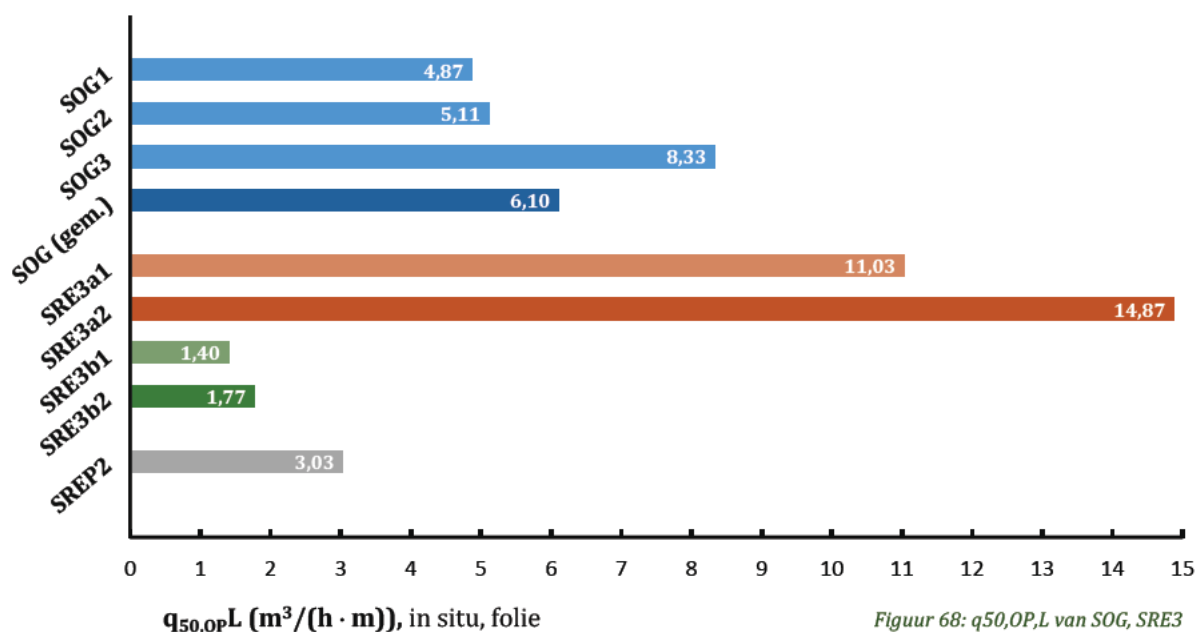
9. Discussie

9.1 Status quo van de restauratiepraktijk

De analyse van de in-situ gemeten configuraties biedt een helder beeld van de huidige restauratiepraktijk zoals toegepast door bouwfirma *Denys*, en vormt het vertrekpunt voor een kritische evaluatie van zowel technische effectiviteit als erfgoedkundige en economische haalbaarheid.

9.2 Oorspronkelijke schrijnwerk SOG als uitgangsniveau

Het oorspronkelijke schrijnwerk vertoont, zoals verwacht, een beperkte luchtdichtheid. De gemeten $q_{50,OP}L$ -waarden (OP-belasting, folie, in situ) situeren zich overwegend in de lagere luchtdichtheidsklassen, wat consistent is met de constructieve kenmerken van historisch schrijnwerk. Gemiddeld heeft het oorspronkelijk schrijnwerk ($^SOG_{gem}$) een $q_{50,OP}L$ -waarde van 6,10 $m^3/(h \cdot m)$. Ze behoort tot luchtdichtheidsklasse 2 (oppervlakte) en 1 (lengtevoeg), wat de eindklasse tot 2 brengt (enkel op basis van OP-belasting).



Figuur 68: $q_{50,OP}L$ van SOG , SRE3 en SREP

9.2.1 In situ restauratie zonder gesloten afdichtingscontour SRE3a1

De configuratie SRE3a1 (klasse 1 onder OP-belasting) vertegenwoordigt een volledig gerestaureerd historisch raam, waarbij het schrijnwerk werd rechtgetrokken, geschuurd, voegen werden gevuld en het raam opnieuw werd afgewerkt, waarbij één rubberen dichting werd toegevoegd en geen afdichting werd voorzien in de wolfbekken. Ondanks deze ingrepen blijkt SRE3a1 slechter te presteren dan het gemiddelde origineel raam.

Deze vaststelling suggereert twee structurele problemen. Enerzijds *ontbreekt een gesloten afdichtingscontour* door het niet afdichten van de wolfbekken. Anderzijds wordt het *raakvlak*

tussen dichting en schrijnwerk niet gecontroleerd, waardoor voldoende contact tussen kader en vleugel niet gegarandeerd is. Hoewel sRE_3a1 qua restauratiestappen inhoudelijk sterk aansluit bij de geoptimaliseerde atelierconfiguratie ${}^A RE_1d$ (klasse 2 onder OP-belasting), ontbreekt in situ de mogelijkheid om het effectieve contact van de dichting systematisch te verifiëren en bij te sturen.

Een meer relevante vergelijking situeert zich tussen sRE_3a1 en sREP_2 (klasse 2 onder OP-belasting), aangezien beide configuraties vertrekken van één enkele dichting binnen een gelijkaardig praktijkkader. De resultaten tonen aan dat sREP_2 beter presteert dan sRE_3a (daling van respectievelijk circa 50% en -55% t.o.v. ${}^sOG_{gem}$), wat bevestigt dat de combinatie van gesloten contour en gegarandeerd contact bepalend is voor luchtdichtheid. Daarnaast toont dit ook hoe geometrische perfectie een grote meerwaarde biedt bij de effectiviteit van de dichting. Welk van die twee meer invloed heeft op der performantie, blijft een vraagteken tot nog toe.

9.2.2 Achterzetraam als pragmatische oplossing ${}^sRE_3b1-2$

De toevoeging van een achterzetraam (${}^sRE_3b1-2$) resulteert in een uitgesproken verbetering van de luchtdichtheid, waarbij systematisch een hoge luchtdichtheidsklasse (klasse 4 voor beide modellen, op basis van OP-belasting) wordt bereikt. De prestatiewinst ten opzichte van ${}^sOG_{gem}$ is aanzienlijk en overstijgt ruimschoots de winst die met enkelvoudige restauratieve dichtingen wordt gerealiseerd.

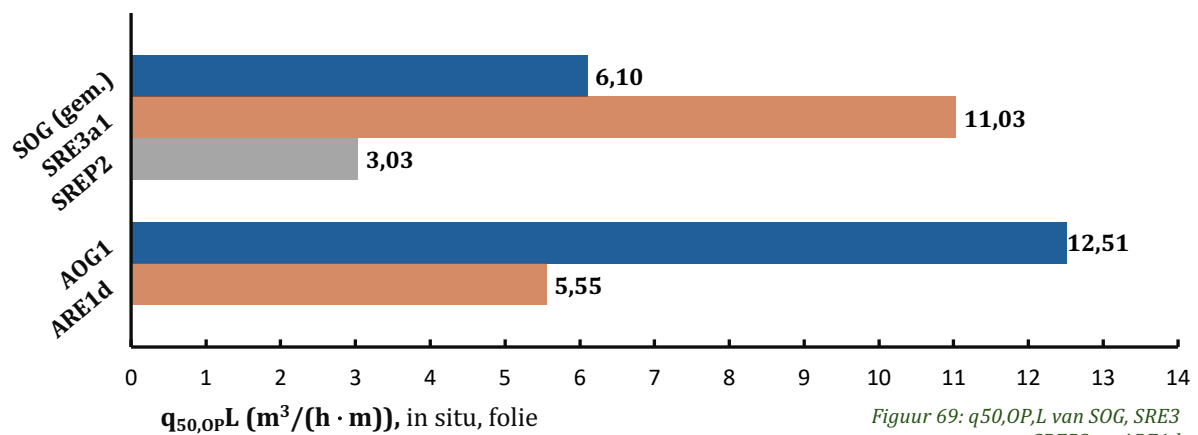
Deze vaststelling roept een fundamentele vraag op naar de *verhouding tussen arbeidsinzet en prestatiewinst*. Wanneer door de plaatsing van een achterzetraam reeds een hoge luchtdichtheidsklasse wordt bereikt, is het dan technisch en economisch verdedigbaar om het oorspronkelijke raam bijkomend van dichtingen te voorzien? Deze ingrepen zijn arbeidsintensief, blijven sterk afhankelijk van de uitvoeringskwaliteit en leveren slechts een beperkte bijkomende winst.

Bijkomend kan de vraag gesteld worden of deze erfgoedconforme oplossing wel écht respect toont voor het historische: het achterzetraam elimineert elke voeling met het oorspronkelijk schrijnwerk en reduceert de ruimtelijke ervaring tot een hedendaagse schilderij in een historisch kader. In die zin zet het behoud van erfgoed aan tot de afbreuk ervan. *Het achterzetraam corrigeert niet, maar verbergt. Het historische schrijnwerk blijft technisch disfunctioneel en wordt gereduceerd tot een decoratief reliek achter een performant masker.*

9.2.3 Reproductiemodel sREP_2 : geen benchmark, maar spiegel

sREP_2 werd initieel opgevat als benchmark voor maximale performantie binnen historische vormgeving. De meetresultaten tonen echter aan dat sREP_2 niet systematisch beter presteert dan geoptimaliseerde restauratieconfiguraties. In vergelijking met sRE_3a1 is sREP_2 aanzienlijk beter, maar ten opzichte van sRE_3b en meerdere ${}^A RE_2$ -configuraties blijft het duidelijk achter.

De vergelijking kan worden gemaakt tussen sREP_2 en ${}^A RE_1d$. Relatief ten opzichte van het ${}^sOG_{gem}$ verbetert sREP_2 de luchtdichtheid met ongeveer 50%, terwijl ${}^A RE_1d$ een verbetering van circa 47% realiseert ten opzichte van ${}^A OG_1$. Deze gelijkaardige orde van grootte toont aan dat het potentieel van een restauratie vergelijkbaar is met dat van een reproductiemodel, zij het dat deze prestatie bij restauratie slechts wordt bereikt via een intensief en moeilijk te standaardiseren optimalisatieproces.



Figuur 69: q_{50,OP,L} van SOG, SRE3 en SREP2 en ARE1d

SREP₂ fungeert daarmee niet als absolute benchmark, maar als spiegel die blootlegt dat “nieuw” niet automatisch “beter” betekent, en dat performantie het resultaat is van *detaillering, contact en gesloten contouren*, eerder dan van nieuwbouwstatus.

9.2.4 Synthese: status quo onder spanning

De status quo van de restauratiepraktijk wordt gekenmerkt door een spanningsveld tussen eenvoud, controleerbaarheid en maximale performantie. Minimale restauratie met één dichting kan theoretisch werken, maar faalt in situ vaak door gebrek aan controle en geslotenheid. Het achterzetraam levert robuuste prestaties tegen relatief beperkte onzekerheid, maar reduceert de rol van het oorspronkelijke raam. Geoptimaliseerde restauratie kan concurreren met reproductie, maar vraagt een mate van precisie en arbeidsinzet die in de praktijk moeilijk schaalbaar is.

Deze vaststellingen vormen de basis voor de verdere analyse, waarin de randvoorwaarden voor het slagen of falen van een enkelvoudige dichting worden geïdentificeerd en waarin later wordt onderzocht hoe bijkomende afdichtingsstrategieën deze randvoorwaarden reduceren of elimineren.

9.3 Eén dichting ${}^A RE_1$: randvoorwaarden voor slagen en structureel falen

De in-situ-resultaten tonen het falen van ${}^S RE_3$ binnen een realistische praktijkcontext, terwijl de atelierresultaten (${}^A RE_1$) toelaten om de onderliggende mechanismen systematisch te ontleden. Door beide perspectieven te combineren, worden de bepalende randvoorwaarden voor het functioneren van een enkelvoudige dichting expliciet gemaakt.

9.3.1 ${}^S RE_{3a}$ in situ: een volledige restauratie zonder gesloten afdichtingscontour

${}^S RE_{3a}$ werd in zijn geheel gerestaureerd volgens de standaardprocedure: een arbeidsintensief, complex proces. ${}^S RE_{3a}$ omvat nagenoeg alle restauratieve stappen die ook in de ateliersequentie ${}^A RE_1$ worden onderzocht, met uitzondering van een systematische controle op het effectieve contact van de dichting en het aanbrengen van afdichting ter hoogte van de bol- en holverbindingen.

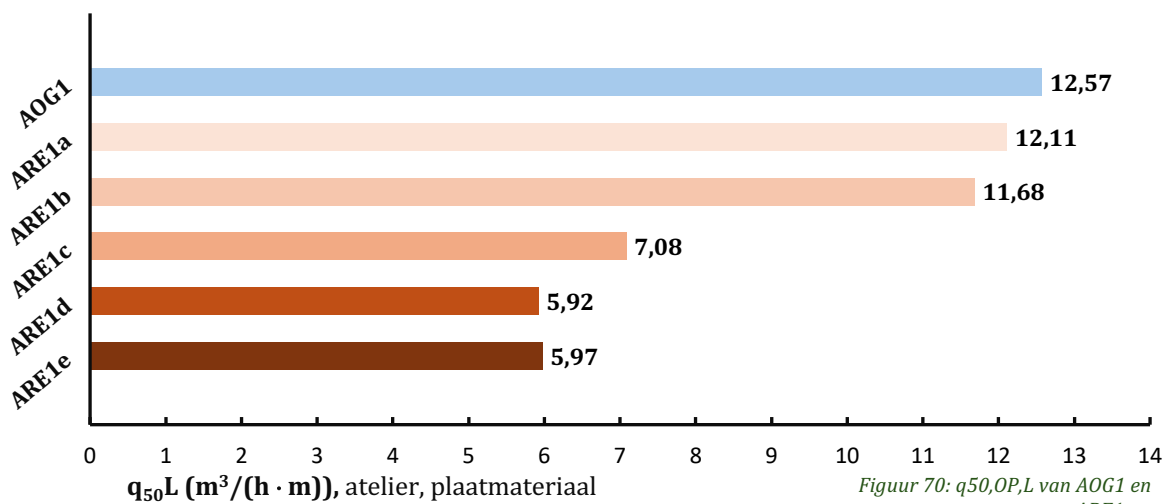
In situ faalt de restauratie van ${}^S RE_{3a}$, en minstens één oorzaak voor dit falen kan met zekerheid worden geïdentificeerd: het ontbreken van een gesloten afdichtingscontour door het niet afdichten van de wolfbekken. Hierdoor blijft de afdichtingslijn lokaal onderbroken en is het aannemelijk (maar binnen dit onderzoek niet experimenteel bewezen) dat daar ook het ontbreken van een gecontroleerd en uniform contact tussen dichting en tegenvlak bijdraagt tot de beperkte prestaties.

9.3.2 ${}^A RE_1$ -sequentie als analytische dissectie van restauratie-effecten

De eerste stappen binnen ${}^A RE_1$ tonen aan dat het louter toevoegen van een dichting, zelfs wanneer deze doorlopend wordt aangebracht, slechts een beperkte invloed heeft op de luchtdichtheid: t.o.v. ${}^A OG_1$ daalt de q_{50} -waarde van 12,57 m³/(h·m) tot 12,11 m³/(h·m) door louter de toevoeging van de dichting (het dichten van de hout-op-hout-verbindingen van het vaste kader in ${}^A RE_{1b}$ heeft zelfs een grotere impact dan het plaatsen van een dichting, met name een verdere daling tot 11,68 m³/(h·m)).

Een grote verbetering treedt pas op wanneer in ${}^A RE_{1c}$ het sluitgedrag van de raamvleugels actief wordt gecorrigeerd (de vleugels zitten nu terug volledig in hun vlak, maar lokale vervormingen en krommingen treden nog op). Het rechte trekken van de draaiende delen en het maximaliseren van het effectieve sluitvlak resulteert in een duidelijke reductie van het gemeten luchtdebiet. Hierbij is van belang dat, ondanks deze correcties, restspelingen van meerdere millimeters (< 7 mm) blijven bestaan. De klasse verhoogt tot klasse 2 (OP- en DI-belasting), en q_{50L} -waarde bereikt 7,08 m³/(h·m).

Wanneer vervolgens via een eenvoudige controlemethode (krijt of verf aanbrengen, raam sluiten en terug openen) werd nagegaan of de dichting daadwerkelijk over haar volledige lengte raakt en delen worden bijgefreed of opgevuld, wordt het luchtlekdebiet nog eens aanzienlijk verkleint tot 5,92 m³/(h·m) (q_{50L}). Pas in deze fase benadert ${}^A RE_1$ prestatieniveaus die vergelijkbaar zijn met die van het reproductiemodel (relatieve verbetering: beide presteren circa 50% beter dan hun respectievelijke ${}^A/{}^S OG$ -variant).



Figuur 70: $q_{50,OP,L}$ van AOG1 en ARE1a-e

Ten slotte blijkt uit de toepassing van alternatieve rubbertypes (ARE_{1e}) dat de materiaalkeuze slechts een marginale invloed heeft op de luchtdichtheid wanneer de geometrische en contactvoorwaarden reeds zijn geoptimaliseerd. De bijkomende prestatiewinst blijft beperkt in verhouding tot de eerdere stappen, wat erop wijst dat materiaalkeuze binnen ARE_1 en secundaire optimalisatieparameter is en geen fundamentele hefboom.

De resultaten van ARE_1 tonen aan dat een enkelvoudige dichting technisch kan functioneren, maar slechts onder een strikte samenloop van voorwaarden: een gesloten afdichtingscontour, correct sluitend raam en vooral een *gecontroleerd* en uniform contact over de volledige omtrek. Deze voorwaarden verklaren retrospectief waarom RE_3 in situ faalt en illustreren tegelijk waarom een dergelijke optimalisatie in de praktijk moeilijk reproduceerbaar en foutgevoelig blijft. Maar, ondanks de halvering van de q_{50} -waarde ($12,57 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}) \rightarrow 5,90 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m})$), is de klasseverhoging beperkt tot een stijging van klasse 1 naar klasse 2, die al bij ARE_{1c} plaatsvindt.

9.3.3 De voorwaarden: continuïteit, uitvoeringskwaliteit en controle

Een eerste noodzakelijke voorwaarde is de aanwezigheid van een *gesloten en zo weinig mogelijk onderbroken afdichtingscontour*. In het kader van dit onderzoek werden verschillende kritieke zones geïdentificeerd waar de continuïteit van de dichting in de praktijk moeilijk te realiseren blijkt.

In hoekpunten werd vastgesteld dat het onderbreken van de dichting in twee afzonderlijke stukken, onder een hoek van 45° , leidt tot lokale lekken. Een continue plaatsing van de dichting in één stuk rond de hoek bleek daarentegen een duidelijke verbetering op te leveren.

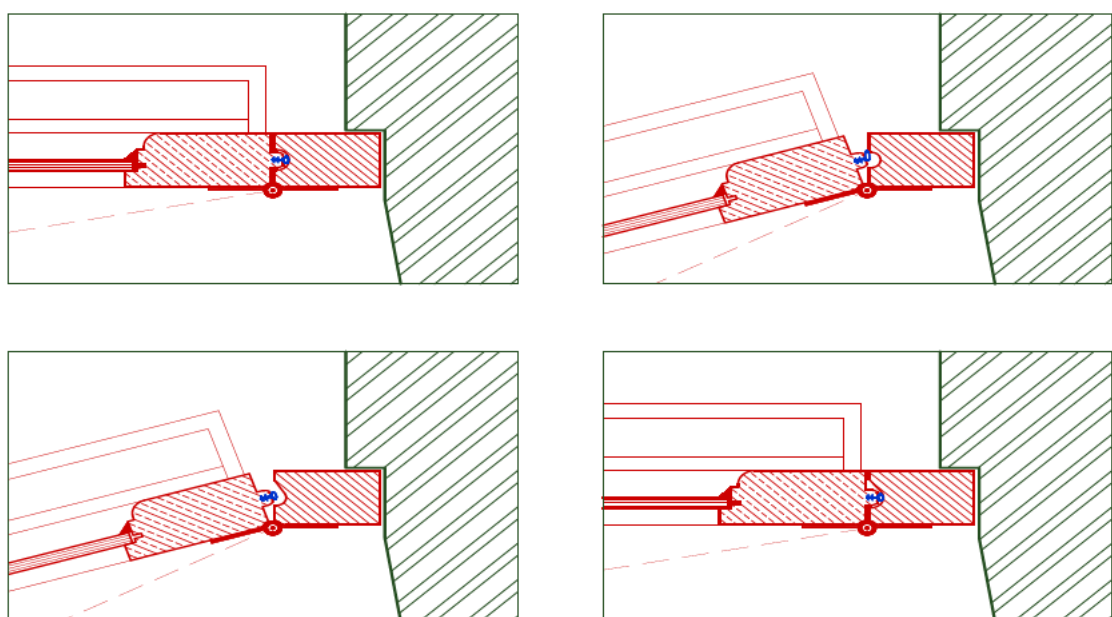
Daarnaast is het fundamenteel dat de toevoeging van een dichting altijd over de volledige contour gebeurt. De speling die voorzien moet worden om slechts een deel van de contour te voorzien van een dichting zorgt ervoor dat de niet gedichtte delen veel meer lekken kunnen vertonen.

Daarnaast is het *herstel van de geometrische basiscondities* van het schrijnwerk fundamenteel. Het raam moet in gesloten toestand voldoende haaks en vlak in het kader passen, zonder uitgesproken kromming of torsie. Het realiseren van deze toestand leidt tot een significante prestatiewinst, zoals duidelijk blijkt uit de overgang naar $^ARE_{1C}$.

Het rechtstellen van historisch schrijnwerk blijft echter een economische en praktische afweging. Hoewel geometrische perfectie technisch mogelijk is, vergt zij een zeer hoge arbeidsinzet, en wordt zij in de praktijk zelden volledig doorgevoerd. Deze aanpak impliceert doorgaans volledige demontage, individuele bijstelling van elk onderdeel en soms zelfs het toevoegen van stalen platen in het kader om latere vervorming tegen te gaan. In deze case study werd het schrijnwerk rechtgeschuurd en gefreesd binnen de grenzen van het haalbare, zonder te streven naar absolute geometrische perfectie.

De *systematische controle en bijstelling van het effectieve contact* tussen dichting en tegenvlak versterkt het resultaat van het herstel van de geometrische basiscondities. Bij een geometrisch quasi-perfect raam, zoals het reproductiemodel (sREP_2), is uniform contact van de dichting grotendeels gegarandeerd wanneer deze correct wordt ingefreesd. Bij historische ramen daarentegen, die nooit volledig recht kunnen worden hersteld, volstaat een correcte infreesstrategie niet. In dat geval is een expliciet controlemechanisme noodzakelijk om te verifiëren of de dichting daadwerkelijk en uniform wordt aangesproken.

Deze problematiek manifesteert zich, bij voorbeeld, ter hoogte van de bol-en-hol-verbindingen. Het O-profiel dat in de bolle zijde van het raam werd aangebracht, bleek in geen geval consistent en uniform contact te maken met het holle kaderprofiel (Figuur 71). Hierdoor ontstaan zones zonder effectieve afdichting, ondanks een visueel correcte positionering van de dichting. Een mogelijke oplossing wordt daarbij geïllustreerd: de detaillering van de bol-en-hol-verbinding wordt lokaal aangepast om een meer continu en controleerbaar afdichtingsvlak te creëren.



Figuur 71: grafische weergave van gebrekkig contact tussen dichting en kader

In een ideaal scenario zou de bol-en-hol-verbinding volledig worden opgeheven en vervangen door een uniforme trapverbinding, analoog aan de overige raamzijden, zodat de dichting zonder onderbreking en met een constante geometrie kan doorlopen. Dit principe werd binnen dit onderzoek niet experimenteel gevalideerd en blijft bijgevolg hypothetisch, maar sluit logisch aan bij de vastgestelde relatie tussen geometrische consistentie, uitvoeringscontrole en afdichtingsperformantie.

Een ander voorbeeld, waar de dichting te weinig contact had, was ter hoogte van het midden van de twee draaiende delen (achter de espagnoetsluiting). Een lichte, lokale kromming resulteerde in een onzichtbare dichting die geen contact maakte met het ontvangende profiel. Een oplossing bestond uit het opvullen van dit tekort aan materiaal met een nieuw houten latje, en resulteerde in 4RE_1d .

9.3.4 Materiaalkeuze als secundaire factor

De overstap naar alternatieve rubberprofielen in 4RE_1e resulteert slechts in een marginale bijkomende verbetering (in dit geval een daling van de q_{50} -waarde van $0,05 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$). Deze vaststelling bevestigt dat, eenmaal continuïteit en raakcontact zijn gerealiseerd, de invloed van het specifieke rubbertype beperkt blijft. Materiaalkeuze kan het resultaat verfijnen, maar het is geen hefboom voor fundamentele prestatiewinst.

Tegelijkertijd mag de rol van materiaalkeuze niet volledig worden geminimaliseerd. De beperkte gevoeligheid voor verschillende rubbertypes onderstreept net *de nood aan dichtingen met een groot en tolerant werkingsinterval*, die beter kunnen omgaan met restspelingen en lokale geometrische afwijkingen. Ook al zou de algemene efficiëntie van dergelijk profiel minder hoog liggen, alsnog een grote impact kunnen hebben. Dit soort profiel, dat in de praktijk de foutgevoeligheid van het restauratieproces kan reduceren, bleek niet beschikbaar volgens Denys.

9.3.5 4RE_1 als technisch haalbaar maar praktisch kwetsbaar optimum

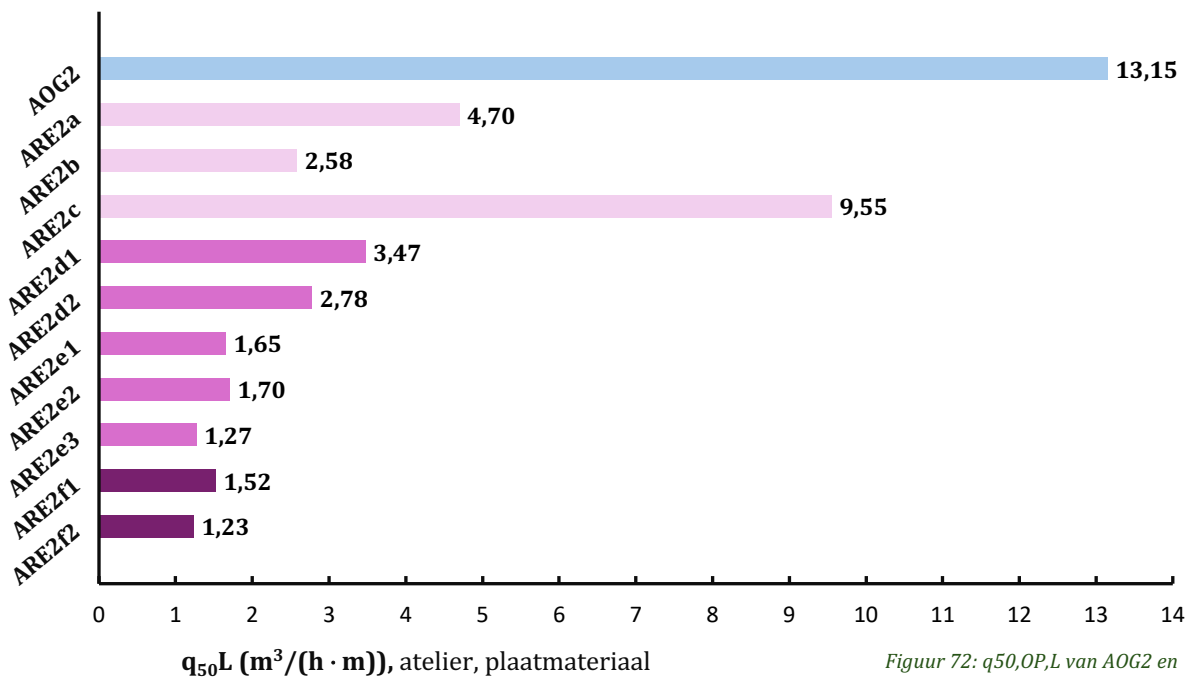
Hoewel de ateliersequentie aantoont dat een enkelvoudige dichting onder optimale omstandigheden kan leiden tot een degelijk luchtdichtheidsniveau, blijkt uit het experimentele traject dat dit resultaat enkel wordt bereikt via een complex en iteratief optimalisatieproces.

In de dagelijkse restauratiepraktijk is een dergelijke aanpak echter moeilijk schaalbaar. Historisch schrijnwerk vertoont aanzienlijke variaties in geometrie en slijtage, waardoor elk raam een individuele afstelling vereist. Kleine afwijkingen hebben bovendien een disproportioneel groot effect op de luchtdichtheid, wat het eindresultaat sterk afhankelijk maakt van vakmanschap en uitvoeringszorg.

4RE_1 kan in die zin worden beschouwd als een *gevoelig optimum*: technisch valide, maar praktisch kwetsbaar en moeilijk reproduceerbaar binnen een gestandaardiseerd restauratieproces. Deze vaststelling verklaart (samen met de erfgoedeisen) waarom in de praktijk vaak wordt teruggevallen op aanvullende maatregelen, zoals achterzetramen, en waarom strategieën die intrinsiek minder afhankelijk zijn van fijnmazige afstelling structureel robuuster blijken.

9.4 Doorlopende afdichting en rendement: kwantificatie ${}^A RE_2$

Waar ${}^A RE_1$ eindigt met het identificeren van randvoorwaarden waaraan moet worden voldaan om een dichting te laten functioneren, vertrekt ${}^A RE_2$ vanuit een andere logica. Er wordt onderzocht in welke mate zij *ontwerpmatig kunnen worden vereenvoudigd of geëlimineerd* door alternatieve restauratiemethodieken toe te passen.



Door het inzetten van meervoudige en/of strategisch gepositioneerde dichtingen wordt de werking van het afdichtingsconcept minder gevoelig voor geometrische imperfecties, variaties in infreesdiepte en uitvoeringsfouten. ${}^A RE_2$ fungeert daarbij niet alleen als experimentele exploratie van alternatieve restauratiestrategieën, maar ook als indicatie van de maximaal haalbare luchtdichtheidsprestatie van gerestaureerd historisch schrijnwerk.

9.4.1 Referentiepunt: enkelvoudige middendichting (${}^A RE_{2a}$ en ${}^A RE_{1d}$)

De configuratie met één dichting in het midden ${}^A RE_{2a}$ (gelijkaardig aan ${}^A RE_{1d}$) reduceert de gemiddelde $q_{50}L$ -waarde van $13,20 m^3/(h \cdot m)$ (${}^A OG_2$, klasse 1) naar $4,72 m^3/(h \cdot m)$ (klasse 2), wat overeenkomt met een verbetering van 64% (aanzienlijk hoger dan de verbetering van ${}^A RE_{1d}$ t.o.v. ${}^A OG_1$ die circa 50% bedraagt). Deze sprong bevestigt dat een correct gepositioneerde, doorlopende middendichting een aanzienlijk deel van de dominante lekstromen kan afsnijden. Tegelijk blijft het prestatieniveau beperkt door lokale onderbrekingen (wolfbekken: slecht contact en de overgang van O-profiel naar standaardprofiel kan niet doorlopend gebeuren).

9.4.2 Positionering als bepalende factor: binnen versus buiten

Een verschuiving van de dichting naar de binnenzijde (opdeklatten, ${}^A RE_{2b}$) resulteert in een verdere reductie tot $2,58 m^3/(h \cdot m)$ (klasse 3, 80% verbetering t.o.v. ${}^A OG_2$). Dit contrasteert met de

buitenzijdige dichting (opdeklatten, ${}^A RE_{2c}$), die een verbetering van slechts 27% oplevert (klasse 1, $q_{50}L = 9,62 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$).

Aan de binnenzijde van het schrijnwerk is de geometrie eenvoudiger, zijn onderbrekingen beperkter en kan het contact tussen dichting en kader zowel visueel als mechanisch worden gecontroleerd. Hierdoor wordt de afhankelijkheid van exacte infreesdiepte en lokale bijstelling aanzienlijk gereduceerd. Wanneer alsnog bijstelling nodig blijkt, kunnen de opdeklatten eenvoudig worden losgeschroefd, lokaal aangepast en opnieuw bevestigd. Het effectieve contact kan daarbij op een eenvoudige manier worden gecontroleerd, bijvoorbeeld door in gesloten toestand papier tussen dichting en kader te plaatsen en de aanwezigheid van frictie te verifiëren.

Tegenover deze technische voordelen staan duidelijke erfgoedkundige aandachtspunten. De toevoeging van opdeklatten en de noodzakelijke vervanging of verplaatsing van scharnieren kunnen aanleiding geven tot beperkingen binnen een erfgoedcontext. In het kader van dit experiment waren geschikte scharnieren niet beschikbaar; het effect van aangepaste scharnieren werd daarom gesimuleerd door de aanwezige, ongeschikte scharnieren af te plakken met luchtdichte tape.

Aan de buitenzijde verhindert de aanwezigheid van een raamneus het realiseren van een volledig doorlopende afdichtingslijn, waardoor structurele onderbrekingen blijven bestaan (geen continuïteit). In deze geometrische context blijkt de toepassing van opdeklatten aan de binnenzijde daarom technisch gunstiger dan een analoge ingreep aan de buitenzijde.

9.4.3 Combinaties en cumulatief effect: afnemende marginale winst

Het combineren van dichtingen leidt tot verdere verbetering, maar met een duidelijk afnemend marginaal rendement.

${}^A RE_{2d1}$ (buiten + midden): $3,49 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}) \rightarrow 74 \%$, klasse 2

${}^A RE_{2e1}$ (binnen + midden): $1,65 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}) \rightarrow 87 \%$, klasse 3

${}^A RE_{2e3}$ (binnen + midden, meest performante rubber): $1,27 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}) \rightarrow 90 \%$, klasse 3

De grootste prestatiewinst wordt gerealiseerd bij het opheffen van discontinuïteit (enkelvoudige, goed gepositioneerde dichting). Bijkomende dichtingen reduceren voornamelijk restlekken en verfijnen het prestatieniveau, zonder een nieuwe sprong te veroorzaken. Dit doorprijkt expliciet het idee dat “meer dichtingen automatisch beter” zou zijn.

Ook hier kan het spanningsveld tussen arbeidsintensiteit in vraag worden gesteld. Opdeklatten zijn relatief eenvoudig in hun semi-permanente installatie, worden eenvoudig gecontroleerd en vertonen de grootste prestatiewinst. Is de middendichting dan nog noodzakelijk?

De restricties vanuit erfgoedkundig standpunt verkiezen dan weer het achterzetraam dat visueel contact met het oorspronkelijk raam drastisch verminderd boven minimale aanpassingen aan het schrijnwerk die, wanneer vormelijk geïntegreerd, de functionaliteit van het schrijnwerk in ere herstelt.

9.4.4 Rol van het rubbertype: systematisch maar secundair

Variaties in rubbertype binnen identieke configuraties (${}^{ARE_2}d1 \rightarrow {}^{ARE_2}d2$, ${}^{ARE_2}e1 \rightarrow {}^{ARE_2}e2 \rightarrow {}^{ARE_2}e3$) tonen een consistent maar beperkt effect. De verbetering blijft typisch binnen enkele procenten, wat bevestigt dat materiaalkeuze het resultaat kan optimaliseren, maar nooit kan compenseren voor een suboptimale positionering of ontbrekende continuïteit.

9.4.5 Drievoudige afdichting: technische grens en rationele stop

De drievoudige configuraties (${}^{ARE_2}f1$, ${}^{ARE_2}f2$) bereiken $q_{50}L$ -waarden van respectievelijk 1,52 en 1,23 m³/(h·m), overeenkomend met 89–91 % verbetering (klasse 3). Hoewel dit het hoogste prestatieniveau binnen ARE_2 vertegenwoordigt, is de bijkomende winst ten opzichte van de beste dubbele configuraties beperkt. Gegeven de toenemende complexiteit, arbeidsintensiteit en erfgoedimpact markeert deze stap een technische bovengrens eerder dan een rationele standaardoplossing.

9.4.6 Synthese: welke eerste dichting maakt het verschil

De ARE_2 -resultaten tonen ondubbelzinnig aan dat de keuze van de eerste dichting doorslaggevend is. Een interne, maar vooral, doorlopende afdichting levert een grotere prestatiewinst dan eender welke latere optimalisatie. Opdeklatten aan de binnenzijde maken het mogelijk deze afdichting geometrisch robuust en controleerbaar te realiseren, met een prestatieniveau dat reeds dicht in de buurt komt van de meest verregaande ARE_2 -configuraties. ARE_2 bevestigt daarmee dat luchtdichtheidsverbetering bij historisch schrijnwerk geen kwestie is van maximalisatie, maar van structurele logica: eerst continuïteit, dan verfijning, en tijdig stoppen.

9.5 Methodologische reflectie, randvoorwaarden en het interpretatiekader

Dit onderzoek situeert zich bewust op *de grens tussen wetenschappelijk experiment, ontwerpmatig onderzoek en professionele restauratiepraktijk*. Het combineert bouw fysische metingen met erfgoedkundige randvoorwaarden en uitvoeringslogica uit de praktijk, waardoor het zich onttrekt aan een strikt genormeerd of statistisch onderzoeksopzet.

De gekozen methodologie kent bijgevolg inherente beperkingen inzake normconformiteit, statistische representativiteit en generaliseerbaarheid. De resultaten zijn niet opgevat als universele prestatie-indicatoren, maar als gevalideerde, vergelijkende inzichten binnen een gecontroleerde experimentele context.

Essentieel is dat het onderzoek vertrekt vanuit het perspectief van de uitvoerende praktijk. In samenwerking met bouw firma *Denys* werd een concrete case study ingezet om het effect van diens restauratiemethoden en materialen te objectiveren, hun beperkingen bloot te leggen en hun technisch potentieel verder te verkennen. Het onderzoek fungeert daarbij niet als evaluatie van normatieve correctheid, maar als instrument voor reflectie, optimalisatie en kennisopbouw binnen een erfgoedcontext.

9.5.1 Randvoorwaarden, beperkingen en generaliseerbaarheid van de resultaten

Hoewel het experimentele programma zorgvuldig werd opgezet en consequent werd uitgevoerd, dient rekening te worden gehouden met een aantal inherente randvoorwaarden. Het aantal beschikbare raamobjecten is beperkt, wat impliceert dat de resultaten niet bedoeld zijn als statistisch representatieve steekproef, maar als een diepgaande vergelijking van welomschreven configuraties. Daarnaast vertonen historische ramen onvermijdelijk variaties in staat van behoud, tolerantieopbouw en gebruiksslijtage. Deze variaties konden binnen het onderzoeksopzet niet volledig worden genormaliseerd en maken integraal deel uit van de realiteit van historisch schrijnwerk.

Ook erfgoedkundige randvoorwaarden beïnvloeden de toepasbaarheid van de onderzochte ingrepen. Niet alle experimentele optimalisaties die in ateliercontext werden onderzocht, zijn zonder meer overdraagbaar naar in-situ-toepassingen. Ingrepen die leiden tot een zichtbare wijziging van het schrijnwerk, een verhoogd risico op beschadiging of een verlies aan reversibiliteit zijn in de praktijk slechts beperkt toelaatbaar.

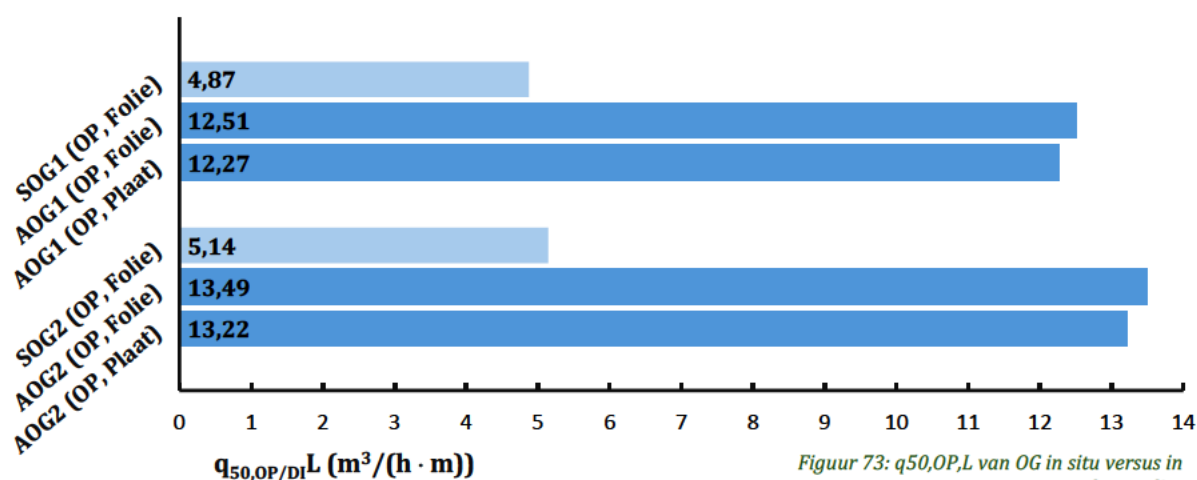
De waarde van het onderzoek ligt precies in het blootleggen van de randvoorwaarden en in het identificeren van parameters die ook binnen de bestaande beperkingen een betekenisvolle invloed uitoefenen.

De methodologie van dit onderzoek is gebaseerd op bestaande normen voor luchtdichtheidsmetingen, maar wordt bewust toegepast buiten hun oorspronkelijke toepassingsgebied. De meetprincipes en drukgestuurde aanpak zijn geïnspireerd op ISO 9972, terwijl de testsequenties voor raamcomponenten hoofdzakelijk worden ontleend aan EN 1026. De interpretatie van de meetresultaten gebeurt aan de hand van de luchtdichtheidsklassen uit EN 12207, die uitsluitend worden gebruikt als indicatief vergelijkingskader.

Geen van deze normen is rechtstreeks toepasbaar op in-situ-metingen van historisch schrijnwerk. De gehanteerde aanpak kan daarom worden beschouwd als een hybride methodologie, waarbij normatieve principes worden gecombineerd met pragmatische aanpassingen om schade aan erfgoed te vermijden en componentgerichte vergelijkingen mogelijk te maken. De resultaten zijn bijgevolg vergelijkend en analytisch van aard en niet bedoeld als formele conformiteitsbeoordeling.

9.5.2 In situ versus in het atelier: invloed van context, demontage en positionering

Een relevante vaststelling binnen dit onderzoek is dat ^sOG (in situ) consequent gunstiger presteert dan dezelfde ramen na demontage en heropstelling in ateliercontext, ondanks de meer controleerbare testopstelling. De hypothese gaat als volgt: door langdurige blootstelling aan vocht, temperatuur en mechanische belasting treedt een zekere mate van geometrische adaptatie op, waarbij zwelling, krimp en lokale vervormingen zich afstemmen op de bestaande raamopening. Deze toestand wordt door demontage onvermijdelijk verstoord. Bij heropstelling in het atelier kunnen nieuwe toleranties, scheefstanden en lekpaden ontstaan, zelfs wanneer geen bijkomende restauratieve ingrepen worden uitgevoerd.



Figuur 73: $q_{50,OP,L}$ van OG in situ versus in het atelier

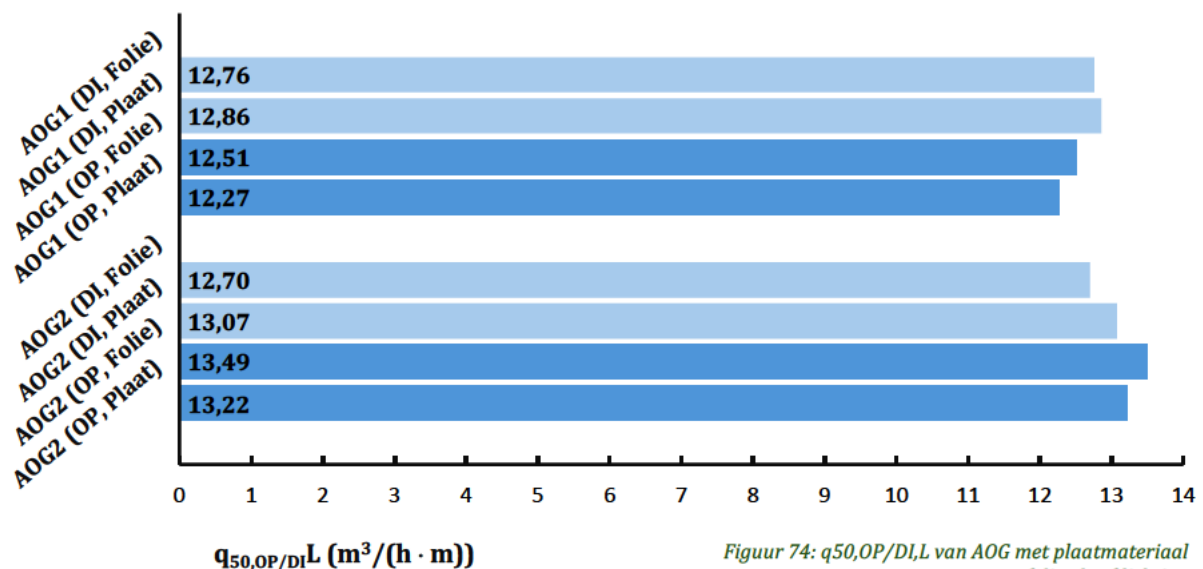
In de praktijk worden historische ramen quasi altijd gedemonteerd, ongeacht of zij nadien worden voorzien van afdichtingen of niet. De vastgestelde prestatieverschillen tussen in situ- en ateliermetingen illustreren dat demontage *op zich* reeds een invloed uitoefent op de luchtdichtheid van historisch schrijnwerk. De atelierresultaten zijn een weergave van de toestand na ingreep, zoals die zich ook op de werf kan manifesteren na herplaatsing.

Binnen dit interpretatiekader is het niet zinvol om in situ- en ateliermetingen rechtstreeks als equivalent te beschouwen. Hun waarde ligt in het blootleggen van trends en relatieve verschillen binnen eenzelfde context, eerder dan in een absolute vergelijking tussen beide meetomgevingen. Deze nuancering is essentieel voor een correcte interpretatie van de resultaten.

9.5.3 Afdichting van de testopstelling: folie versus plaatmateriaal

In ateliercontext tonen de metingen aan dat afdichting met folie en met plaatmateriaal vergelijkbare resultaten oplevert. Onder gecontroleerde omstandigheden, met vlakke aansluitvlakken en gunstige hechtingscondities, blijken beide methoden voldoende luchtdicht om relatieve verschillen tussen raamconfiguraties te evalueren. Dit suggereert dat de keuze van afdichtingsmateriaal in het atelier geen dominante invloed uitoefent op de gemeten trends.

Deze vaststelling kan echter niet zonder meer worden geëxtrapoleerd naar in-situ-metingen. Daar wordt de hechting van folie beïnvloed door ruw pleisterwerk, vocht, onregelmatigheden en beperkte toegankelijkheid. Plaatmateriaal biedt in dergelijke omstandigheden een intrinsiek stabielere afdichting, maar gaat gepaard met een hogere ingreep en een groter risico op beschadiging van erfgoedcomponenten. In dit onderzoek werd bij in-situ-metingen bewust gekozen voor folie en luchtdichte tape, omdat dit de minst invasieve en meest controleerbare oplossing was binnen een erfgoedcontext.



Figuur 74: $q_{50,OP/DI,L}$ van AOG met plaatmateriaal en folie als afdichting

Dat folie en plaatmateriaal in ateliercontext vergelijkbaar presteren, impliceert dus niet dat beide afdichtingsmethoden onder alle omstandigheden gelijkwaardig zijn. Het onderzoek toont wel aan dat, mits zorgvuldige uitvoering, folie een voldoende betrouwbare afdichtingsstrategie vormt voor componentmetingen, terwijl plaatmateriaal vooral voordelen biedt op het vlak van robuustheid en herbruikbaarheid in gecontroleerde omgevingen.

9.5.4 Controlemethoden en niet-uitgevoerde verificaties

In theorie kunnen bijkomende controlemethoden worden ingezet om de luchtdichtheid van de testopstelling zelf te verifiëren, zoals rookvisualisatie, auditieve detectie van lekstromen of het uitvoeren van een controlemeting waarbij het raam volledig wordt afgedicht om het restlekdebiet van de testkamer te bepalen. Dergelijke methoden worden in genormeerde producttesten vaak impliciet verondersteld of expliciet toegepast.

Binnen dit onderzoek werden deze verificaties niet systematisch uitgevoerd. Deze keuze is bewust gemaakt op basis van een afweging tussen methodologische meerwaarde, praktische haalbaarheid en risico op schade aan het schrijnwerk. Het bijkomend afdichten van raamcomponenten met sterk hechtende tapes of katten zou het risico op beschadiging verhogen, terwijl rookvisualisatie of vergelijkbare technieken in de gekozen testopstellingen slechts een beperkte meerwaarde zouden bieden voor de beoogde vergelijkende analyse: grote lekken zijn auditief merkbaar en vaak ook voelbaar.

Om mogelijke invloeden van restlekken te beperken, werd ingezet op een zorgvuldige uitvoering van de testopstelling, met meerdere (vaak > 3) lagen luchtdichte tape, consistente afdichtingsprincipes en herhaalde metingen waar mogelijk. De betrouwbaarheid van de conclusies berust dan ook niet op absolute nulmetingen, maar op de consistentie van de waargenomen trends.

9.5.5 Implicaties voor restauratiepraktijk en perspectieven voor toekomstig onderzoek

Luchtdichtheid bij historisch schrijnwerk is geen louter materiaaltechnische ingreep, maar in essentie een ontwerp- en procesvraagstuk. De experimentele resultaten tonen aan dat prestatieverhoging vooral wordt begrensd door geometrische variatie, tolerantieopbouw en uitvoeringsgevoeligheid, eerder dan door de intrinsieke kwaliteit van de toegepaste afdichtingsmaterialen.

Voor de restauratiepraktijk impliceert dit een duidelijke nood aan afdichtingsconcepten die robuust omgaan met variabele spelingen en beperkte geometrische perfectie. **Dichtingsprofielen met een groter functioneel werkingsinterval** kunnen in dat opzicht bijdragen tot een meer reproduceerbare, zij het mogelijk minder geoptimaliseerde, prestatie. Een dergelijke benadering kan het aantal noodzakelijke afstelstappen reduceren en de afhankelijkheid van individuele uitvoeringskwaliteit beperken, wat binnen een erfgoedcontext een aanzienlijke praktische meerwaarde vormt.

Daarnaast wijzen de resultaten op het potentieel van alternatieve afdichtingsstrategieën die zich aanpassen aan de bestaande geometrie in plaats van deze te forceren. Concepten zoals ter plaatse gevormde, plastisch blijvende afdichtingen in kritieke zones (bijvoorbeeld ter hoogte van bol- en holverbindingen of complexe knooppunten) verdienen verdere exploratie. Dergelijke oplossingen zouden kunnen bijdragen tot een betere aansluiting in zones waar klassieke profielafdichtingen structureel tekortschieten, mits aandacht voor reversibiliteit, verouderingsgedrag en compatibiliteit met historisch materiaal.

Ten slotte is een gestandaardiseerde restauratieaanpak slechts beperkt toepasbaar op historisch schrijnwerk. Effectieve luchtdichtheidsverbetering vereist een contextgevoelige benadering, waarin ontwerpkeuzes, uitvoeringsstrategie en erfgoedkundige randvoorwaarden expliciet op elkaar worden afgestemd. Toekomstig onderzoek kan hier verder op bouwen door afdichtingsconcepten te ontwikkelen die minder afstelgevoelig zijn, experimentele controlemethoden te verfijnen en de wisselwerking tussen luchtdichtheid en thermische prestaties van historisch schrijnwerk integraal te benaderen.

10. Conclusie

Het oorspronkelijke schrijnwerk (sOG) vertoont een gemiddelde luchtdoorlatendheid van $q_{50,L} \approx 6,1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$, overeenkomend met klasse 2 volgens NBN EN 12207. Dit bevestigt dat 19de-eeuws schrijnwerk zonder expliciete afdichting niet intrinsiek extreem lek is. Het luchtlekgedrag wordt hoofdzakelijk bepaald door geometrische discontinuïteiten, tolerantieopbouw en variabele contactdruk tussen vleugel en kader.

De gangbare restauratiepraktijk met één rubberdichting ($^sRE_{3a1}$) leidt in de onderzochte in-situ-configuraties tot een vermindering van de luchtdichtheid. De oorzaak ligt niet in het afdichtingsprincipe zelf, maar in de uitvoering: een onderbroken afdichtingscontour (onder meer ter hoogte van wolfbekken) en het ontbreken van controle op effectieve contactdruk. Een dichting aanbrengen zonder verificatie van haar functioneren blijkt technisch onvoldoende.

De atelierexperimenten (ARE_1 en ARE_2) maken de randvoorwaarden voor structurele verbetering expliciet. Continuïteit van de afdichtingscontour is doorslaggevend: één volledig doorlopende dichting levert een grotere prestatiewinst dan meerdere gedeeltelijke of onderbroken afdichtingen. De overgang van één naar twee dichtingen resulteert in een significante verbetering; verdere verdichting leidt tot een duidelijk afnemend rendement. Het type rubberprofiel beïnvloedt de prestatie, maar blijft ondergeschikt aan geometrie, positionering en contactcondities.

Binnen deze experimentele context blijken opdeklatten een efficiënt hulpmiddel om alternatieve afdichtingspositioneringen mogelijk te maken, inspecteerbaarheid te vergroten en schade aan historisch materiaal te beperken. Zowel interne als externe opdeklatten kunnen performante afdichting realiseren. Tegelijk staan opdeklatten op gespannen voet met erfgoedkundige uitgangspunten. Hun zichtbaarheid en toevoegend karakter maken ze moeilijk verzoenbaar met gangbare restauratiepraktijken. In dit onderzoek functioneren zij daarom expliciet als experimenteel instrument om lekmechanismen en randvoorwaarden bloot te leggen, niet als directe aanbeveling voor toepassing in situ.

Het achterzetraam ($^sRE_{3b}$) behaalt systematisch klasse 4 en vormt de technisch meest performante oplossing op vlak van luchtdichtheid. Deze prestatie is echter compenserend: het historische schrijnwerk wordt functioneel geneutraliseerd en gereduceerd tot een passieve schil. De energetische winst wordt gerealiseerd door toevoeging, niet door verbetering van het raam zelf. Efficiënt, maar conceptueel problematisch binnen een erfgoedcontext waarin het schrijnwerk zelf onderwerp van zorg is.

Het reproductiemodel (sREP_2) presteert beter dan niet-geoptimaliseerd origineel schrijnwerk, maar niet systematisch beter dan geoptimaliseerde restauratieconfiguraties. Geometrische perfectie vergemakkelijkt afdichting, maar vervangt geen doordacht afdichtingsontwerp.

Tot slot moet worden benadrukt dat luchtdichtheid slechts één component vormt van de energetische performantie van schrijnwerk. Transmissieverliezen, beglazingstype, thermische onderbrekingen en comfortgerelateerde aspecten bepalen in sterke mate de globale energieprestatie. De hier aangetoonde verbeteringen in luchtdichtheid leiden daarom niet

automatisch tot een proportionele reductie van het energieverbruik. Ze zijn wel essentieel om ongecontroleerde ventilatieverliezen te beperken en vormen een noodzakelijke, maar niet voldoende voorwaarde voor energetische optimalisatie.

Samenvattend toont dit onderzoek aan dat luchtdichtheidsverbetering van historisch schrijnwerk technisch haalbaar is zonder het raamconcept te verlaten, mits afdichting wordt benaderd als een geometrisch en mechanisch vraagstuk. De huidige praktijk faalt niet door gebrek aan ambitie, maar door het ontbreken van verificatie en terugkoppeling. Erfgoed en performantie zijn geen tegenpolen, maar vereisen een gecontroleerde, meetbaar onderbouwde omgang waarin compenserende oplossingen duidelijk worden onderscheiden van effectieve ingrepen aan het schrijnwerk zelf.

11. Maatschappelijke reflectie

11.1 Klimaatambities en erfgoedverantwoordelijkheid

Vlaanderen beschikt over een uitzonderlijk rijk gebouwd erfgoed. Naar schatting 80.000 tot 100.000 gebouwen zijn beschermd of opgenomen in inventarissen van bouwkundig erfgoed. Samen vertegenwoordigen zij een substantieel aandeel van het bestaande gebouwenpark en bijgevolg ook van het totale energieverbruik. Tegelijk bevinden deze gebouwen zich grotendeels buiten het toepassingsgebied van de gangbare energieprestatieregelgeving. Wat ooit bedoeld was als bescherming tegen ondoordachte ingrepen, heeft zich gaandeweg ontwikkeld tot een structurele vrijstelling zonder alternatief kader.

De Europese en Vlaamse klimaatdoelstellingen stellen nochtans expliciet dat ook de bestaande gebouwvoorraad tegen 2050 ingrijpend moet verduurzamen. In dat spanningsveld wordt erfgoed vandaag vaak voorgesteld als een uitzonderingscategorie: te kwetsbaar om aan te raken, te complex om te verbeteren, en daardoor impliciet vrijgesteld van prestatie-eisen. De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat deze benadering niet langer houdbaar is. Niet omdat historisch schrijnwerk zonder meer aan nieuwbouwnormen kan of moet voldoen, maar omdat meetbare en betekenisvolle verbeteringen wél mogelijk blijken binnen erfgoedkundige randvoorwaarden.

De vastgestelde kloof tussen erfgoedbehoud en energetische performantie is in essentie geen technisch probleem, maar een methodisch en organisatorisch falen. Het ontbreken van prestatie-eisen gaat hand in hand met het ontbreken van kennisontwikkeling, verificatie en feedback in de praktijk. Erfgoed wordt zo niet beschermd tegen ingrepen, maar tegen verbetering.

11.2 Het achterzetraam als schijnoplossing

Binnen die context heeft het achterzetraam zich ontwikkeld tot de dominante erfgoedconforme oplossing. De metingen in dit onderzoek bevestigen de technische effectiviteit ervan: configuraties met een achterzetraam behalen systematisch de hoogste luchtdichtheidsklassen. Net die performantie verklaart het succes van deze ingreep. Tegelijk legt dit onderzoek bloot waarom deze oplossing maatschappelijk en erfgoedkundig problematisch is.

Het achterzetraam verbetert de energetische prestatie niet door het historische schrijnwerk te optimaliseren, maar door het functioneel buiten werking te stellen. Het oorspronkelijke raam verliest zijn rol als klimaatschil en wordt gereduceerd tot een visuele laag, ingekapseld achter een performante toevoeging. De interactie tussen materiaal, detaillering en gebruik — essentieel voor de betekenis van historisch schrijnwerk — verdwijnt.

Deze praktijk illustreert een bredere tendens binnen het erfgoedbeleid: het verwarren van beeldbehoud met materieel en functioneel behoud. Wat behouden blijft, is het zichtbare silhouet; wat verloren gaat, is het functioneren. Het risico van deze benadering is een geleidelijke musealisering van het erfgoedbestand, waarbij gebouwen wel blijven bestaan, maar hun technische en gebruikslogica verliezen. De vraag rijst of dit behoud is, dan wel een vorm van functionele capitulatie onder het mom van respect.

11.3 Praktijk, kennis en verantwoordelijkheid

Een van de meest betekenisvolle bevindingen van dit onderzoek is dat gangbare restauratiepraktijken inzake luchtdichting niet alleen beperkt effectief zijn, maar in sommige gevallen zelfs contraproductief. In-situ-metingen tonen aan dat het aanbrengen van een enkelvoudige rubberdichting zonder gesloten afdichtingscontour en zonder controle op contactdruk kan leiden tot slechtere prestaties dan bij ongerestaureerd schrijnwerk.

Dit wijst niet op individuele fouten, maar op een structureel kennistekort binnen de sector. Restauratiepraktijken zijn vaak gebaseerd op ervaring, analogie en voorzichtigheid, zelden op empirische verificatie. Het ontbreken van meetcultuur en feedbackmechanismen maakt het moeilijk om ingrepen bij te sturen of te optimaliseren. De resultaten uit de atelierexperimenten tonen nochtans aan dat relatief eenvoudige principes een significante impact hebben op de luchtdichtheid.

De maatschappelijke uitdaging ligt dan ook niet in het opleggen van strengere eisen, maar in het ontwikkelen van een gedeeld methodisch kader. Kennisdeling, opleiding en de vertaling van meetresultaten naar uitvoerbare richtlijnen zijn essentieel om restauratiepraktijken te professionaliseren zonder hun erfgoedkundige voorzichtigheid te ondermijnen.

11.4 Beleidsmatige implicaties

De huidige regelgeving plaatst ontwerpers, eigenaars en uitvoerders voor een vals dilemma: ofwel voldoen aan generieke energieprestatie-eisen met verlies van erfgoedwaarde, ofwel een vrijstelling bekomen en berusten in energetische ondermaatsheid. Dit onderzoek suggereert dat een derde benadering noodzakelijk is.

Een gedifferentieerd beleidskader voor erfgoed, met realistische verbeterdoelstellingen en methodische ondersteuning, kan innovatie stimuleren zonder destructieve ingrepen te forceren. Erfgoed schrijnwerk uitsluiten van elke prestatie-eis ontslaat de sector van verantwoordelijkheid en belemmert kennisontwikkeling. Erfgoed onderwerpen aan nieuwbouwnormen leidt onvermijdelijk tot verlies. Tussen beide uitersten ligt een terrein waar verbetering mogelijk is, mits erkenning van de specifieke technische eigenschappen van historisch schrijnwerk.

Het is niet de taak van de individuele ontwerper of restaurateur om dit spanningsveld alleen te overbruggen. Beleidsmakers dragen de verantwoordelijkheid om randvoorwaarden te creëren waarin technisch onderbouwde verbetering mogelijk wordt, ondersteund door kennis, metingen en duidelijke beoordelingscriteria.

11.5 Slotbeschouwing

Dit onderzoek biedt geen sluitende oplossingen, maar wel een empirisch onderbouwd inzicht in de mogelijkheden en beperkingen van luchtdichtheidsverbetering bij historisch schrijnwerk. Het toont aan dat erfgoed en energetische performantie geen vanzelfsprekende tegenpolen zijn, maar evenmin automatisch verenigbaar. Verbetering vergt precisie, inzicht en de bereidheid om bestaande praktijken kritisch te herdenken.

De 19de-eeuwse ramen van het Materniteitsgebouw hebben meer dan een eeuw gefunctioneerd zonder specifieke afdichting. De vraag is niet of ze de komende eeuw zullen overleven, maar in welke hoedanigheid: als louter museale objecten achter een performante schil, of als levend erfgoed dat actief deelneemt aan de klimaattransitie.

Bibliografie

1. Agentschap Onroerend Erfgoed. (2017). *Afwegingskader historisch schrijnwerk*. <https://oar.onroenderfgoed.be/publicaties/AKOE/3/AKOE003-001.pdf>
2. Becker, R. (1979). Window air tightness and its influence on energy saving and minimum required ventilation. *Building and Environment*, 14(3), 157–165. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(79\)90001-0](https://doi.org/10.1016/0360-1323(79)90001-0)
3. Bouwfysica, K., & Van Herpen, R. (2007). *Luchtstroming in openingen*.
4. Bureau voor Normalisatie. (2000). *NBN EN 12114:2000 — Thermal performance of buildings: Air permeability of building components — Laboratory test method*.
5. Bureau voor Normalisatie. (2011). *NBN EN 13829:2011 — Thermal performance of buildings: Determination of air permeability of buildings — Fan pressurization method*.
6. Bureau voor Normalisatie. (2016). *NBN EN 1026:2016 — Windows and doors: Air permeability — Test method*.
7. Bureau voor Normalisatie. (2017). *NBN EN 12207:2017 — Windows and doors: Air permeability — Classification*.
8. Callebaut, V., & Rogge, W. (2024). *Lucht- en waterdichtheid bij historisch schrijnwerk* (Masterproef). Universiteit Gent.
9. DEVENTER Profielen. (n.d.). *Dichtingen voor ramen*. <https://www.deventer-profielen.nl/>
10. Directie Cultureel Erfgoed van het Brussels Gewest. (2008). *Houten schrijnwerk: Onderhoudsboekje – Erfgoed en comfort verenigen*. Erfgoed Brussel. <https://erfgoed.brussels/links/digitale-publicaties/pdf-versies/praktische-boekjes/houten-schrijnwerk>
11. Deventer Profielen. (z.d.-a). *Tolerantiekaders*. Geraadpleegd op 8/1/2026, van <https://www.deventer-profielen.nl/oplossingen/tolerantiekaders>
12. Deventer Profielen. (z.d.-b). *Dichtingen voor ramen*. Geraadpleegd op 8/1/2026, van <https://www.deventer-profielen.nl/producten/dichtingen-voor-ramen>
13. EKI. (z.d.). *Rubber profielen*. Geraadpleegd op 8/1/2026, van <https://www.eki.nl/1/rubber-profielen>
14. ERIKS. (z.d.). *Rubber profielen*. Geraadpleegd op 8/1/2026, van <https://shop.eriks.nl/nl/afdichtingen-rubber-profielen/>

15. EPB-PEDIA. (n.d.). *Luchtdichtheid*. <https://www.vlaanderen.be/epb-pedia/gebouw/luchtdichtheid>
16. Gemeente Maastricht. (2011). *Handboek voor de restauratiepraktijk: Restauratierichtlijnen bij verbouw en onderhoud van monumenten*. https://www.gemeentemaastricht.nl/sites/default/files/2019-07/1406202713handboek_restauratie_en_onderhoud_versie_8_september_2011.pdf
17. Klems, J. H. (1983). Methods of estimating air infiltration through windows. *Energy and Buildings*, 5(4), 243–252.
18. Labrousche, V., & Prignon, M. (2025). *Airtightness of traditional wooden windows and its impact on the occupant and the building*. Ongepubliceerd manuscript.
19. Monumentenwacht Vlaanderen. (2004). *Onderhoud van houten buitenschrijnwerk*. https://drive.google.com/file/d/1uEyjrb5bOKygF3XZKu9z-C_Bw7QQgl-u/view
20. Provan, T. F., & Younger, J. D. (1986). Air infiltration characteristics of windows. *Energy and Buildings*, 9, 281–292.
21. Van den Bossche, N., & Desanghere, B. (2022). *Waarom buitenschrijnwerk belangrijk is voor luchtdichtheid*.
22. Vernimme, N. (2013). *Energiezuinig leven in woningen met erfgoedwaarde*. Onroerend Erfgoed. <https://www.onroerenderfgoed.be/publicaties/handleiding-energiezuinig-leven-woningen-met-erfgoedwaarde>
23. Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf. (2006). Onderhoud van houten buitenschrijnwerk. *WTCB-Contact*, (10), 13–14.
24. Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf. (2012). Renovatie van bestaande vensters: vervanging of andere oplossingen? *WTCB-Contact*, 2012(3), 9.
25. Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf. (2015). *Technische Voorlichting 255: Luchtdichtheid van gebouwen*.
26. Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf. (2020). Erfgoed: een diagnose 4.0 voor een betere benadering van renovaties. *WTCB-Contact*, 2020(3), 4–5.

DESCHACHT

bouw | project | partner

www.deschacht.eu

Technische fiche

Bouwfolie 0.10 2X50m transparant 9.2kg RB 1m



Toelichting

Bouwfolie uit polyethyleen, copolymeren en recyclaten.

Overige eigenschappen

Stockage en verwerking

Deze folie is niet UV-gestabiliseerd. De folie moet beschermt tegen UV-stralen, vochtigheid en andere weersinvloeden opgeslagen worden. De stockagetemperatuur dient tussen 10 en 30 °C te liggen. De folie dient binnen het jaar na productie verwerkt te worden. Mechanische beschadiging van de folie is te vermijden.

Disclaimer

Voor bouwfolie geven wij geen garanties op kleur, geur, transparantie en stroefheid/gladheid van de folie.

Deschacht Plastics Belgium nv
Antwerpsesteenweg 1068, B-9041 Gent-Oostakker
T +32 (0)9 355 74 54 | info@deschacht.eu | www.deschacht.eu

Onze vestigingen ►



Bouwfolie 0.10 2X50m transparant 9.2kg RB 1m**Kenmerken**

Kenmerk	Waarde	Normering
Artikelcode	5804	
Commerciële Code	PFR0102X50T	
Grondstof	LDPE	
Kleur	Transparant	
Dikte micron (μ)	100	
Breedte (m)	2	
Lengte (m)	50	
Gewicht (kg)	9,20	
Densiteit (kg/m³)	0.924	
Impactweerstand (g/μ)	≥ 1	ASTM D1709
Treksterkte lengterichting (N/mm²)	15.1	DIN EN ISO 527-3
Treksterkte dwarsrichting (N/mm²)	13.3	DIN EN ISO 527-3
Trekweerstand lengterichting (N/mm)	153.97	
Trekweerstand dwarsrichting (N/mm)	135.62	
Rek bij breuk-lengterichting (%)	315	DIN EN ISO 527-3
Rek bij breuk-dwarsrichting (%)	430	DIN EN ISO 527-3
UV bestendig	Nee	
Bitumenbestendig	Ja	
Recycleerbaar	Ja	

Deschacht Plastics Belgium nv

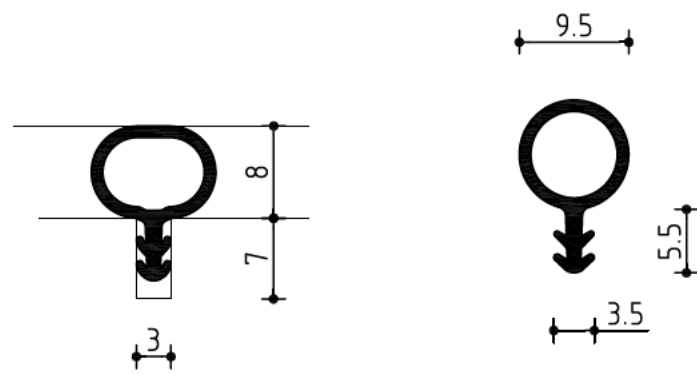
Antwerpsesteenweg 1068, B-9041 Gent-Oostakker

T +32 (0)9 355 74 54 | info@deschacht.eu | www.deschacht.eu

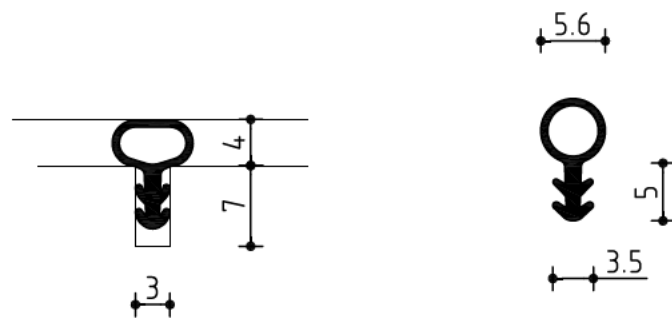
Onze vestigingen ►



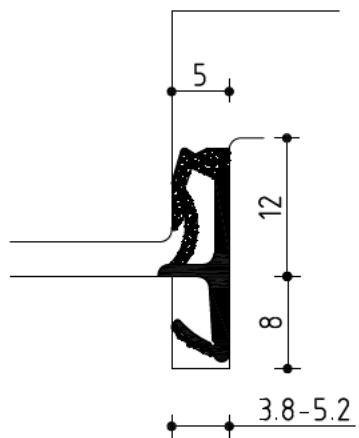
S 1320



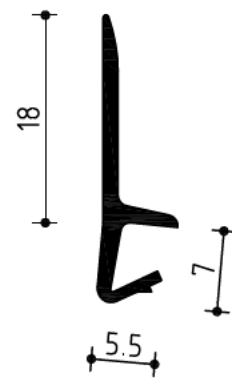
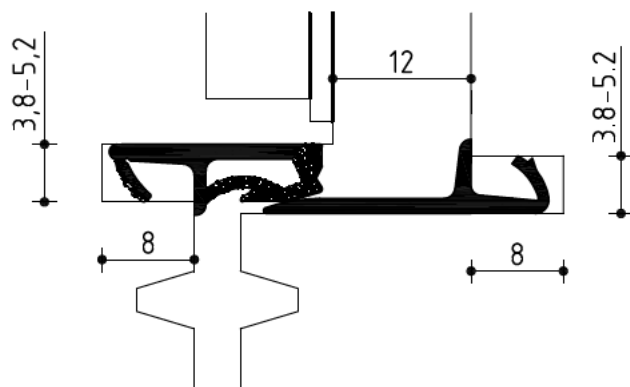
S 0318

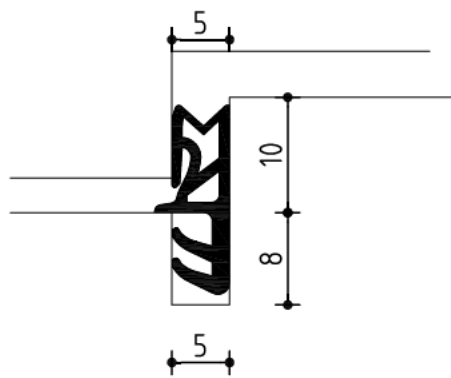


SPV 12

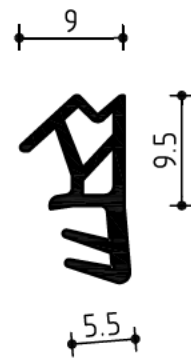


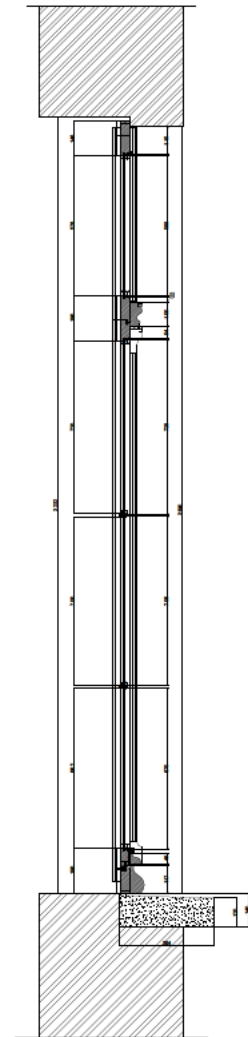
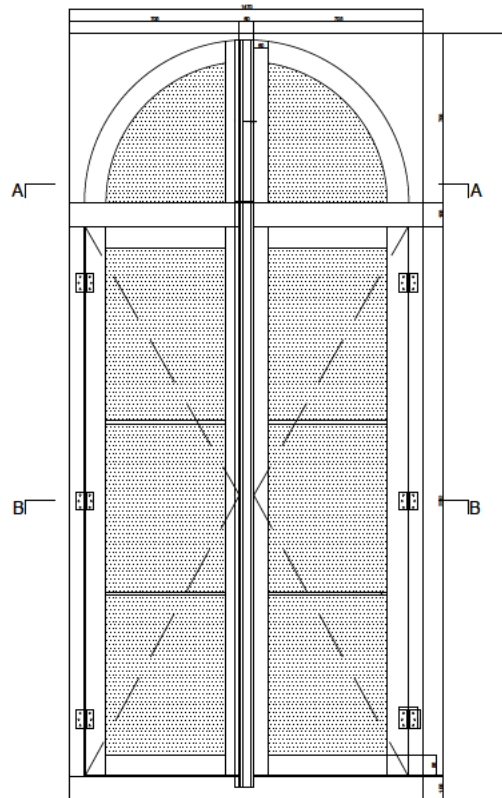
SV 5109



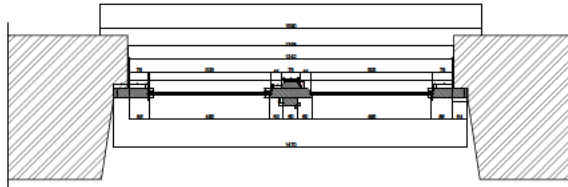


S 5110

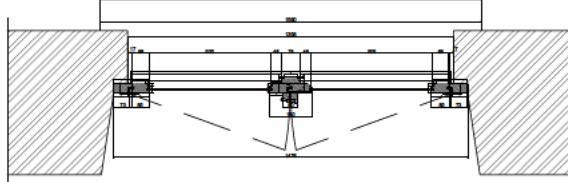




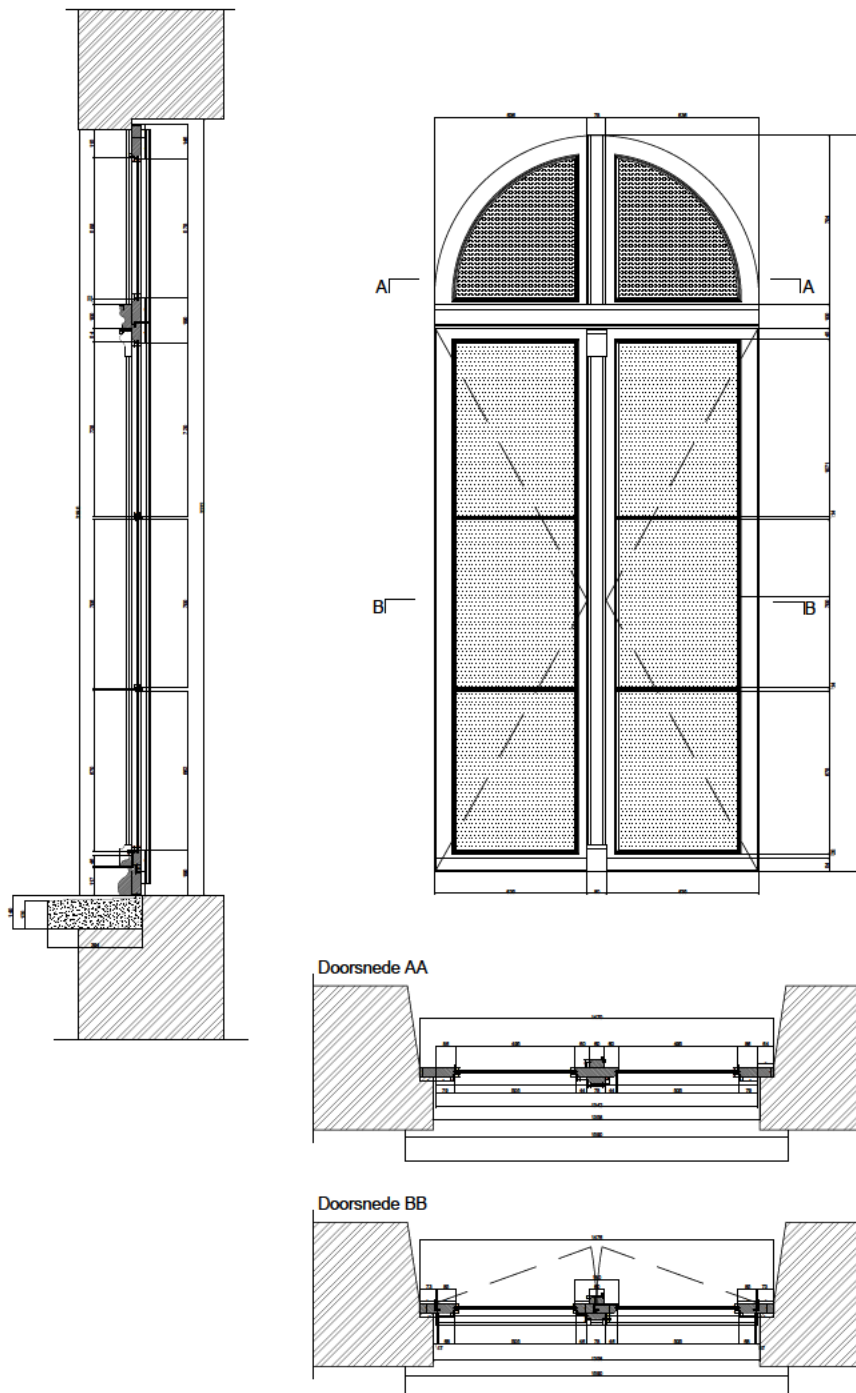
Doorsnede AA



Doorsnede BB



	Raam bijloekaai	RAAM 1STE VERDIEP - BINNENZIJDE	DATUM : 20-03-2025
	VLEUGEL RAAM	/	TEKENING n°: 1.1
			SCHAAL: 1/16



DENYS	Raam bijloekaai	RAAM 1STE VERDIEP - BUITENZIJDE		DATUM : 20-03-2025
	VLEUGEL RAAM	/	A3	TEKENING n°: 1.1 SCHAAL: 1/16

