

2013•2014
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Ontwikkeling van een methode en software tool voor het automatisch dimensioneren van ventilatienetwerken

Promotor :
ir. Frederik ROGIERS
ing. Leo RUTTEN

Thomas Leflere

Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: energie

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2013•2014
Faculteit Industriële
ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: energie

Masterproef

Ontwikkeling van een methode en software tool voor het
automatisch dimensioneren van ventilatienetwerken

Promotor :
ir. Frederik ROGIERS
ing. Leo RUTTEN

Thomas Leflere

*Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële
wetenschappen: energie*

Woord vooraf

Het oorspronkelijke idee voor deze thesis is ontstaan tijdens mijn bachelorproef. Toen zat ik nog in een professionele opleiding en mocht ik stage lopen bij het bedrijf GemaCool. Hier ontwikkelde ik een applicatie om snel ventilatienetwerken te ontwerpen en te dimensioneren binnen Autocad. Deze dimensionering gebeurde echter enkel op basis van de luchtsnelheid in de kanalen. Naar drukval werd niet gekeken, met problemen zoals een te hoge drukval of niet inregelbare systemen als gevolg. Om deze problemen te vermijden ging ik op zoek naar applicaties die dit wel konden. Hiervoor bestaan heel wat oplossingen op de markt maar geen enkele voldeed volledig aan mijn verwachtingen. Zo zijn er maar weinig systemen die een volledige dimensionering kunnen uitvoeren. En als ze dit kunnen zijn ze heel duur. Dit bracht mij op het idee om een model te ontwerpen dat hier wel toe in staat was, en dat is dan ook het doel van deze thesis geworden.

Het uitwerken van dit model was een heel complexe en interessante opgave. Ten eerste moest het model alle mogelijke netwerken kunnen bevatten. Hiernaast moest het model ook zo eenvoudig mogelijk blijven zodat het makkelijk integreerbaar was. En tot slot moest het uitbreidbaar zijn zodat ontwerpers makkelijk een eigen interpretatie konden maken. Ik vond het een heel interessante opdracht om al deze eigenschappen te kunnen realiseren en mag met trots zeggen dat het eindresultaat mijns inziens volledig voldoet.

Om dit voorwoord af te sluiten wil ik graag een aantal mensen bedanken. Eerst en vooral natuurlijk mijn eigen begeleiders namelijk M. Rogiers en M. Rutten. M. Rogiers wil ik vooral bedanken voor zijn bijstand bij het begrijpen van de theoretische principes en omdat hij altijd klaar stond met kritische vragen om het niveau van deze thesis verder op te krikken. M. Rutten wil ik dan weer bedanken voor het delen van zijn uitgebreide kennis op het vlak van software en zijn hulp bij al mijn programmeertechnische problemen. Verder wil ik mijn taalleerkracht M. Lievens bedanken voor zijn hulp bij het opstellen en verbeteren van deze tekst zelf. Ik vond het heel interessant om het schrijven van de thesis vanuit zijn standpunt te bekijken. Om af te sluiten wil ik al de andere mensen bedanken die mij geholpen hebben bij deze thesis. Het zijn er te veel om op te noemen (M. Camps, Mevr. Reekmans, Mevr. Hoedemaekers, M. Leflere . . .) maar toch wil ik ze graag bedanken.

Inhoudsopgave

Woord vooraf	1
Abstract	9
Abstract	11
1 Inleiding	13
2 Fysisch model van ventilatienetwerk	15
2.1 Ontwerpvoorwaarden bij dimensionering	15
2.2 Fysische wetten	16
2.3 Opstellen van model	17
2.4 Bepalen formules drukverlies	20
3 Ontwerpprobleem en oplossingsmethode	25
3.1 Probleemstelling, doelstellingen en methodes	25
3.2 Overzicht huidige software	27
3.3 Dimensioneren kanaalsecties op basis van luchtsnelheid	28
3.4 Dimensioneren netwerk op basis van drukonbalans	28
3.5 Besluit oplossingsmethode	32
4 Realisatie in Java	33
4.1 Programmastructuur	33
4.2 Overzicht interne netwerkrepresentatie	34
4.3 Dimensioneren op basis van luchtsnelheid	37
4.4 Dimensioneren op basis van druk	39
4.5 Besluit realisatie in Java	44
5 Toepassingsvoorbeeld	45
5.1 Opbouwen netwerk	45
5.2 Netwerk dimensioneren	47
5.3 Netwerk bestuderen	48
6 Testcase	51
6.1 Overzicht gebouw voor testcase	51
6.2 Dimensioneren kanaalsectie op basis van luchtsnelheid	53
6.3 Formules drukverlies	57
6.4 Dimensioneren netwerk op basis van drukonbalans	63
6.5 Vergelijking resultaten met resultaten software	67
6.6 Besluit	68
7 Conclusie	71

Lijst van tabellen

1	Vergelijking publieke en private dimensioneringssoftware	28
2	Methodes component	35
3	Methodes Formaat	35
4	Datamembers tak	36
5	Methodes tak	36
6	Standaard diameters	56
7	Functievoorschriften bocht 90°	74
8	Functievoorschriften kanaal	74
9	Functievoorschrift reductie	74
10	Functievoorschrift Regelklep	75
11	Functievoorschrift T-stuk toevoer	76
12	Functievoorschrift T-stuk afvoer	77
13	Functievoorschrift ventiel	78

Lijst van figuren

1	Toe- en afvoerdebieten van netwerk	15
2	Topologie van een netwerk	16
3	Topologie schematisch weergegeven	16
4	Voorbeeld netwerk	17
5	Eenvoudig netwerk	18
6	Druk in functie van debiet bij bocht 90 [11, p.55]	21
7	Druk in functie van debiet bij ventiel [11, p.408]	22
8	Dimensionering gewenste geluidsniveau	26
9	Dimensionering gewenste luchtverdeling	26
10	Stappenplan knooppunt dimensionering	31
11	Netwerk voorbeeld	34
12	Startscherm	45
13	Unit geselecteerd	46
14	Component toevoegen	46
15	Koker toegevoegd aan unit	47
16	Ongebalanceerd netwerk	47
17	Netwerk in balans	48
18	Reductie geselecteerd	48
19	Regelklep geselecteerd	49
20	Grondplan gelijkvloers	51
21	Grondplan eerste verdiep	52
22	Leidingnetwerk gelijkvloers	52
23	Leidingsnetwerk eerste verdiep	53
24	Overzicht dimensionering	53
25	Topologie in Excel	54
26	Dimensioneren kanaalsectie op basis van lichtsnelheid	55
27	Aangepast netwerk	57
28	Grafiek bocht 90 graden	58
29	Grafiek kanaal, bocht en reductie	59
30	Grafiek drukval bij ventiel en regelklep	60
31	Grafiek drukverlies over de hoofdtak van een T-stuk.	61
32	Overzicht bepalen functies	62
33	Drukval per component	64
34	Drukverloop in het netwerk	64
35	Grafiek drukverloop	65
36	Drukverloop na dimensionering ventiel	66
37	Grafiek drukverloop na dimensionering	67
38	Procentuele fout tussen drukval volgens software en volgens handmatige berekening	68

Abstract

Vandaag de dag bestaan er heel wat applicaties voor het weergeven en dimensioneren van ventilatiesystemen. Deze applicaties hebben elk hun eigen systeem om het netwerk te dimensioneren. Deze dimensionering gebeurt in de meeste gevallen maar gedeeltelijk, zo zijn er maar weinig softwarepakketten die componenten toevoegen voor een volledige dimensionering.

Deze thesis stelt zich als doel om een model te ontwerpen voor deze complexe berekeningen. Dit model moet toepasbaar zijn op de huidige markt en moet eenvoudig uitbreidbaar zijn. Hiernaast moet dit model eenvoudig integreerbaar zijn in verschillende applicaties. Tot slot moet het model vrij toegankelijk zijn.

Om dit te bereiken doorloopt deze thesis drie stappen. De eerste stap ontwerpt een mathematisch model dat het ventilatienetwerk kan karakteriseren en dimensioneren. De volgende stap integreert dit mathematisch model in een programmatische structuur, hiervoor kiest deze thesis de programmeeromgeving Java. De laatste stap ontwikkelt een voorbeeldapplicatie van dit model.

Deze thesis heeft al zijn doelstellingen gehaald. Het ontworpen model is in staat om de dimensionering volledig uit te voeren. Daarenboven is het zo ontworpen dat elk type component integreerbaar is. En tot slot kan de lezer, dankzij het feit dat het model in drie stappen is opgebouwd, de voor hem interessante delen integreren in zijn eigen applicatie.

Abstract

Today, a lot of applications are available to display and dimension ventilation systems. These applications all have their own method for a, partial or complete, dimensioning. Only the very costly applications provide the possibility to do the complete dimensioning.

The purpose of this thesis is to design a model that is capable of executing a full dimensioning. This model should be open source, applicable for the current market, easily expandable and compatible in existing applications.

To achieve these goals, this thesis goes through three steps.

In a first step, a mathematical model that can characterize and dimension the complete ventilation system is designed. In a second step, this model is integrated in a programmable structure, in this case Java. The last step designs an example application of the model.

This thesis fulfilled all its goals. The designed model is able to do the complete dimensioning. Moreover it is designed in such a way that every type of component can be added. And to conclude it is even possible for the reader, due to the fact that this thesis is built in three steps, to integrate discrete relevant parts into his own application.

1 Inleiding

Deze thesis situeert zich binnen de Vlaamse bouwsector. Sinds 2005 is deze sector verplicht om aan de EPB-normering te voldoen. De normering stelt, zowel voor residentiële als niet-residentiële gebouwen, eisen voor onder andere ventilatie. Om aan deze eisen te voldoen voeren gespecialiseerde firma's studies uit naar de optimale technische installatie. Deze installatie moet niet enkel voldoen aan de eisen van de wetgever maar ook aan de wensen en noden van de bouwheer, zoals bijvoorbeeld de locatie van het leidingnetwerk en de totale kostprijs.

Het ontwerpproces van deze installatie doorloopt drie stappen. De eerste stap bepaalt de debieten die per ruimte gehaald moeten worden, de tweede stap bepaalt de topologie van het netwerk en de derde stap dimensioneert het netwerk om de gewenste luchtverdeling te halen. Deze derde stap is de meest complexe stap.

Omdat deze dimensioneringsstap zo complex is bestaan er verschillende software applicaties die deze dimensionering kunnen uitvoeren. Deze applicaties kunnen opgedeeld worden in twee groepen. De eerste groep bevat applicaties ontwikkeld door privéfirma's voor commercieel gebruik. Deze zijn in staat om een volledige dimensionering uit te voeren maar tegen een hoge kostprijs. De tweede groep bevat de open source applicaties. Deze zijn gratis maar zijn niet in staat om volledige dimensioneringen uit te voeren en zijn daarenboven vaak heel complex. Er is dus vraag naar een applicatie die het netwerk volledig kan dimensioneren, en dit via het open source principe. Dit is dan ook het doel van deze thesis.

Om deze applicatie te ontwerpen is deze thesis opgedeeld in vijf hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk (hoofdstuk 2) bepaalt het fysisch model van het ventilatiesysteem. Het geeft een overzicht van wat er allemaal aanwezig is in zo een ventilatiesysteem en aan welke eigenschappen het moet bezitten. Het tweede hoofdstuk (hoofdstuk 3) bepaalt, op basis van dit fysisch model, de problemen die ontstaan bij een niet gedimensioneerd netwerk en de methodes om deze op te lossen. Deze methodes geven een algemene oplossingsstrategie zonder in te gaan op de technieken om dit te realiseren in een software applicatie. Dit is waar het derde hoofdstuk (hoofdstuk 4) verder op in gaat. Deze gebruikt de beschreven methodes en geeft hier een algemene oplossingsmethode voor. Verder beschrijft dit hoofdstuk hoe de dataopbouw van het netwerk binnen Java gebeurt. Het vierde hoofdstuk (hoofdstuk 5) geeft een voorbeeld van een applicatie die in staat is om de volledige dimensionering uit te voeren. En tot slot stelt het laatste hoofdstuk (hoofdstuk 6) een testcase op waarbij de ontwikkelde applicatie vergeleken wordt met een handmatige dimensionering. Hierna volgt het besluit (hoofdstuk 7).

Door deze stappen te doorlopen ontwikkelt deze thesis een theoretische basis waarop de applicatie gebouwd wordt. Dit maakt het niet alleen makkelijker om de applicatie zelf te ontwikkelen maar geeft de lezer ook inzicht in hoe deze uitgebreid en aangepast kan worden.

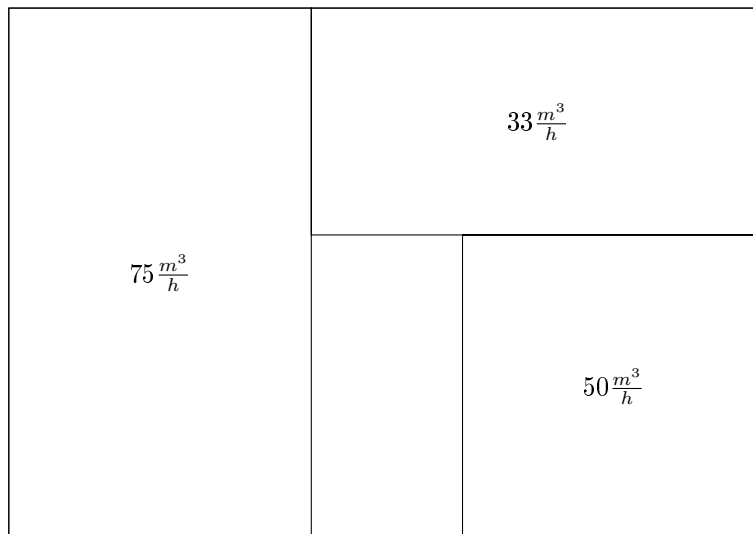
2 Fysisch model van ventilatienetwerk

Deze sectie bepaalt het fysisch model voor het ventilatienetwerk. Dit gebeurt in vier subsecties. De eerste subsectie bepaalt de ontwerpvoorwaarden. Dit zijn de basisvoorwaarden die de ontwerper al kent voor de dimensionering. De volgende subsectie overloopt de fysische wetten waar het ventilatiesysteem aan moet voldoen. De volgende subsectie voegt deze ontwerpvoorwaarden en fysische wetten samen tot het model van het ventilatiesysteem. Dit model giet het ventilatiesysteem in een wiskundig kader zodat het in de volgende secties gebruikt kan worden voor dimensionering. Dit model gaat er van uit dat het drukverlies over de takken in functie van het debiet $P(\phi)$ gekend is. Dit is vaak echter niet het geval. Daarom bepaalt de laatste subsectie hoe de ontwerper deze drukval kan bepalen.

2.1 Ontwerpvoorwaarden bij dimensionering

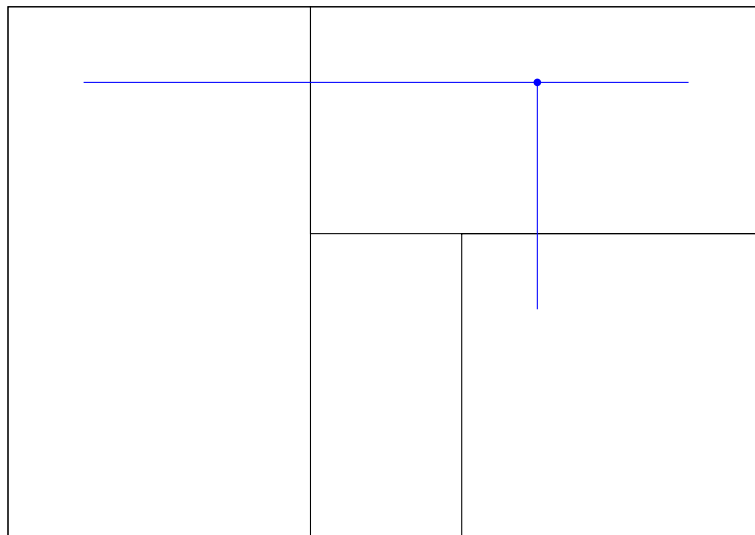
Voor de ontwerper kan beginnen met het dimensioneren van het ventilatiesysteem moet hij twee ontwerpvoorwaarden bepalen. Ten eerste moet hij voor elke ruimte de toe- en afvoerdebieten bepalen en ten tweede moet hij de topologie van het netwerk zelf uitwerken. Deze subsectie legt beknopt uit hoe dit gebeurt.

De eerste ontwerpvoorwaarde is het bepalen van de toe- en afvoerdebieten. Deze krijgen vanaf heden de naam ventilatiedebieten. Het bepalen van deze ventilatiedebieten gebeurt in België op basis van twee normen. De eerste norm (NBN D50-001 [3]) definieert de rekenmethodes voor residentiële gebouwen. De tweede norm (NBN EN 13779 [4]) definieert dan weer de rekenmethodes voor nietresidentiële gebouwen. Deze methodes resulteren beide in een debiet dat het ventilatienetwerk per kamer moet realiseren. Figuur 1 geeft hier een voorbeeld van.



Figuur 1: Toe- en afvoerdebieten van netwerk

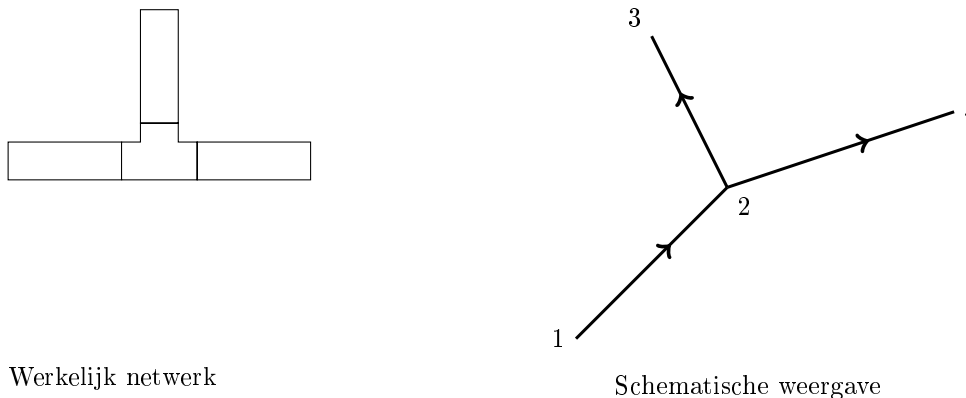
De tweede ontwerpvoorwaarde waar het ventilatiesysteem aan moet voldoen is de topologie. Deze topologie bepaalt twee elementen van het netwerk. Ten eerste bepaalt het de locatie van alle toe en afvoerpunten in de ruimtes. Ten tweede bepaalt het hoe de lucht hier geraakt vertrekkende van de ventilator. Hierbij bepaalt de topologie enkel hoe het netwerk moet lopen en waar de knooppunten liggen. Het bepaalt echter geen leiding diameters of componentformaten. Figuur 2 geeft een voorbeeld van zo een topologie.



— Locatie voor ventilatie kanalen
 — Binnen- en buitenmuren van de woning

Figuur 2: Topologie van een netwerk

Deze thesis stelt de topologie vaak schematisch voor. Dit maakt het veel gemakkelijker om ze te bespreken en om voorbeelden uit te leggen. Figuur 3 geeft hier een voorbeeld van.



Figuur 3: Topologie schematisch weergegeven

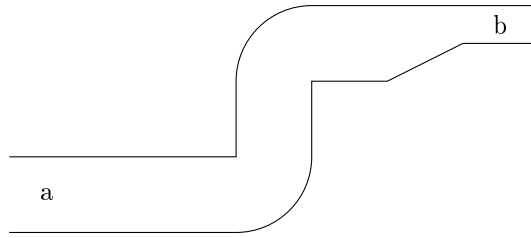
2.2 Fysische wetten

Bij het dimensioneren van het ventilatiesysteem voldoet dit systeem aan een aantal fysische wetten, de veralgemeende wet van Bernoulli en de wet van massatransport. Deze wetten vormen de uitgangspunten voor het opstellen van het model en de uit te voeren dimensionering. Deze subsectie geeft een overzicht van beide wetten.

Lucht gedraagt zich in het ventilatiesysteem als een ideaal gas. Dit door de geringe drukvariatie (rond de 100 Pa) tussen de ventilator en de uitmondingspunten. Het gevolg hiervan is dat de veralgemeende wet van Bernoulli toepasbaar is. Vergelijking 1 [2, p59] geeft deze weer.

$$p_a + \rho g h_a + \frac{\rho v_a^2}{2} = p_b + \rho g h_b + \frac{\rho v_b^2}{2} + \Delta p_f \quad (1)$$

In deze vergelijking staat p voor de statische druk in het punt, ρgh voor de locatie druk, $\frac{\rho v^2}{2}$ voor de dynamische druk en Δp_f voor het drukverlies tussen punt a en punt b. De subscript a en b geven de locaties van twee punten in het netwerk weer. Zo kan men bijvoorbeeld in figuur 4 vergelijking 1 uitwerken.



Figuur 4: Voorbeeld netwerk

Hiernaast gedraagt het ventilatiesysteem zich als een stationair open systeem. Dit heeft als gevolg dat de som van het massatransport over de grenzen gelijk moet zijn. Verder is al aangenomen dat de lucht zich gedraagt als onsamendrukbaar gas. Door de onsamendrukbaarheid moet dus ook de volumestroom constant blijven. Vergelijking 2 [6, p109] geeft dit weer.

$$\sum \phi = 0 \quad (2)$$

In deze vergelijking staat ϕ voor het debiet dat de grenzen overschrijd. Bij de ventilatiesystemen, zoals behandeld in deze thesis, bestaan er twee mogelijke debieten. Ten eerste zijn er de debieten die uitmonden in de ruimtes, de einddebieten ϕ_e . Het tweede mogelijke debiet is het debiet dat de ventilator in het ventilatienetwerk blaast ϕ_b . Bij figuur 4 zou dit resulteren in:

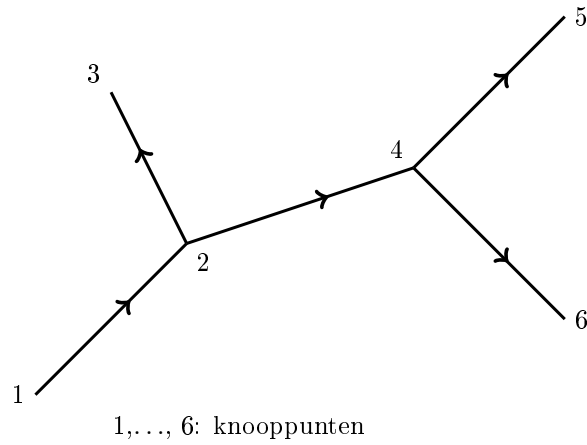
$$\phi_1 - \phi_3 - \phi_4 = 0 \quad (3)$$

2.3 Opstellen van model

Op basis van de ontwerpvoorwaarden en de fysische wetten (subsectie 2.1 en 2.2) is het mogelijk om een model te ontwerpen voor het ventilatiesysteem. Dat is het doel van deze subsectie. Om de bespreking overzichtelijk te maken bespreekt deze subsectie eerst het model voor een eenvoudig netwerk. Dit voorbeeldmodel dient vervolgens als basis voor het opstellen van een algemeen model. Deze subsectie beschrijft beide stappen in een aparte paragraaf.

Voorbeeld model

Bij het modeleren van het ventilatiesysteem zijn de debieten en de topologie al gekend. Dit maakt het mogelijk om het netwerk schematisch weer te geven. Figuur 5 is deze schematische weergave van het netwerk gebruikt in deze paragraaf.



Figuur 5: Eenvoudig netwerk

In dit netwerk blaast een ventilator de lucht binnen in knooppunt één. Van hier vloeit deze lucht naar knooppunt twee waar hij opgesplitst wordt in twee luchtstromingen. De eerste van deze twee luchtstromingen vloeit via tak 2-3 naar knooppunt drie en mond hier uit in een kamer. De tweede luchtstroming vloeit via tak 2-4 naar knooppunt vier. Hier splitst deze weer op in een stroming naar eindpunten vijf en zes.

Het model van dit netwerk moet zich aan de fysische wetten, besproken in subsectie 2.2, en de ontwerpvoorwaarden, besproken in subsectie 2.1, houden. Deze fysische wetten beperken het systeem en leggen een aantal vergelijkingen op waar het systeem aan moet voldoen. Deze vergelijkingen dienen als basis voor het model.

Eerst en vooral moet het netwerk voldoen aan de veralgemeende vergelijking van Bernoulli (vergelijking 1). De drukval over tak 4-5 moet dus gelijk zijn aan die van tak 4-6. Dit resulteert in onderstaande vergelijking, waarbij we aannemen dat druk op eindpunt vijf gelijk is aan die van eindpunt zes.

$$\Delta P_{45}(\phi_{45}) = \Delta P_{46}(\phi_{46}) \quad (4)$$

Hierin staat ΔP_{45} voor de drukval over tak 4-5 en ΔP_{46} voor de drukval over de tak 4-6. Deze drukvallen zijn afhankelijk van de debieten die erdoor stromen, hier ϕ_{45} voor het debiet door tak 4-5 en ϕ_{46} voor het debiet door tak 4-6.

De lucht die door tak 4-5 en tak 4-6 stroomt is afkomstig van tak 2-4. Als we enkel deze takken bestuderen als een open systeem is vergelijking 2 van toepassing. Dit resulteert in onderstaande vergelijking:

$$\phi_{24} - \phi_{45} - \phi_{46} = 0 \quad (5)$$

Hierin staat ϕ_{24} voor de luchtstroming die de tak 2-4 in knooppunt twee binnenvloeit. Deze stroomt naar binnen en krijgt dus een positieve waarde. Hiernaast vloeien op knooppunt vijf en zes luchtstromen naar buiten, respectievelijk ϕ_{45} en ϕ_{46} . Deze vloeien uit het systeem waardoor ze een minteken krijgen.

Voor knooppunt twee is opnieuw de veralgemeende wet van Bernoulli (vergelijking 1) van toepassing. Dit wil zeggen dat de drukval gaande van knooppunt twee naar knooppunt drie gelijk moet zijn aan die van knooppunt twee naar knooppunt vijf en van knooppunt twee naar knooppunt zes. Dit resulteert in volgende formules:

$$\begin{aligned} \Delta P_{23}(\phi_{23}) &= \Delta P_{24}(\phi_{24}) + \Delta P_{45}(\phi_{45}) \\ &= \Delta P_{24}(\phi_{24}) + \Delta P_{46}(\phi_{46}) \end{aligned} \quad (6)$$

Tot slot kunnen tak 1-2, tak 2-3 en tak 2-4 opnieuw beschouwd worden als een op zichzelf staand open systeem. Dit resulteert in onderstaande vergelijking voor de debieten in dit systeem.

$$\phi_{12} - \phi_{23} - \phi_{24} = 0 \quad (7)$$

Deze vergelijkingen samen vormen het model voor het ventilatiesysteem. Hieronder zijn ze samen weergegeven.

$$\begin{aligned} \phi_{24} - \phi_{45} - \phi_{46} &= 0 \\ \phi_{12} - \phi_{23} - \phi_{24} &= 0 \\ \Delta P_{45}(\phi_{45}) &= \Delta P_{46}(\phi_{46}) \\ \Delta P_{23}(\phi_{23}) &= \Delta P_{24}(\phi_{24}) + \Delta P_{45}(\phi_{45}) \\ \Delta P_{23}(\phi_{23}) &= \Delta P_{24}(\phi_{24}) + \Delta P_{46}(\phi_{46}) \end{aligned} \quad (8)$$

Dit model kan verder vereenvoudigd worden. Door het feit dat de drukval over tak 4-5 gelijk is aan de drukval over de tak 4-6 zijn de laatste twee vergelijkingen hetzelfde. Één van de twee is dus overbodig. Dit resulteert in onderstaand model voor het ventilatienetwerk.

$$\begin{aligned} \phi_{24} - \phi_{45} - \phi_{46} &= 0 \\ \phi_{12} - \phi_{23} - \phi_{24} &= 0 \\ \Delta P_{45}(\phi_{45}) &= \Delta P_{46}(\phi_{46}) \\ \Delta P_{23}(\phi_{23}) &= \Delta P_{24}(\phi_{24}) + \Delta P_{45}(\phi_{45}) \end{aligned} \quad (9)$$

Veralgemeend model

Op basis van voorgaande paragraaf is het mogelijk om een algemeen model op te stellen. Dit algemeen model bestaat uit een reeks van vergelijkingen die zich baseren op twee basisvergelijkingen. Deze zijn afgeleid van de fysische wetten gezien in subsectie 2.2.

De eerste basisvergelijking bepaalt het debiet dat door een tak vloeit. Dit takdebiet moet gelijk zijn aan de som van de debieten in zijn subtakken. Onderstaande vergelijking geeft dit weer:

$$\phi_t - \sum \phi_{to} = 0 \quad (10)$$

In deze vergelijking staat ϕ_t voor het debiet in de tak zelf en ϕ_{ts} voor de debieten in de onderliggende takken (to: tak onderliggend). In het eenvoudige voorbeeld resulteerde dit in de eerste twee vergelijkingen uit stelsel 7.

Naast de debieten moet ook de drukval van elk knooppunt naar elk eindpunt gelijk zijn. Onderstaande vergelijking geeft dit weer.

$$\Delta P_{ts1}(\phi_{ts1}) = \Delta P_{tsn}(\phi_{tsn}) \quad (11)$$

Hierin staat ΔP_{ts1} voor de drukval startend in het begin van subtak één en eindigend op het eindpunt van het netwerk, en ΔP_{tsn} voor dezelfde drukval bij één van de andere subtakken. Het aantal vergelijkingen per knooppunt is dus één minder dan het aantal takken bij dit knooppunt ($n - 1, n$: aantal onderliggendetakken)

Het gehele model voor het ventilatiesysteem valt dus te beschrijven met onderstaand stelsel:

$$\begin{aligned} \phi_t - \sum \phi_{to} &= 0 \\ \Delta P_{ts1}(\phi_{ts1}) &= \Delta P_{tsn}(\phi_{tsn}) \end{aligned} \quad (12)$$

2.4 Bepalen formules drukverlies

De vorige subsectie (subsectie 2.3) bepaalde een model voor het ventilatiesysteem. Dit model ging er van uit dat in elke tak het drukverlies in functie van het debiet $P(\phi)$ gekend is. Deze subsectie legt uit hoe dit drukverlies te bepalen valt. Hiervoor overloopt hij eerst, in de eerste paragraaf, de theoretische vorm van deze vergelijking. Op basis van deze theoretische vorm bepaalt de tweede paragraaf een methode voor het bepalen van deze formule in de praktijk. Voor het bepalen van deze formules gebruikt deze thesis de kleinstekwadraat methode, die de derde paragraaf uitlegt. De laatste paragraaf legt tot slot uit hoe, op basis van het drukverlies in functie van het debiet $P(\phi)$, het drukverlies in de tak bepaald kan worden.

Theoretische achtergrond

Als een luchtstroom door een leidingnetwerk vloeit verliest deze stroming energie. De oorzaak van dit energieverlies is de uitwisseling van momentum tussen de onderlinge deeltjes en het energieverlies tussen de deeltjes met verschillende snelheid. Beiden noemt men energieverlies door wrijving. Dit energieverlies zorgt voor een daling in druk en kan bepaald worden aan de hand van formules. Het zijn deze formules die elke component in zijn dataset heeft zitten. Deze sectie legt uit hoe deze formule bepaald kan worden.

In het jaar 1845 ontwikkelde Julius Weisbach of Saxony een formule voor het bepalen van het drukverlies in leidingen. Zijn formule was bepaald op basis van de Prony vergelijking en berust sterk op empirisch bepaalde data. Vergelijking 13 [7, p21.6] geeft de formule in hedendaagse vorm weer.

$$\Delta p_f = \frac{100fL}{D_h} \frac{\rho V^2}{2} \quad (13)$$

Deze formule bepaalt het drukverlies op basis van de luchtsnelheid (V), de lengte van de buis (L), de diameter van de buis (D_h) en de wrijvingsfactor (f). Voor elke leiding in het systeem zijn deze eigenschappen gekend op uitzondering van de wrijvingsfactor. Deze is afhankelijk van het type stroming (laminair of turbulent) en de ruwheid van de gebruikte materialen.

Naast het drukverlies in de leidingen ontstaat er ook drukverlies in bochten, koppelstukken en andere elementen van het netwerk die het stromingspatroon van de lucht verstoren. De formule van Darcy-Weibach (13) kan deze niet bepalen. Vandaag de dag bepaalt men deze verliezen op basis van een coëfficiënt en de snelheid van de luchtstroom in de leiding. Dit gebeurt volgens formule 14.

$$\Delta P_t = C\rho \frac{V^2}{2} \quad (14)$$

In deze formule staat C voor de weerstandscoefficiënt van de component, ρ voor de massadichtheid en V voor de snelheid. De weerstandscoefficiënt zelf is dan weer afhankelijk van de vorm van en het materiaal waaruit de component gemaakt is. Deze moet de producent per component bepalen.

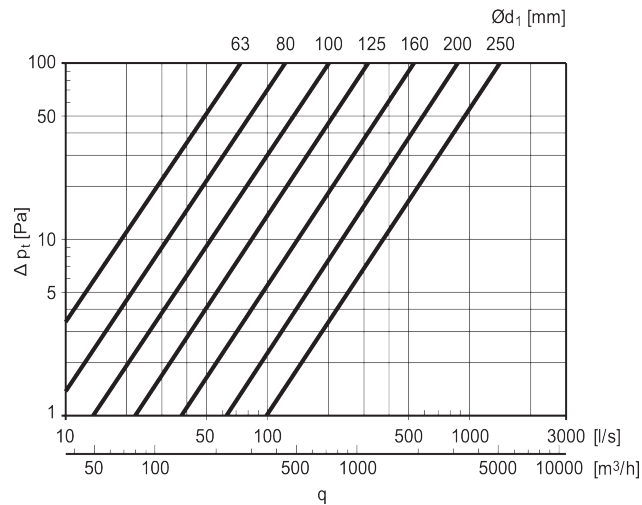
Om het totale drukverlies over een component te bepalen moet de ontwerper zowel rekening houden met het energieverlies door wrijving als het energieverlies door de wijziging in het stromingspatroon. In de praktijk ziet men vaak echter dat één van beide veel groter is dan de andere waardoor men enkel de belangrijkste gaat kiezen. Mocht dit echter niet van toepassing zijn bepaalt men het energieverlies door beide vergelijkingen samen te nemen. Vergelijking 15 geeft deze weer.

$$\Delta p_f = \left(\frac{100fL}{D_h} + \sum C \right) \frac{\rho V^2}{2} \quad (15)$$

Drukverlies van componenten

Elke component moet zijn drukverlies kunnen berekenen. In theorie gebeurt dit op basis van vergelijking 15. In de praktijk is het echter de producent die zijn component in een luchtunnel en hier het drukverlies

over de component, bij verschillende debieten, opmeet. Dit resulteert in grafieken zoals die weergegeven in figuur 6.



Figuur 6: Druk in functie van debiet bij bocht 90 [11, p.55]

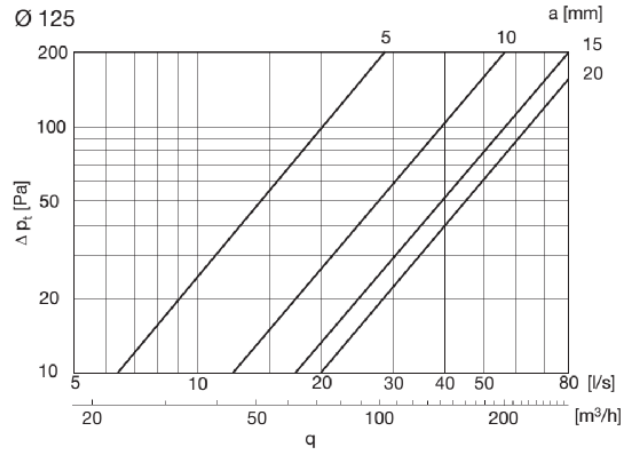
Deze figuur geeft de druk en het debiet weer op een logaritmische schaal, hierdoor krijgt de functie het verloop van een rechte. De functie zelf kan nu voorgesteld worden via vergelijking 16.

$$a \log(\phi) = \log \Delta P \quad (16)$$

In deze formule staat P voor de drukval en ϕ voor het debiet door de component. De a staat dan weer voor een dimensieloze factor die de helling van de functie bepaalt.

Deze manier van werken is een geaccepteerde en correcte methode binnen de hydraulische sector. De reden hiervoor is dat alle variabelen buiten de snelheid in formule 15 afhankelijk zijn van de component zelf. Hiernaast kan op basis van de component eigenschappen de snelheid ook omgerekend worden naar het debiet en valt door het gebruik van de logaritme de kwadratische term weg. Wat overblijft zijn een reeks vaste waarden die de a van formule 16 samenneemt.

Op basis van formule 16 kan de ontwerper heel eenvoudig de formule voor het bepalen van de drukval bepalen. Dit door simpelweg de logaritme weg te werken uit de vergelijkingen. Formule 16 is echter enkel geldig voor niet-regelbare componenten. Regelbare componenten zullen door het wijzigen van hun interne componenten zorgen voor een andere drukval bij hetzelfde debiet. Figuur 7 geeft hiervan een voorbeeld bij een ventiel. Hier kan men bij een debiet van veertig liter per seconde de druk naar wens laten stijgen of dalen.



Figuur 7: Druk in functie van debiet bij ventiel [11, p.408]

Dit zorgt er echter voor dat formule 16 niet meer gebruikt kan worden. In figuur 7 is echter wel duidelijk te zien dat bij constante opening het drukverloop lineair is en dat bij wijziging in opening de druk hyperbolisch wijzigt. Dit resulteert in formule 17.

$$aO^b + c \log \phi = \log \Delta P \quad (17)$$

De kleinste kwadraat methode maakt het mogelijk om benaderende waarden voor a, b en c bepalen. De volgende paragraaf geeft deze methode weer.

Kleinstekwadratmethode

Tot hertoe ging deze sectie ervan uit dat de ontwerper de coëfficiënten in vergelijking 16 en 17 zelf kon bepalen. Dit is echter vaak niet zo evident. Daarom legt de rest van deze subsectie in drie stappen uit hoe de ontwerper deze waarden kan bepalen op basis van de kleinste kwadraatmethode. Deze kleinste kwadraatmethode baseert zich op een vergelijking volgens formule 18.

$$p(x) = a_0 + \dots + a_m x^m \quad (18)$$

Deze vergelijking heeft de vorm die we willen dat onze grafiek aanneemt (bijvoorbeeld $a * x + b = y$ of $a_0 x + a_1 y + a_2 = z$). De eerste stap van de kleinste kwadraatmethode is het bepalen van de gewenste vorm voor deze functie. Dit is in ons geval formule 16 en 17.

Op basis van deze formule bepaalt de volgende stap de som van de fouten via vergelijking 19.

$$\sigma_m = \sum_{r=0}^n (p_m\{x_r\} - f_r)^2 \quad (19)$$

Bij het opstellen van deze som vult de stap per punt de waarden van de gekende parameters en het gekende resultaat in. Het enige wat nu nog overblijft zijn de onbekende a_0, \dots, a_n .

Als we de totale fout σ_m zo klein mogelijk willen hebben moet de afgeleide van deze functie gelijk zijn aan nul. Dit moet natuurlijk voor elke onbekende gelden. Dit heeft als gevolg dat de partieel afgeleide naar elke component gelijk moet zijn aan nul. Stelsel 20 geeft dit weer.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial a_0} \phi_m &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial}{\partial a_m} \phi_m &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

De uitwerking van dit stelsel geeft een set vergelijkingen met even veel onbekenden als vergelijkingen. Heel de set is dus oplosbaar en de laatste stap kan op basis van deze set alle onbekenden bepalen. Door deze in te vullen in de formules krijgt de ontwerper zo zijn onbekende en heeft hij een goede benadering van de gewenste formules.

Bepalen drukverlies in tak

Vorige paragrafen bepaalden de methode om het drukverlies van een component te bepalen in functie van het debiet dat hierdoor stroomt (vergelijking 16 en 17). Het model dat deze thesis voorstelt voor het netwerk (subsectie 2.3) zoals weergegeven in vergelijking 12 werkt echter met het drukverlies van de tak in plaats met het drukverlies van de componenten.

Deze drukval is de som van de drukvallen van de componenten in deze tak. Met onderstaande formule valt deze eenvoudig te bepalen.

$$\Delta P_t(\phi_t) = \sum \Delta P_c(\phi_c) \tag{21}$$

3 Ontwerpprobleem en oplossingsmethode

Voorgaande sectie (sectie 2) bepaalde een fysisch model voor het ventilatienetwerk. Op basis van dit model kan de ontwerper het ventilatiesysteem analyseren. Door deze analyse zullen er echter een aantal problemen aan het licht komen, met als belangrijkste probleem dat de lucht zich niet verdeelt zoals de ontwerper wil. Deze sectie bespreekt deze problemen. Om deze problemen op te lossen moet de ontwerper het netwerk herdimensioneren. Dit is een tweede onderwerp dat deze sectie behandelt. Tot slot geeft deze sectie ook een korte beschrijving van de bestaande applicaties om deze dimensionering uit te voeren.

De sectie zelf is opgedeeld in vijf subsecties. De eerste subsectie begint met het beschrijven van de problemen die kunnen optreden bij een nietgedimensioneerd netwerk. Vanuit deze problemen bepaald hij een aantal doelen die gehaald moeten worden om deze problemen weg te werken, en beschrijft hij kort de methodes om deze doelen te halen. De volgende subsectie maakt een kleine zijsprong en geeft een overzicht van de bestaande systemen die de dimensionering kunnen uitvoeren met hun specifieke voor- en nadelen. Hierna volgen twee subsecties met de specifieke oplossingsmethodes voor de doelstellingen gesteld in de eerste subsectie. En om af te sluiten trekt de laatste subsectie een aantal besluiten over de te volgen methodes.

3.1 Probleemstelling, doelstellingen en methodes

Het eerste wat een ontwerper doet bij het maken van zijn ontwerp is het vastleggen van de debieten en de topologie zoals besproken in subsectie 2.1. Dit zorgt voor een aantal problemen die het nodig maken om het netwerk te dimensioneren.

Deze subsectie geeft, in drie stappen, een overzicht van die dimensionering. De eerste paragraaf legt de problemen ervoor zorgen dat de dimensionering nodig is. Op basis van deze problemen bepaald de tweede paragraaf de doelstellingen. Dit zijn de eisen waar het netwerk na dimensionering aan moet voldoen. De laatste stap legt op basis van deze doelstellingen de methodes uit. Deze geven weer hoe het netwerk gedimensioneerd word.

Probleemstelling

Voor de ontwerper zijn dimensionering uitvoert legt hij zijn ontwerpvoorwaarden vast, zoals beschreven in subsectie 2.1. Hierbij kiest hij, bij de topologie, waardes voor het formaat van het kanaal. Zo kan hij bijvoorbeeld overal kiezen voor een rond kanaal met een diameter van 125 mm. Dit zorgt voor problemen met het geluidsniveau en de luchtverdeling. De rest van deze paragraaf legt deze problemen uit.

Ten eerste zijn er problemen met het geluidsniveau. Het geluidsniveau is hoofdzakelijk afhankelijk van de luchtsnelheid in het kanaal. Deze luchtsnelheid is afhankelijk van het debiet dat door het kanaal vloeit en de vorm van het kanaal. Met formule 22 kan de ontwerper dit snelheidsprofiel bepalen.

$$\phi = \int v dA \quad (22)$$

Als deze snelheid te hoog licht zorgt dit voor storende geluiden in de installatie. Daarom houdt men deze snelheid in de praktijk onder de $3 \frac{m}{s}$ [5, p16]. Door het willekeurig kiezen van kanaalformaten bestaat echter de kans dat deze snelheid overschreden word.

Het tweede probleem stelt zich bij de luchtverdeling. Deze luchtverdeling valt te bepalen met het model opgesteld in subsectie 2.3. Hier zorgt het willekeurig kiezen van het kanaalformaat weer voor problemen. Door dit willekeurig kiezen kan de effectieve luchtverdeling nooit gelijk zijn aan de gewenste luchtverdeling. Met als gevolg dat als de installatie gebouwd word, zoals voorgeschreven volgens de nietgedimensioneerde topologie, deze nooit de gewenste luchtverdeling haalt.

Ontwerpdoelstellingen

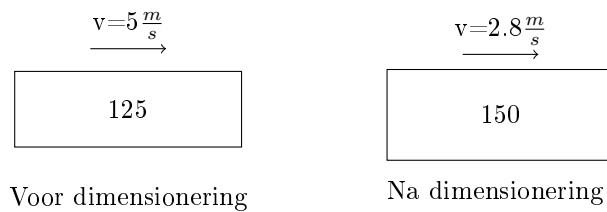
Voorgaande paragraaf besprak twee problemen die bestaan bij een nietgedimensioneerd leidingsnetwerk. De methodes beschreven in deze sectie stellen zich dan ook als doel om deze problemen op te lossen. Concreet stellen de methodes zich twee doelen:

- verlagen snelheid onder de $3\frac{m}{s}$
- realiseren gewenste luchtverdeling

Beide problemen kunnen opgelost worden door het aanpassen van de leidingdiameters of door het toevoegen van extra regelcomponenten.

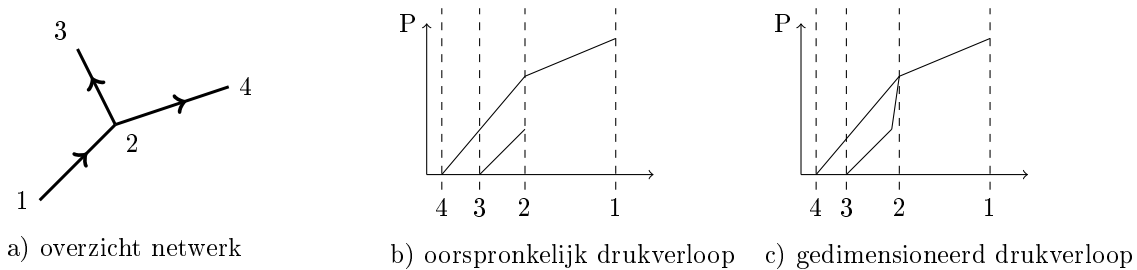
Ontwerp methode

Afhankelijk van de gewenste doelen stelt deze thesis verschillende methodes voor om de dimensionering uit te voeren. Bij de dimensionering tegen te hoge snelheden bepaalt het model eerst de huidige luchtsnelheden in de kanalen. Waar deze te hoog zijn bepaalt hij een nieuw formaat op basis van de maximale luchtsnelheid, en stelt deze in. Figuur 8 geeft dit weer en de volledige methode is terug te vinden in subsectie 3.3.



Figuur 8: Dimensionering gewenste geluidsniveau

Bij de dimensionering op basis van de gewenste luchtverdeling moet bij deze luchtverdeling de druk in elk knooppunt van het netwerk gelijk zijn. Figuur 9 geeft een voorbeeld van zo een dimensionering.



Figuur 9: Dimensionering gewenste luchtverdeling

Deze figuur geeft een eenvoudig netwerk weer (9a). De ontwerper wil in dit netwerk een luchtstroom laten vloeien vanuit punt één naar punt drie en punt vier. Op basis van deze luchtstromingen zou het drukverloop de vorm hebben van (9b). Aan dit drukverloop valt te zien dat de druk in de tak gaande van twee naar vier groter is dan die van twee naar drie. Het gevolg hiervan is dat de luchtverdeling anders zou lopen dan gewenst. De effectieve verdeling valt te bepalen op basis van het model voorgesteld in subsectie 2.3.

Om dit op te lossen stelt deze thesis een methode voor die de regelbare componenten instelt om dit drukverloop te wijzigen. Mocht dit niet voldoende zijn voegt het model extra regelbare componenten (bijvoorbeeld regelkleppen) toe, figuur 9c geeft dit weer. Door deze aanpassingen verdeelt de luchtstroom zich zoals de ontwerper wilt omdat dit de enige configuratie is waarbij het drukverlies vanuit knooppunt

twee naar eindpunt drie en vier gelijk is. Een volledige beschrijving van deze methode is terug te vinden in subsectie 3.4.

3.2 Overzicht huidige software

Voorgaande subsectie bepaalde kort de problemen bij, doelen van en gevolgde methode voor de dimensionering van het ventilatiesysteem. Deze subsectie maakt hierbij een korte zijspgong en geeft een overzicht van bestaande software om ventilatiesystemen te dimensioneren. Hiervoor is hij opgedeeld in drie paragrafen. De eerste paragraaf beschrijft MagiCAD, de tweede Optivent, en tot slot volgt een vergelijking van de twee in de derde paragraaf. Deze vergelijking gebeurt op basis van:

- Snelheid,
- Volledige balans,
- Externe software,
- Prijs.

Deze subsectie kiest bewust om enkel MagiCAD en Optivent te bespreken. De reden hiervoor is dat ze zich beiden een totaal verschillend type applicatie voorstellen. MagiCAD is een ontwikkeld uitgegeven door een private onderneming en Optivent is een applicatie ontwikkeld door een overheidsinstantie. Door deze twee uit te leggen probeert deze subsectie het verschil en de problemen bij beiden te laten zien zonder een uitgebreide studie uit te voeren over alle mogelijke applicaties.

MagiCAD

De eerste applicatie voor het dimensioneren van ventilatiesystemen is MagiCAD[8]. Dit is een tekenprogramma dat de ontwerper toelaat om het ventilatienetwerk in een 3D-omgeving te tekenen. Nadat hij de topologie bepaalt heeft is de software in staat om het volledige netwerk te dimensioneren. Hierbij wijzigt de applicatie leidingdiameters en stelt deze kleppen en regelventielen in.

Het systeem heeft drie nadelen. Ten eerste draait de applicatie boven op AutoCAD. Dit is een softwareprogramma gespecialiseerd in *automated computer aided design*. Dit wil zeggen dat de gebruiker MagiCAD enkel kan gebruiken als hij beschikt over een geldige AutoCAD versie. Ten tweede is het een dure applicatie. Dit zeker in combinatie met de verplichte aankoop van AutoCAD. Tot slot is MagiCAD een programma dat ontwikkeld is voor zowel HVAC (Heating, ventilation and airconditioning) als voor elektriciteit. Dit maakt een aantal stappen omslachtig.

Optivent

Een tweede applicatie voor het dimensioneren van ventilatiesystemen is optivent [9]. Dit is een gratis applicatie ontwikkeld door het WTCB [10]. Deze applicatie biedt de gebruiker de mogelijkheid om de debieten voor een ventilatiesysteem te bepalen en om een eenvoudige dimensionering uit te voeren. Deze dimensionering geeft echter geen volledige balans omdat hij geen extra componenten toevoegt aan het systeem. Ook zit het programma zelf niet echt logisch in elkaar wat het gebruiksgemak bemoeilijkt.

Vergelijking

Deze subsectie gaf een overzicht van twee mogelijke applicaties voor het dimensioneren van het ventilatiesysteem. De eerste was MagiCAD en de tweede Optivent. Hierbij diende MagiCAD als voorbeeld van private (betalend) software en optivent als voorbeeld van publieke (gratis) software. Deze opsplitsing

werd gemaakt om het duidelijk verschil en de gezamenlijke nadelen te laten zien. Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze eigenschappen.

Tabel 1: Vergelijking publieke en private dimensioneringssoftware

	Publieke software	Private software
Snelheid	-	+
Volledige balans	-	+
Externe software	+	-
Prijs	+	-
Gebruiksgemak	-	-

Op basis van deze tabel bepaalt deze thesis een aantal eigenschappen waaraan de te ontwikkelen applicatie moet voldoen. Eerst en vooral moet de applicatie de gebruiker in staat stellen om snel het netwerk te definiëren. Dit door een gemakkelijke userinterface in te bouwen. Hiernaast moet de applicatie het programma volledig kunnen balanceren. Verder moet hij ook gratis zijn, en dit zonder gebruik te maken van extra software. En tot slot moet hij ontwikkeld zijn op gebruiksgemak.

3.3 Dimensioneren kanaalsecties op basis van luchtsnelheid

Subsectie 3.1 gaf een overzicht van de methodes die gebruikt kunnen worden voor het dimensioneren van ventilatiesystemen. Deze subsectie gaat hier dieper op in en legt de methode voor dimensionering op basis van luchtsnelheid uit.

Bij het dimensioneren van een ventilatiesysteem is niet enkel de luchtverdeling van belang maar ook de luchtsnelheid in de takken. Als de luchtsnelheid in een tak hoger is dan drie meter per seconde [5, p.16] zorgt dit voor een typisch ruisend geluid. Dit kan vermeden worden door het formaat van de sectie te verhogen. De rest van deze sectie legt eerst uit hoe de luchtsnelheid te bepalen is en vervolgens wat er moet gebeuren om deze te veranderen.

Voor het netwerk gedimensioneerd kan worden moet de luchtsnelheid gekend zijn. Op dit punt in de berekening is het debiet ϕ gekend en kan het snelheidsprofiel bepaald worden op basis van formule 23.

$$\phi = \int v dA \quad (23)$$

Hierbij maakt de ontwerper een aanname over de vorm van de snelheidsverdeling. Dit is in de meeste gevallen een uniforme waarde(soms word een parabolische benadering gebruikt). Op basis van dit snelheidsprofiel kan de ontwerper de maximale en gemiddelde snelheid in de leiding bepalen.

Nu de ontwerper het snelheidsprofiel kent kan hij controleren of deze de maximale snelheid (snelheid waarbij geluidsoverlast ontstaat) overschrijd. Indien dit het geval is moet de ontwerper het formaat van de component aanpassen. Deze aanpassing kan hij opnieuw exact berekenen met vergelijking 23 maar vaak zal hij gewoon naar het volgende standaardformaat gaan.

3.4 Dimensioneren netwerk op basis van drukonbalans

Subsectie 3.1 gaf een overzicht van de methodes om een ventilatienetwerk te dimensioneren en subsectie 3.3 ging hier verder op in door de dimensionering op basis van de luchtsnelheid uit te werken. Deze subsectie gaat hierop verder en legt de dimensionering op basis van drukonbalans uit.

Op basis van het model uit subsectie 2.3 is het mogelijk om de huidige luchtverdeling te bepalen. Dit is echter niet wat de ontwerper wil bereiken. De ontwerper wil dat het systeem de lucht verdeelt zoals hij bepaald heeft. Om dit te bereiken moet het netwerk opnieuw gedimensioneerd worden.

Voor deze subsectie verder ingaat op de techniek voor deze dimensionering moet het begrip tak en knooppunt gedefinieerd worden. Een ventilatienetwerk bestaat uit een netwerk dat start aan een unit (de ventilator). Van hier vertrekt een kanaal dat vervolgens gesplitst wordt om zo de lucht naar alle eindpunten (de ventielen) te leiden. De druk in dit netwerk heeft in het begin (bij de ventilator) en op het einde (bij de ventielen) een constante waarde. Binnen het netwerk ontstaat er, door de weerstand die de lucht ondervindt, een drukverlies. Bij een splitsing zal dit drukverlies via de ene splitsing anders verlopen dan via de andere splitsing. Het punt waar dit verschil in drukverlies begint op te treden noemt deze thesis een knooppunt. De lezer moet er rekening mee houden dat het beginpunt en de eindpunten van het netwerk ook als knooppunten beschouwd worden. De verbinding tussen twee knooppunten is gedefinieerd als een tak. Zo bestaat een eenvoudige netwerk, zoals bijvoorbeeld figuur 3 op pagina 16 uit vier knooppunten en drie takken.

Nu deze begrippen gedefinieerd zijn kan deze subsectie de techniek voor de dimensionering uitwerken. De techniek zelf is gebaseerd op de wetten gedefinieerd in subsectie 2.2. Hierin is weer de wet van Bernoulli (1) van belang. Deze stelt dat de drukval van elk knooppunt tot elk onderliggend eindpunt gelijk moet zijn. Met *elk onderliggend eindpunt* worden hier de eindpunten bedoeld die, startende van de ventilator, na het knooppunt liggen. Indien het systeem de gewenste luchtverdeling wil halen moet dus aan deze voorwaarde voldaan worden. Dit is echter bij de ontwerprichties meestal niet het geval, met een verkeerde luchtverdeling als gevolg. Om dit te vermijden moet het netwerk gewijzigd worden, zodat aan deze voorwaarde wel voldaan wordt.

Hierbij is het belangrijk dat de lezer zich er bewust van is dat in een bestaand netwerk altijd aan deze voorwaarde voldaan is. Dit komt omdat in een bestaand netwerk de luchtverdeling zich naar deze voorwaarde zal aanpassen, waarbij de luchtverdeling berekend kan worden volgens het model uitgewerkt in sectie 2. Maar bij de dimensionering uitgevoerd in deze subsectie wordt niet gerekend met de effectieve debieten, maar met de gewenste debieten. Hierdoor is het mogelijk dat de druk in een knooppunt anders is dan de begindrukken van de takken juist na dit knooppunt. Dit is de drukonbalans die weggewerkt moet worden om de gewenste luchtverdeling te krijgen.

Ter voorbereiding van de dimensionering zelf bepaalt de ontwerper de drukwijziging die per tak gerealiseerd moet worden, om deze drukonbalans weg te werken. Deze drukwijziging berekent hij volgens formule 24.

$$\Delta P_w = \Delta P_{max}(\phi_{max}) - \Delta P_{tak}(\phi_{tak}) + \Delta P_{knoop} \quad (24)$$

Hierin is ΔP_{max} de hoogste drukval tussen het knooppunt en de mogelijke eindpunten, ΔP_{tak} de drukval van de tak zelf en ΔP_{knoop} het drukverschil dat voor het bovenliggende knooppunt overwonnen moet worden.

Op basis van deze drukverschillen kan de ontwerper het netwerk dimensioneren. Dit gebeurt in drie onderling afhankelijke stappen die de ontwerper per knooppunt uitvoert. Na elke stap controleert de ontwerper of alle zijtakken dezelfde druk hebben, dit volgens vergelijking 25. Indien dit het geval is gaat hij over naar het dimensioneren van het volgende knooppunt. Anders moet hij een volgende stap uitvoeren. Hierbij is het belangrijk dat de ontwerper begint bij de knooppunten het dichtst bij de eindcomponenten en zo terugwerkt. Zo vermeld hij dat er componenten toegevoegd worden als er nog regelmogelijkheden zijn voor de ventielen.

$$P_1(\phi_1) = \dots = P_n(\phi_n) \quad (25)$$

In de eerst stap past de ontwerper de componenten van de onderliggende takken aan om het gewenste drukverschil te kunnen leveren. Dit kan door bijvoorbeeld de opening van het ventiel te veranderen of de stand van een regelklep te wijzigen. Deze aanpassingen zorgen voor een wijziging in ΔP , het te overwinnen drukverschil, volgens vergelijking 26.

$$\Delta P = \Delta P - \sum \Delta P_{comp,na}(\phi) - \Delta P_{comp,voor}(\phi) \quad (26)$$

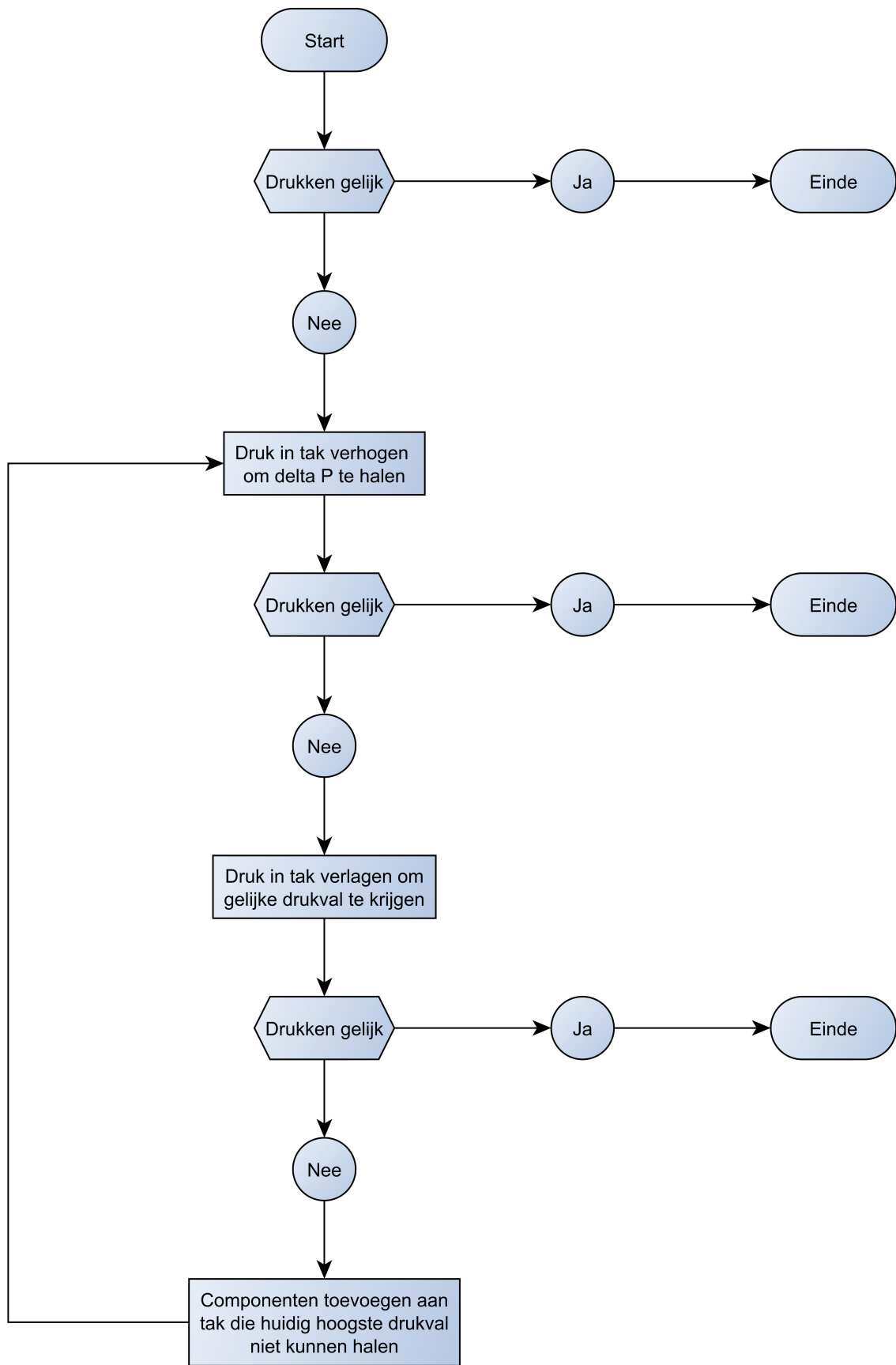
Hierin staat $\Delta P_{comp}(\phi)$ voor de drukval over de regelbare component, en ΔP voor de drukval over de tak zelf.

Na deze instelling controleert de ontwerper of vergelijking 25 voldaan is. Indien dit het geval is, is het knooppunt in evenwicht en kan hij overgaan naar het volgende knooppunt.

Als dit niet lukt wil dit zeggen dat sommige takken de nodige drukval niet kunnen genereren en gaat de ontwerper over naar stap twee. Deze stap probeert het drukverschillen weg te werken. Dit door de drukval in de takken waar deze te hoog ligt te verlagen tot die van de takken met de laagste drukval. Om deze verlaging door te voeren wijzigt de ontwerper opnieuw de instelling van de regelbare componenten in deze takken Dit zorgt weer voor een drukwijziging volgens formule 26. De ontwerper controleert opnieuw of er voldaan is aan vergelijking 25.

Als na de vorige stap het knooppunt nog niet in evenwicht is voert de ontwerper de derde en laatste stap uit. In deze stap voegt hij extra componenten toe aan de takken die de huidige hoogste drukval niet kunnen halen. Zo kan hij een regelklep of een extra stromingsweerstand invoeren. Door het invoeren van de extra component is de netwerkstructuur gewijzigd en moet de ontwerper opnieuw beginnen bij stap één voor de dimensionering van dit knooppunt.

Om het volledige netwerk in evenwicht te krijgen moet de ontwerper, of de ontwerp applicatie, dus per knooppunt de beschreven stappen doorlopen. Deze werkwijze dimensioneert heel het netwerk zodat de debieten gehaald kunnen worden bij de laagst mogelijke druk. Het is eventueel vanuit esthetisch standpunt aan te raden om bij alle eindpunten de drukval met de zelfde waarde te verhogen om te vermijden dat de ventielen te ver openstaan. Om af te sluiten geeft figuur 10 een overzicht van het stappenplan dat de ontwerper per knooppunt volgt.



Figuur 10: Stappenplan knooppunt dimensionering

3.5 Besluit oplossingsmethode

Deze sectie begon met een subsectie die begon met het overzicht van de problemen bij een nietgedimensioneerdnetwerken, vervolgens de te halen doelstellingen besprak waarbij het netwerk naar wens functioneert, en tot slot de methodes besprak om deze doelstellingen te halen. Hierna volgde een korte zijsprong waarbij de bestaande applicaties voor deze berekening werden geschetst. En tot slot volgden twee subsecties met technieken voor het dimensioneren van het netwerk.

De eerste van deze twee technieken is de eenvoudigste. Hier moet de ontwerper voor elke component kijken of de luchtsnelheid hier niet te hoog is. Als dit wel het geval is moet enkel het formaat aangepast worden.

De tweede techniek is complexer. Deze dimensioneert het netwerk op basis van de gewenste luchtverdeling. Hiervoor moet deze techniek eerst bepalen hoe de drukval in het netwerk aangepast moet worden om de gewenste verdeling te halen. Op basis van deze gewenste waardes bepaalt hij of dit kan door de componenten in het huidige netwerk te wijzigen. Is dit niet het geval dan voegt deze techniek componenten toe en begint hij opnieuw met het wijzigen van componenten.

Door beide technieken toe te passen kan de ontwerper zich er van verzekeren dat zijn netwerk in evenwicht is. Door het feit dat de eerste techniek uitgevoerd moet worden per component en de tweede techniek per knooppunt is dit echter een omslachtig proces. Daarom integreert de volgende sectie deze methodes in Java, om zo de ontwerper de mogelijkheid te bieden deze dimensionering automatisch uit te voeren.

4 Realisatie in Java

De vorige secties bepaalden het fysisch model voor het ventilatienetwerk (sectie 2), de problemen bij het dimensioneren van dit netwerk en de methodes om dit op te lossen (sectie 3). Deze sectie bouwt hierop verder en realiseert deze methodes binnen Java. Deze realisaties kunnen gebruikt worden om een applicatie te maken die in staat is om een ventilatienetwerk te dimensioneren, dit is het doel van sectie 5. Echter voor deze applicatie besproken kan worden moet de lezer inzicht krijgen in de manier waarop een netwerk voorgesteld kan worden binnen Java en de methodes om dit netwerk te dimensioneren. Dit is het doel van deze sectie.

Om dit doel te bereiken is deze sectie opgedeeld in vier subsecties. De eerste subsectie bepaalt de algemene vorm, de main klasse, van de applicatie. Dit geeft inzicht in de drie stappen die de applicatie doorloopt om de dimensionering uit te voeren. Deze stappen zijn: het opbouwen van het netwerk, het dimensioneren van kanaalsecties op basis van luchtsnelheid, en het dimensioneren van het netwerk op basis van de drukonbalans. De rest van deze sectie gaat hier verder op in door elk van deze stappen verder uit te leggen. Voor de eerste stap, de opbouw van het netwerk, geeft subsectie 4.2 een overzicht van de klassen nodig om dit netwerk op te bouwen. Subsectie 4.3 legt in detail de tweede stap, dimensioneren van kanaalsecties op basis van luchtsnelheid, uit. En de derde stap, dimensioneren van het netwerk op basis van drukonbalans, legt subsectie 4.4 uit.

4.1 Programmastructuur

Bij het dimensioneren van het ventilatienetwerk doorloopt dit netwerk drie stappen, deze subsectie schetst kort deze stappen. De eerste stap bouwt het netwerk op, hierbij definieert de ontwerper de debieten van de ruimtes en de topologie van het netwerk, zoals besproken in subsectie 2.1. De tweede stap dimensioneert de kanaalsecties op basis van de luchtsnelheid. Subsectie 3.3 bespreekt hiervoor de gebruikte technieken. De derde stap tot slot dimensioneert het netwerk op basis van de drukonbalans zoals besproken in subsectie 3.4.

Deze structuur moet terug te vinden zijn in de hier beschreven Java applicatie. De code hieronder schetst een eenvoudige voorstelling van een mogelijke main klasse voor deze applicatie:

```
public static void main(String [] args){
    Tak tak = creeerNetwerk();
    tak.dimensioneerSnelheid();
    tak.dimmensioneerKnooppunt();
}
```

Deze main methode creëert eerst en vooral het netwerk, via de code *Tak tak = creeerNetwerk()*. Deze methode heeft twee functies. De eerste functie vraagt aan de ontwerper hoe hij het netwerk wil opbouwen. Een voorbeeld van deze communicatie is terug te vinden in sectie 5. De tweede functie van deze methode geeft deze data door aan de interne netwerkrepresentatie. Hiernaast slaat de code het gecreëerde netwerk op in een tak. De applicatie is zo ontworpen dat het mogelijk is om de volledige netwerkopbouw bij te houden in één tak waardoor het niet nodig is om een extra beginpunt bij te houden.

De tweede stap in de Java applicatie, *tak.dimensioneerSnelheid()*, dimensioneert het netwerk op basis van de luchtsnelheid. Hierbij bepaalt een interne data member de maximale snelheid van de lucht voor de componenten. Op basis van deze maximale luchtsnelheid bepaalt de methode *dimensioneerSnelheid()* voor het hele netwerk of de werkelijke luchtsnelheid nergens boven de maximale luchtsnelheid gaat. Subsectie 4.3 beschrijft deze methode in detail.

De derde en laatste stap van de Java applicatie, *tak.dimensioneerKnooppunt()*, dimensioneert het netwerk op basis van de drukbalans. Hierbij doorloopt de applicatie elk knooppunt, vertrekkende aan de eindpunten, en brengt hiervoor het netwerk in evenwicht. Subsectie 4.4 beschrijft deze methode in detail.

Dit simpele voorbeeld voldoet niet voor een volledige applicatie. In een volledige applicatie is het nodig om meerdere keren het netwerk te ontwerpen en te dimensioneren. Dit zou het voorbeeld echter onnodig complex maken waardoor het niet meer zou voldoen aan zijn doel als eenvoudig voorbeeld. Een realistisch voorbeeld van zo een main klasse is terug te vinden in de broncode van de voorbeeldapplicatie uit sectie 5.

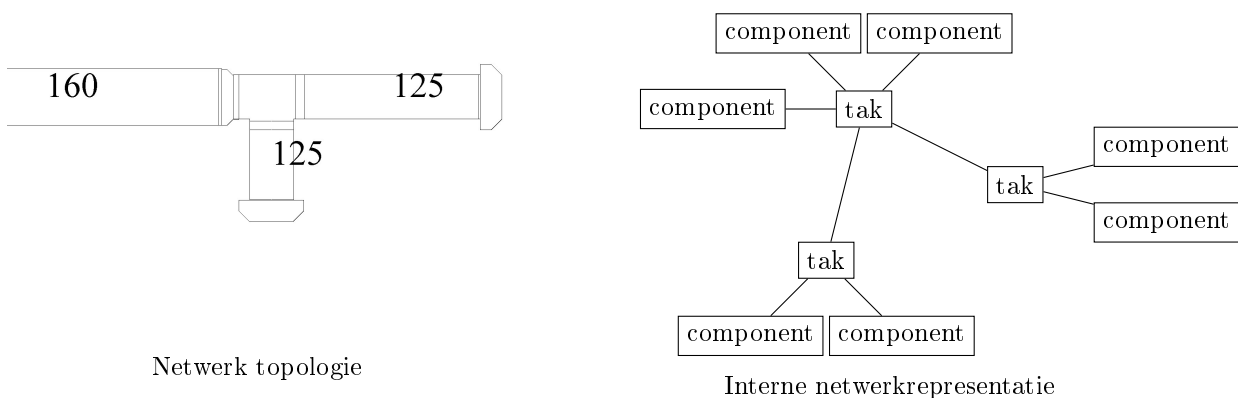
Door de hier voorgestelde stappen aan te houden is de ontwerper zeker dat zijn netwerk volledig in balans is. Dit maakt het voor hem veel eenvoudiger om het netwerk te ontwerpen. De rest van deze sectie gaat dieper in op de hier voorgestelde netwerkrepresentatie (subsectie 4.1) en dimensioneringsmethodes (subsecties 4.3 en 4.4).

4.2 Overzicht interne netwerkrepresentatie

Voorgaande subsectie (subsectie 4.1) besprak een eenvoudige programmastructuur voor een applicatie die een ventilatienetwerk wil dimensioneren. Deze structuur ging er van uit dat de applicatie een interne netwerkrepresentatie bevat die het netwerk bijhoudt. Deze subsectie beschrijft deze interne netwerkrepresentatie. Dit door eerst aan de hand van een voorbeeld de klasse te doorlopen die de netwerkrepresentatie moet bevatten, en vervolgens deze klassen beknopt uit te leggen. De klasse besproken voor deze representatie zijn:

- Component,
- Formaat,
- Tak.

Om de interne netwerkrepresentatie duidelijk te schetsen geeft figuur 11 een eenvoudig netwerk weer met zijn topologie en interne representatie.



Figuur 11: Netwerk voorbeeld

De topologie van dit netwerk bestaat uit een kanaal met een diameter van 160mm dat, via een reductie, gekoppeld is aan een T-stuk. Vanuit dit T-stuk gaat het netwerk verder via twee kanalen met een diameter van 125mm naar twee ventielen. De interne representatie van dit netwerk deelt het netwerk op in drie takken. De eerste tak bevat het kanaal met de diameter van 160mm, de reductie en het T-stuk. De tweede en de derde tak bevatten elk een kanaal van diameter 125mm en een ventiel.

De interne netwerkrepresentatie van figuur 11 geeft een grafisch overzicht van de klassen die de applicatie moet bevatten. In deze figuur zien we twee klassen terugkomen namelijk de tak en de component. Hiervan

is de tak klasse de intelligentste. Deze is zich zowel bewust van de verbinding met de andere takken als van de verbinding met zijn eigen componenten. De component klasse is minder intelligent. Deze kent enkel de tak waartoe hij behoort.

Het ontwerpen van deze interne netwerkrepresentatie biedt twee voordelen. Ten eerste kan de topologie van het ventilatienetwerk volledig bepaald worden met de interne netwerkrepresentatie uit figuur 11. Dit gaat zelfs voor heel grote netwerken, door de componenten tussen elke splitsing bij te houden in takken en deze takken onderling te koppelen. Ten tweede kan elk element (kanaal, T-stuk, reductie, . . .) behandeld worden als een component. Door algemeen te spreken van een component klasse en niet van bijvoorbeeld een buis klasse of een reductie klasse is het mogelijk om deze in de methodes, die de rest van deze sectie (subsectie 4.3 en 4.4) bespreekt, te behandelen zonder elke keer het type component te moeten controleren. De rest van deze subsectie bespreekt de data members en de methodes die deze twee klassen moeten bezitten. En ze bespreekt een extra klasse, de klasse *Formaat*, die het formaat van de componenten bijhoudt.

Klasse Component

De klasse component bevat twee essentiële methodes. het doel van deze methodes is het bestuderen en wijzigen van het formaat. Dit formaat heeft zijn eigen klasse en is een representatie van de aansluitvorm van de component. Zo kan hij bijvoorbeeld een ronde aansluiting van diameter 125mm voorstellen, of een rechthoekig kanaal van 100mm op 80mm. In de applicatie voorgesteld in sectie 5 bevat de klasse component een data member van de klasse *formaat* die hier gebruikt word bij de onderstaande methodes.

Tabel 2: Methodes component

Methode	Beschrijving
<code>formaatIsGelijk(Formaat controleFormaat)</code>	Controleer of het controleFormaat gelijk is aan het huidige formaat
<code>wijzigFormaat(Formaat formaat)</code>	Wijzig het huidige formaat

De eerste methode *formaatIsGelijk(Formaat controleFormaat)* controleert of het huidige componentformaat gelijk is aan het gewenste controleFormaat. Hiernaast bevat de klasse component een methode voor het wijzigen van het formaat, *wijzigFormaat(Formaat nieuweFormaat)*

Klasse Formaat

Zoals eerder vermeld is de klasse *Formaat* een representatievorm voor de aansluitvorm van de component. Op basis van de aansluitvorm en het debiet kan de applicatie kijken of luchtsnelheid in de component de maximale snelheid overstijgt. Deze berekening gebeurt in de klasse *Formaat* zelf. Dit gebeurt met de methode *bepaalFormaat(double debiet)*.

Tabel 3: Methodes Formaat

Methode	Beschrijving
<code>bepaalFormaat(double debiet)</code>	bepaal het gewenste formaat bij het opgegeven debiet

Klasse Tak

De klasse *Tak* is een veel uitgebreidere klasse dan de klasse *Component* of *Formaat*. De data members van deze klasse moeten in staat zijn om heel het netwerk te representeren en de methodes moeten in staat zijn om heel het netwerk te dimensioneren. Deze paragraaf geeft een kort overzicht van de data members en de methodes die in deze klasse terug te vinden moeten zijn.

De datamembers van de klasse *tak* zijn op te delen in twee groepen. De eerste groep staat in voor de interne netwerkrepresentatie en de tweede groep houdt de parameters bij voor tijdens de dimensionering. Tabel 4 geeft een overzicht van alle datamembers.

Methode	Beschrijving
<i>componentLijst</i>	Lijst van alle componenten in de <i>tak</i>
<i>origineleEinddruk</i>	Druk bij begin van dimensioneringsronde
<i>takLijst</i>	Lijst van onderliggende <i>tak</i> ken
<i>verschilDruk</i>	drukverschil tussen beginpunt en eindpunt van de <i>tak</i>

Van deze datamembers dienen de *componentLijst* en de *takLijst* als interne netwerkrepresentatie. De *componentLijst* is een lijst van alle componenten die in de *tak* zitten, en de *takLijst* is een lijst van al de *tak*ken die na de huidige *tak* komen.

Hiernaast houden de datamembers *origineleEinddruk* en *verschilDruk* data bij voor de dimensionering. Tussen verschillende dimensioneringsstappen houden deze de beginwaarde voor respectievelijk de drukval op het einde van de *tak* en de verschildruk tussen begin en eindpunt van de *tak* bij. Dit doen ze om in te kunnen spelen op de wijzigingen in deze waarde, subsectie 4.4 geeft deze dimensionering in detail weer.

Naast deze datamembers heeft de klasse *Tak* een aantal methodes. Deze methodes zijn op te delen in vier groepen. De eerste groep haalt data op uit de klasse, de tweede groep controleert of aan specifieke voorwaarden is voldaan, de derde groep voegt componenten toe aan de *tak* en de vierde groep bestaat uit complexe methodes. Tabel 5 geeft een overzicht van deze methodes en de rest van deze paragraaf bespreekt ze, per groep, in detail.

Methode	Beschrijving	Groep
<i>dimensioneerKnooppunt(double druk)</i>	dimensioneer het knooppunt op het einde van de <i>tak</i>	4
<i>dimensioneerSnelheid()</i>	Dimensioneer de componenten in de <i>tak</i> op basis van de maximale luchtsnelheid	4
<i>eindDruk()</i>	bepaal de druk op het einde van de <i>tak</i>	1
<i>formaat()</i>	bepaal het formaat van de kleinste component in de <i>tak</i>	1
<i>knooppuntIsInEvenwicht()</i>	controleer of het knooppunt in evenwicht is	2
<i>koppelDruk()</i>	Bepaal de druk aan het begin van de <i>tak</i>	1
<i>laatsteComponent()</i>	Bepaal de laatste component van de <i>tak</i>	1
<i>moetFormaatWijzigen()</i>	Bepaal of de <i>tak</i> zijn formaat moet wijzigen	2
<i>voegReductieToe(Formaat formaat)</i>	Voeg een reductie toe aan de <i>tak</i>	3
<i>voegWeerstandToe(double druk)</i>	Voeg een component toe aan de <i>tak</i> die de opgegeven drukval kan realiseren	3
<i>wijzigDruk(double gewensteDrukval)</i>	Probeer de gewenste drukval te halen	4

De methodes uit groep één staan in voor het opvragen van info uit de klasse *Tak*. Zo is het mogelijk om de druk in het begin van de *tak* en de druk op het einde van de *tak* op te vragen met respectievelijk de methodes *eindDruk()* en *koppelDruk()*. Ook is het mogelijk om het formaat van de kleinste component uit de *tak* op te vragen met de methode *formaat()*. Tot slot kan de functie *laatsteComponent()* bepalen wat de laatste component van deze *tak* is.

De tweede groep van methodes voert interne controles uit. Zo controleert de methode *knooppuntIsInEvenwicht()* of de koppeldrukken (zie methode *koppelDruk()*) uit de onderliggende *tak*ken gelijk zijn. En kan de methode *moetFormaatWijzigen()* controleren of het formaat van de componenten in de *tak* gewijzigd moet worden.

De derde groep van methodes voegt componenten toe. Zo voegt de methode *voegReductieToe(Formaat formaat)* een reductie aan het begin van de tak toe zodat de koppeling met bovenliggende tak mogelijk is. Ook de methode *voegWeerstandToe(double druk)* voegt een component toe. Deze component kan bijvoorbeeld een regelklep zijn die zorgt voor een extra drukverlies in de tak.

De vierde groep tot slot bevat complexe methodes die instaan voor de dimensionering van het netwerk. Deze groep bestaat uit drie methodes. De eerste van de drie, *wijzigDruk(double gewensteDrukval)* wijzigt bij de componenten in de tak regelbare componenten, zoals een regelklep, om zo de gewenste drukval te realiseren. De tweede, *dimensioneerSnelheid()*, dimensioneert de tak op basis van de maximale luchtsnelheid. Subsectie 4.3 geeft deze methode weer. Tot slot dimensioneert de derde methode, *dimensioneerKnooppunt(double druk)*, de tak op basis van de druk. Hierbij rekening houdend met de extra druk die overwonnen moet worden voor de bovenliggende knooppunten. Deze druk krijgt de methode mee via de druk parameter. Subsectie 4.4 legt deze methode verder uit.

Door de klassen te ontwerpen zoals hier weergegeven is het mogelijk om een volledig ventilatienetwerk te representeren en te dimensioneren. In de effectieve applicatie, zoals te controleren in de broncode van de applicatie in sectie 5, zitten de klassen complexer in elkaar. Deze subsectie ging hier, om redenen van beknoptheid, niet dieper op in. Ze diende enkel als basis om de lezer een inzicht te geven in de gewenste netwerkstructuur en een overzicht te geven van de belangrijkste methodes van de benodigde klassen. De volgende subsecties gaan verder in op deze methodes door eerst de methode *dimensioneerSnelheid()* uit te leggen (subsectie 4.3) en vervolgens methode *dimensioneerKnooppunt()* (subsectie 4.4).

4.3 Dimensioneren op basis van luchtsnelheid

Eén van de dimensioneringsmethodes van het model dimensioneert het netwerk op basis van de snelheid. Dit dimensioneren gebeurt volgens de methode gedefinieerd in subsectie 3.3. Volgens deze subsectie kan de ontwerper op basis van vergelijking 23 de snelheid in elke component bepalen. Hierbij moet hij rekening houden met zowel het formaat van de component als het debiet dat er door vloeit. Op basis van deze snelheid kan de ontwerper het netwerk dimensioneren.

Deze subsectie bepaalt een methode om deze dimensionering uit te voeren. Dit gebeurt in drie stappen die de methode voor elke tak in het netwerk uitvoert. De eerste stap van deze methode dimensioneert de onderliggende takken. De tweede stap zorgt voor een dimensionering van de tak zelf. De laatste stap kijkt of er problemen zijn met de koppeling tussen de takken en lost deze problemen op. De rest van deze subsectie werkt deze stappen verder uit en sluit af met een algemeen overzicht van deze methode.

Stap 1: Onderliggende takken dimensioneren

De eerste stap in deze methode dimensioneert alle takken die aan de huidige tak gekoppeld zijn. Dit door de methode zelf recursief uit te voeren voor deze takken. De takken zullen dan elk alle stappen van deze subsectie doorlopen waardoor ze het juiste formaat krijgen. In het speciale geval dat de tak geen onderliggende takken heeft (als het de laatste tak voor de kamer is) dan is de variabele takLijst leeg. De for loop wordt in dit geval niet doorlopen waardoor het recursief oproepen van de functie ophoudt. De code hieronder geeft deze stap weer.

```
for(Tak tak: takLijst){
    tak.dimensioneerSnelheid();
}
```

()

Stap 2: Huidige tak dimensioneren

De tweede stap dimensioneert de huidige tak. Om dit te bereiken kijkt de methode eerst of de tak zijn formaat moet wijzigen. Dit gebeurt met een if statement. Vervolgens bepaalt de stap het nieuwe formaat op basis van het huidige debiet; Hierbij eventueel rekening houdend met het formaat type. Tot slot stelt elke component dit nieuwe formaat in als zijn eigen formaat. Dit gebeurt met een for loop die de componentlijst doorloopt. De code zelf heeft onderstaande vorm.

```
if(this.moetFormaatWijzigen(this.debiet())){
    Formaat nieuweFormaat = new Formaat();
    nieuweFormaat.bepaalFormaat(this.debiet);
    for(Component component: componentLijst){
        component.wijzigFormaat(nieuweFormaat);
    }
}
```

Stap 3: Controleren koppeling huidige en onderliggende takken

De laatste stap van deze methode controleert de koppeling tussen de huidige en de onderliggende takken. De methode moet dit controleren omdat het mogelijk is dat door de dimensionering de takken niet meer passen. Deze stap voert deze controle uit door het formaat van de huidige tak met het formaat van elke onderliggende tak te vergelijken. Als deze formaten niet overeenkomen kunnen er twee oplossingen zijn. De eerste oplossing probeert de laatste component aan te passen zodat de koppeling toch mogelijk is. Zo is het bijvoorbeeld mogelijk om een T-stuk een andere zijaansluiting te geven waardoor de takken wel passen. De tweede oplossing voegt, indien de eerste oplossing niet mogelijk is, een reductie toe aan de onderliggende tak zodat de takken zich wel kunnen koppelen. De code hieronder geeft deze stap weer

```
for(Tak tak: takLijst){
    if(tak.formaat() != this.formaat()){
        //Kijken of laatste component van tak dit kan opvangen
        Component component = this.laatsteComponent();
        component.wijzigFormaat(this.formaat(), tak);
        Boolean isGewijzigd = component.formaatIsGelijk(this.formaat());
        //Indien dit niet mogelijk is reductie toevoegen
        if (!isGewijzigd){
            tak.voegReductieToe(this.formaat());
        }
    }
}
```

Overzicht

Deze subsectie bepaalde een methode om het netwerk te dimensioneren op basis van debiet. Hiervoor moest de methode drie stappen doorlopen die elk kort beschreven werden. Deze laatste paragraaf geeft de aparte stukken code in hun geheel weer.


```

public void dimensioneerSnelheid () {
    //Voor onderliggende takken formaat wijzigen
    for(Tak tak: takLijst){
        tak.dimensioneerSnelheid();
    }

    //Kijken of formaat gewijzigd moet worden en indien nodig wijzigen
    if(this.moetFormaatWijzigen(this.debiet())){
        //Formaat bepalen
        Formaat nieuweFormaat = new Formaat();
        nieuweFormaat.bepaalFormaat(this.debiet);
        //Componenten wijzigen naar nieuwe formaat
        for(Component component: componentLijst){
            component.wijzigFormaat(nieuweFormaat);
        }
    }

    //Kijken of formaat van takken overeen komt, indien nodig reductie toevoegen
    for(Tak tak: takLijst){
        if(tak.formaat() != this.formaat()){
            //Kijken of laatste component van tak dit kan opvangen
            Component component = this.laatsteComponent();
            component.wijzigFormaat(this.formaat(), tak);
            Boolean isGewijzigd = component.formaatIsGelijk(this.formaat());
            //Indien dit niet mogelijk is reductie toevoegen
            if (!isGewijzigd){
                tak.voegReductieToe(this.formaat());
            }
        }
    }
}

```

4.4 Dimensioneren op basis van druk

Subsectie 3.4 definieerde een mathematische techniek om het netwerk te dimensioneren op basis van druk. Deze subsectie bouwt hierop verder en bepaalt een methode die op een model, dat voldoet aan de voorwaarden van subsectie ??, toegepast kan worden. De methode zelf is opgebouwd op basis van figuur 10. Om de werking van deze methode te schetsen definieert deze subsectie eerst een aantal technieken en voegt deze vervolgens samen tot één geheel.

In totaal definieert de subsectie zeven technieken. De eerste drie dienen voor het instellen van de druk van het huidige knooppunt. De eerste van deze drie brengt de druk van de onderliggende takken zo dicht mogelijk bij de optimale einddruk. De volgende techniek verlaagt dan weer de drukken om deze af te stemmen op de druk die het verst verwijderd is van de gewenste druk. De derde techniek voegt waar nodig componenten toe voor de dimensionering. Na elk van de technieken controleert de methode met een vierde techniek of het knooppunt in evenwicht is; indien dit het geval is, is de methode klaar. Als het systeem niet in evenwicht is na het toevoegen van de componenten herstart deze via een loop bij de eerste techniek. Dit is de vijfde techniek. Door het herdimensioneren wijzigt de druk in het knooppunt. Dit zorgt voor een

wijziging in het drukverschil die de bovenliggende knooppunten moeten overwinnen. Techniek zes bepaalt de wijziging in het te overwinnen drukverschil en verrekent deze. Tot slot moet elk knooppunt deze methode uitvoeren, vertrekkende van de eindpunten. Dit gebeurt door de zevende en laatste techniek. De rest van deze subsectie bespreekt deze technieken stuk per stuk en voegt ze op het einde samen tot één geheel.

Verhogen druk

De eerste techniek voor de dimensionering van het knooppunt probeert elke onderliggende tak op een druk te brengen waarbij dit knooppunt en de bovenliggende knooppunten in evenwicht zijn. Hiervoor bepaalt deze techniek eerst per tak de druk die gehaald moet worden. Dit door het verschil te bepalen tussen de huidige einddruk en de koppeldruk van de onderliggende tak. Vervolgens telt hij hierbij de verschildruk van de bovenliggende knooppunten op. Tot slot probeert de onderliggende tak deze drukverhoging te halen om zo het knooppunt in evenwicht te brengen. De code hieronder geeft deze techniek weer.

```
for(Tak tak: takLijst){
    double verschilDrukTak = this.eindDruk() - tak.koppelDruk() + verschilDruk;
    tak.wijzigDruk(verschilDrukTak);
}
```

Verlagen druk

Als het knooppunt niet in evenwicht is na het verhogen van de drukken is de volgende stap het verlagen van de drukken naar de laagste druk in het knooppunt. Hiervoor bepaalt de hier beschreven techniek eerst de laagste druk van de onderliggende takken. Dit door alle takken te doorlopen en de druk te vergelijken met de laagste al gevonden druk. Op basis van de laagste druk kan elke tak zijn te behalen drukverlaging bepalen en deze proberen te halen. De code hieronder geeft deze techniek weer.

```
double laagsteDruk = 0;
for(Tak tak : takLijst){
    if(tak.koppelDruk() < laagsteDruk){
        laagsteDruk = tak.koppelDruk();
    }
}
for(Tak tak : takLijst){
    tak.wijzigDruk(laagsteDruk - tak.eindDruk());
}
```

Componenten toevoegen

Na het verhogen en het verlagen van de drukken in de onderliggende takken is het knooppunt meestal in evenwicht. Als dit niet het geval is moet de methode een component toevoegen aan de takken die deze druk niet halen. Hiervoor controleert deze techniek voor elke tak of deze de huidige einddruk haalt. Voor de takken waarbij dit niet het geval is voegt de techniek een extra weerstand toe. De tak zelf bepaalt welke weerstand er toegevoegd moet worden. De code hieronder geeft deze techniek weer.

```
for(Tak tak : takLijst){
    if(this.eindDruk() != tak.koppelDruk()){
        tak.voegWeerstandToe(this.eindDruk);
    }
}
```

Controleren op evenwicht

Na het verhogen en verlagen van de druk met voorgaande technieken bestaat de kans dat het netwerk in evenwicht is. Als dit het geval is dan is de methode klaar en kan zij eindigen. Dit gebeurt door het return commando uit te voeren, dit onderbreekt de methode. De code hieronder geeft deze techniek weer.

```
if(this.knooppuntInEvenwicht()){
    return;
}
```

Dimensioneringsloop

Na het toevoegen van componenten zoals hierboven beschreven moet het dimensioneringsproces opnieuw starten. Hiervoor gebruikt de methode een while loop. In deze loop wordt de druk eerst verhoogd, vervolgens verlaagd en tot slot voegt de loop indien nodig componenten toe. Na het uitvoeren van deze stappen begint de loop opnieuw zolang het knooppunt niet in evenwicht is. De onderstaande code geeft deze loop weer.

```
while(!this.knooppuntIsInEvenwicht()){
}
```

Herbepalen verschildruk

Door het verhogen en verlagen van de drukken in de onderliggende takken wijzigt de druk in het knooppunt zelf. Deze drukverandering zorgt voor een wijziging in het drukverschil dat de bovenliggende knooppunten moeten overwinnen. Om deze wijziging bij te kunnen houden bepaalt deze techniek eerst, voor het aanpassen van de drukken, de origineleEinddruk van de huidige tak. Na het uitvoeren van de wijzigingen herdefinieert deze techniek de verschilDruk op basis van de originele einddruk en de huidige einddruk. De code hieronder geeft deze twee stappen weer.

```
origineleEinddruk = this.einddruk();
verschilDruk = verschilDruk - (this.eindDruk() - origineleEinddruk);
```

Netwerk doorlopen

Elk knooppunt moet de tot nu toe beschreven technieken uitvoeren. En dit te beginnen vanaf de knooppunten het dichtst bij de eindpunten. Om dit te realiseren roept de methode zichzelf recursief op voor elke tak die gekoppeld is aan de huidige tak. Hierbij bepaalt de methode zelf eerst de nieuwe verschildruk op basis van de voorgaande verschildruk en de huidige te overwinnen verschildruk. Hierna vraagt de methode aan alle onderliggende takken om zichzelf te dimensioneren. De code hieronder definieert deze techniek.

```
for(Tak tak: takLijst){
    //Verschildruk bepalen
    double verschilDrukTak = this.eindDruk() - tak.koppelDruk() + verschilDruk;
    //Knooppunt tak dimensioneren
    tak.dimensioneerKnooppunt(verschilDrukTak)
}
```

Overzicht

De voorgaande paragrafen bepaalden de bouwstenen waaruit de methode is opgebouwd. Deze paragraaf voegt al deze code stukken samen tot één geheel. Dit geheel bestaat uit een methode die zichzelf eerst recursief oproept om er zo voor te zorgen dat de dimensionering begint bij de laatste knooppunten. Vervolgens start er een loop die de methode blijft doorlopen tot het systeem in evenwicht is. In deze loop probeert de methode eerst om alle drukken gelijk te stellen aan de gewenste druk. Als dit niet lukt verlaagt de methode de druk tot de laagst gerealiseerde druk van de onderliggende takken. Tot slot voegt de methode componenten toe aan de takken die nog niet in evenwicht zijn. Hierna begint de loop opnieuw tot het huidige knooppunt in evenwicht is. Hierop aansluitend zal door het recursief karakter het voorgaande knooppunt behandeld worden. De code hieronder geeft het geheel weer.

```

public void dimensioneerKnooppunt (double verschilDruk) {
    //vastleggen huidige einddruk
    double origineleEinddruk = this.eindDruk();

    //Onderliggende takken dimensioneren
    for(Tak tak: takLijst){
        //Verschildruk bepalen
        double verschilDrukTak = this.eindDruk() - tak.koppelDruk() + verschilDruk;
        //Knooppunt tak dimensioneren
        tak.dimensioneerKnooppunt(verschilDrukTak)
    }
    //Systeem dimensioneren tot in evenwicht
    while(this.knooppuntInEvenwicht()){
        //verschildruk aanpassen
        verschilDruk = verschilDruk - (this.eindDruk() - origineleEinddruk);
        origineleEinddruk = this.eindDruk();

        //Drukken verhogen
        for(Tak tak: takLijst){
            double verschilDrukTak = this.eindDruk() - tak.koppelDruk() + verschilDruk;
            tak.wijzigDruk(verschilDrukTak);
        }
        //Controleren of netwerk in evenwicht is
        if(this.knooppuntInEvenwicht()){
            return;
        }
        //Laagste druk bepalen
        double laagsteDruk = 0;
        for(Tak tak : takLijst){
            if(tak.koppelDruk() < laagsteDruk){
                laagsteDruk = tak.koppelDruk();
            }
        }
        //Drukken verlagen
        for(Tak tak : takLijst){
            tak.wijzigDruk(laagsteDruk - tak.eindDruk());
        }
        //Controleren of netwerk in evenwicht is
        if(this.knooppuntInEvenwicht()){
            return;
        }
        //Componenten toevoegen bij takken die nog niet in evenwicht zijn
        for(Tak tak : takLijst){
            if(this.eindDruk() != tak.koppelDruk()){
                tak.voegWeerstandToe(this.eindDruk);
            }
        }
    }
}

```

4.5 Besluit realisatie in Java

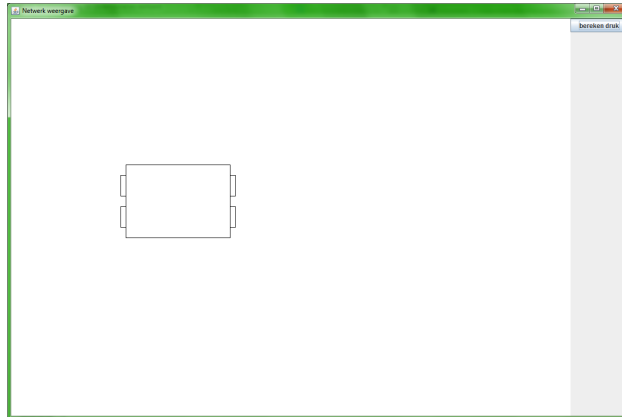
Deze sectie beschreef hoe het fysisch model uit sectie 2 en de dimensioneringstechnieken uit sectie 3 gerealiseerd kunnen worden in Java. Dit gebeurde in vier stappen met elk hun eigen subsectie. De eerste subsectie 4.1 gaf een overzicht van de algemene vorm, de main klasse, van deze realisatie. Op basis van deze vorm bepaalde subsectie 4.2 de klassen nodig om het netwerk te kunnen representeren en te kunnen dimensioneren. De volgende subsecties gingen verder in op deze dimensionering en beschreven de methode voor de dimensionering op basis van de lichtsnelheid en de dimensionering op basis van de druk. Dit gebeurde respectievelijk in subsectie 4.3 en subsectie 4.4.

Deze subsectie heeft de lezer het inzicht gegeven in de elementen (klassen en methodes) die een applicatie nodig heeft om een ventilatienetwerk intern te kunnen representeren en te kunnen dimensioneren. De volgende sectie bouwt hier op verder en geeft de lezer een voorbeeld van hoe zo een applicatie er uit kan zien.

5 Toepassingsvoorbeeld

De voorgaande secties bepaalden twee mogelijke oplossingen voor de karakterisering en dimensionering van een ventilatiesysteem. De eerste oplossing bestond uit een mathematisch model dat de dimensionering uitvoerde op basis van vergelijkingen. De tweede sectie integreerde dit model in Java. Deze integratie bepaalde een techniek om de dimensionering via een objectgeoriënteerde manier op te lossen.

Deze sectie bouwt verder op de integratie in Java en geeft een voorbeeld van hoe zo een applicatie er uit kan zien. Figuur 12 geeft het startscherm van deze applicatie weer.

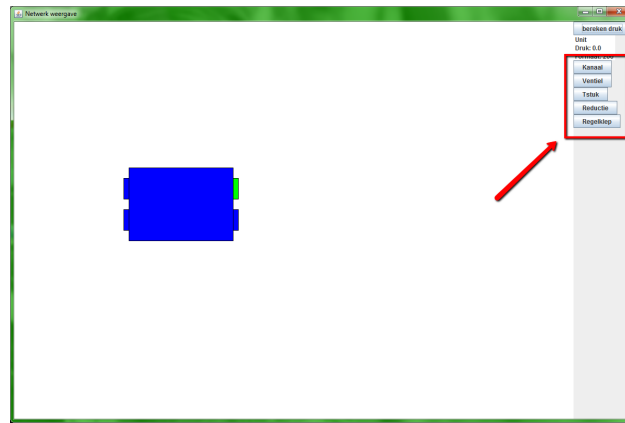


Figuur 12: Startscherm

De rest van deze sectie is opgedeeld in drie subsecties. De eerste subsectie legt uit hoe de ontwerper zijn netwerk opbouwt. De tweede subsectie geeft weer hoe de applicatie het netwerk dimensioneert. En de derde subsectie geeft tot slot een overzicht van hoe de ontwerper het netwerk kan bestuderen.

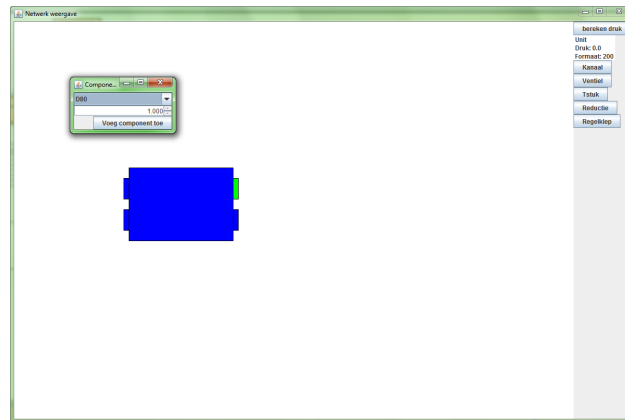
5.1 Opbouwen netwerk

Bij de netwerkopbouw bepaalt de ontwerper hoe het netwerk in elkaar zit. Hij bepaalt welke componenten nodig zijn en bouwt hiermee zijn netwerk op. Hiervoor start hij altijd bij de unit. De eerste stap is dan ook het bepalen waar de componenten aangesloten moeten worden. Hij maakt een keuze tussen de vier aansluitingen en selecteert de gewenste aansluiting. Na selectie verschijnt er een keuzemenu waaruit hij de volgende component kan kiezen. Figuur 13 geeft dit weer.



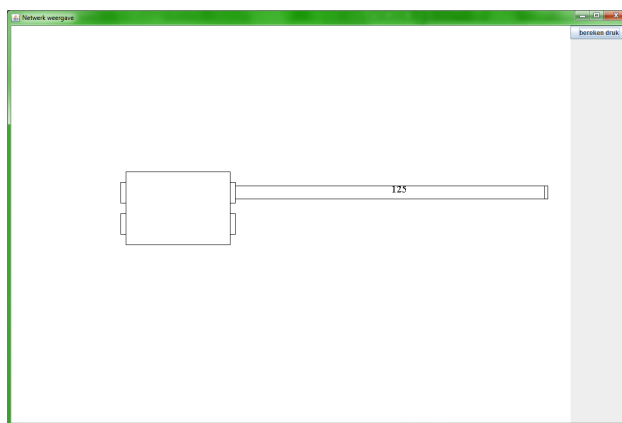
Figuur 13: Unit geselecteerd

In het huidige voorbeeld kiest de ontwerper voor een kanaal. Door het aanklikken van de knop kanaal verschijnt een venster met extra keuzemogelijkheden. Hier kan de ontwerper specificaties instellen zoals de lengte en het formaat van het kanaal. Figuur 14 geeft dit weer.



Figuur 14: Component toevoegen

Na het instellen van de specifieke eigenschappen bevestigt de ontwerper zijn keuze. De applicatie bepaalt op basis van de gemaakte keuzes de toe te voegen component en voegt deze toe aan het huidige netwerk. In dit voorbeeld voegt hij een rond kanaal met een lengte van drie meter en een diameter van honderdvijfentwintig millimeter toe aan de unit. Figuur 15 geeft dit weer.

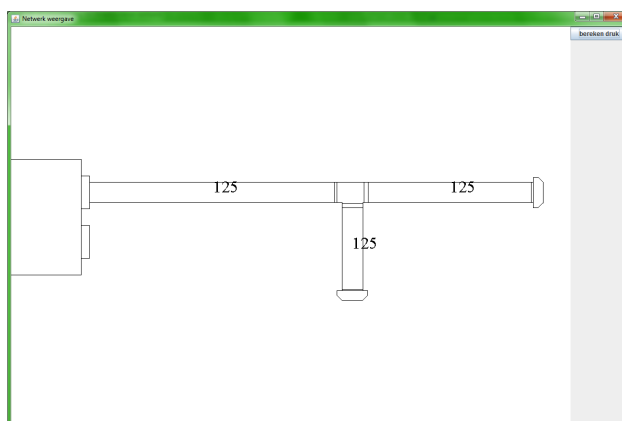


Figuur 15: Koker toegevoegd aan unit

Door de stappen in deze subsectie te herhalen kan de ontwerper zijn volledige netwerk bepalen. Hierbij moet hij zelfs geen rekening houden met de koppeling tussen de componenten omdat de applicatie deze problemen automatisch oplost bij de dimensionering.

5.2 Netwerk dimensioneren

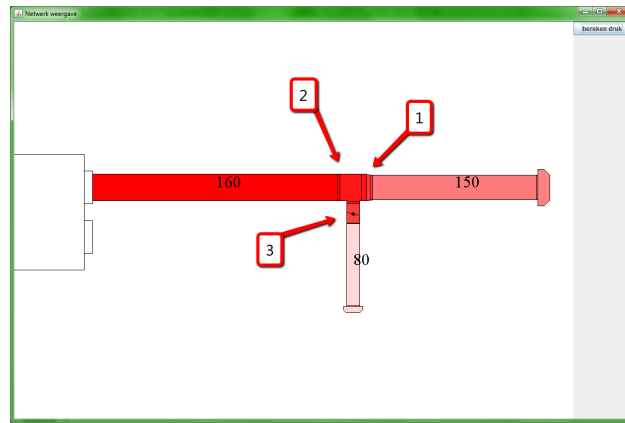
Via de methode beschreven in subsectie 5.1 kan de ontwerper zijn netwerk opbouwen. Figuur 16 geeft dit weer.



Figuur 16: Ongebalanceerd netwerk

Bij dit eenvoudig voorbeeld is er maar één tak van de unit in gebruik genomen. dit is geen realistische situatie maar het hier besproken voorbeeld kan ook toegepast worden voor grotere netwerken.

Nu de ontwerper zijn netwerk gedefinieerd heeft kan hij het netwerk balanceren. Dit doet hij door op de knop *bereken druk* te klikken. De applicatie doorloopt nu de methoden gedefinieerd in subsectie 3.3 en 3.4 om het volledige netwerk te dimensioneren. Deze dimensionering wijzigt de diameters van de componenten en voegt waar nodig regelkleppen en reducties toe. Figuur 17 geeft de resultaten weer.

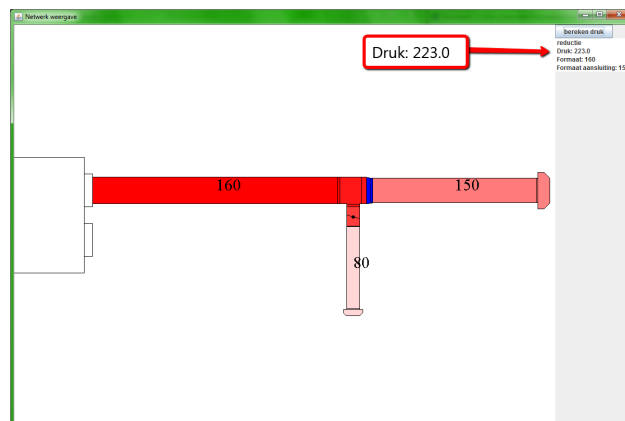


Figuur 17: Netwerk in balans

In het hier uitgewerkte voorbeeld voert de applicatie vier belangrijke wijzigingen uit. Ten eerste wijzigt hij de diameter van alle componenten om er voor te zorgen dat de snelheid niet te hoog is. Ten tweede voegt de applicatie een reductie toe om het T-stuk te kunnen koppelen met zijn hoofdtak. Ten derde wijzigt hij de zijaansluiting van het T-stuk om zo koppelbaar te zijn met zijn zijtak. En tot slot voegt deze een regelklep toe aan het systeem om het zo in evenwicht te krijgen. Zo is het hele netwerk gedimensioneerd zonder tussenkomst van de ontwerper.

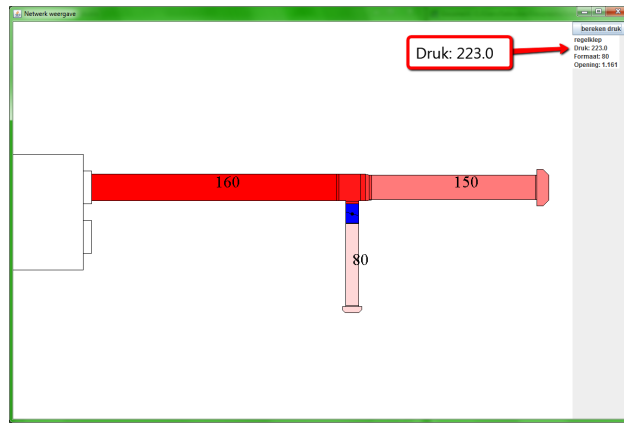
5.3 Netwerk bestuderen

In de vorige subsecties bouwde de ontwerper zijn systeem op en balanceerde hij het. Nu kan hij zijn netwerk verder bestuderen. Dit kan hij doen door elke component te selecteren en te kijken naar de instellingen en wijzigingen. Zo kan hij de reductie selecteren en kijken naar de huidige druk of de huidige diameters. Figuur 18 geeft dit weer.



Figuur 18: Reductie geselecteerd

De ontwerper kan niet enkel de reductie selecteren maar elke component in het netwerk. Hierbij krijgt hij van deze component de gewenste informatie. Zo kan hij ook de regelklep selecteren en krijgt hij hierbij informatie over de opening van deze klep. Wat hierbij opvalt is dat de druk van de reductie zo goed als gelijk is aan die van de regelklep. Dit is ook een vereiste omdat het systeem anders niet in evenwicht zou zijn. Figuur 19 geeft dit weer.



Figuur 19: Regelklep geselecteerd

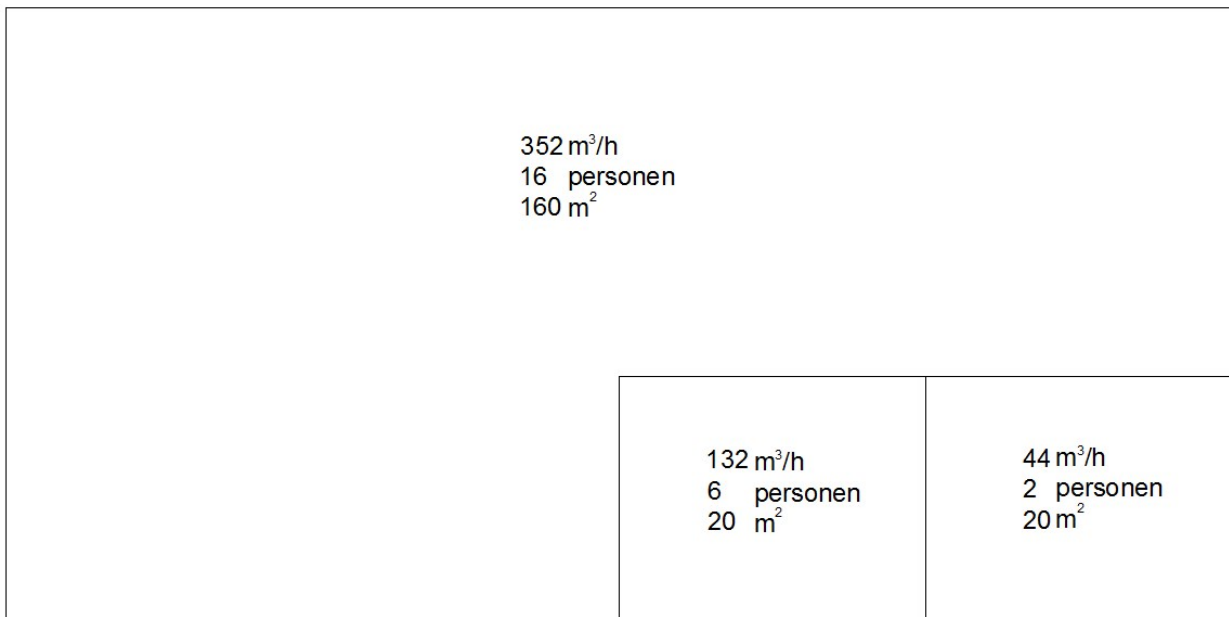
6 Testcase

Deze sectie test de ontwikkelde applicatie. Dit gebeurt in zes stappen. De eerste stap geeft een overzicht van het gebouw gebruikt voor deze testcase. De tweede dimensioneert de kanaalsecties op basis van de luchtsnelheid. De derde stap geeft weer hoe de formules voor het drukverlies bepaald worden voor de gebruikte componenten (leidingen, bochten, T-stukken, regelkleppen en eindventielen). Vervolgens dimensioneert de vierde stap het netwerk op basis van de drukonbalans. Hierna vergelijkt de vijfde stap de resultaten van deze testcase met de resultaten volgens de software. En om af te sluiten trekt deze sectie een aantal besluiten over de ontwikkelde applicatie.

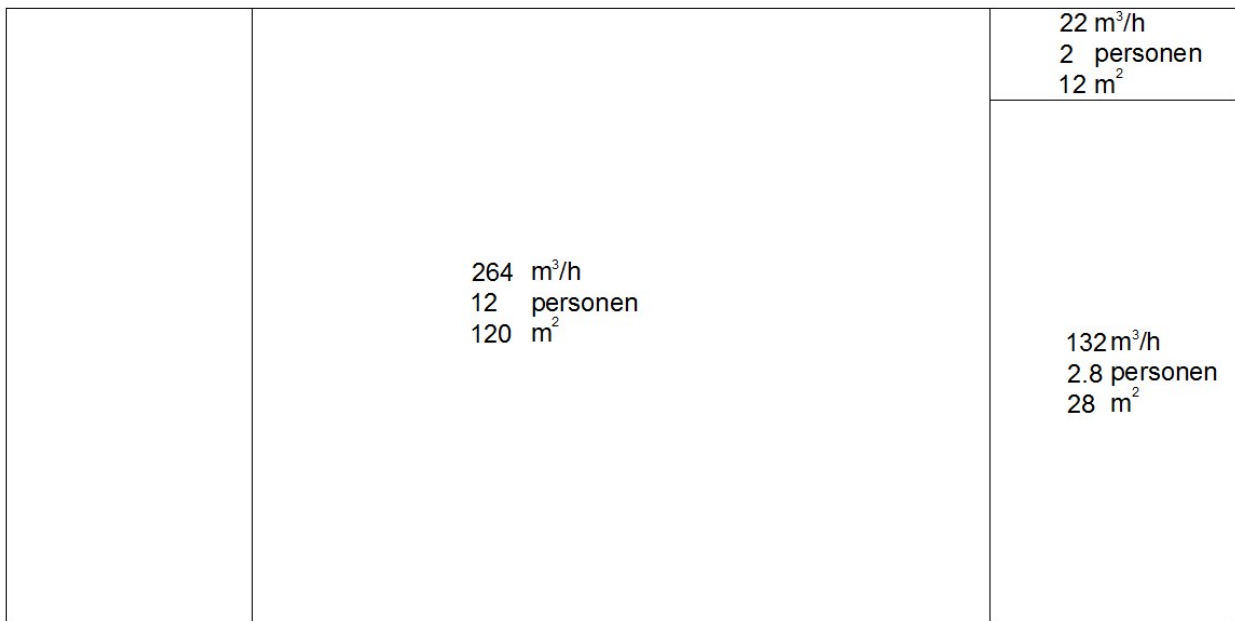
6.1 Overzicht gebouw voor testcase

Voor het testen van de software, ontwikkeld in deze thesis, schetst deze sectie de uitvoering van een handmatige dimensionering. Deze subsectie geeft een overzicht van de startvoorwaarde voor deze dimensionering. Met de startvoorwaarde worden hier de debieten per ruimte en de topologie van het netwerk bedoeld.

Het bepalen van de debieten per kamer gebeurt op basis van de grondplannen. Figuur 20 en 21 geven deze weer.



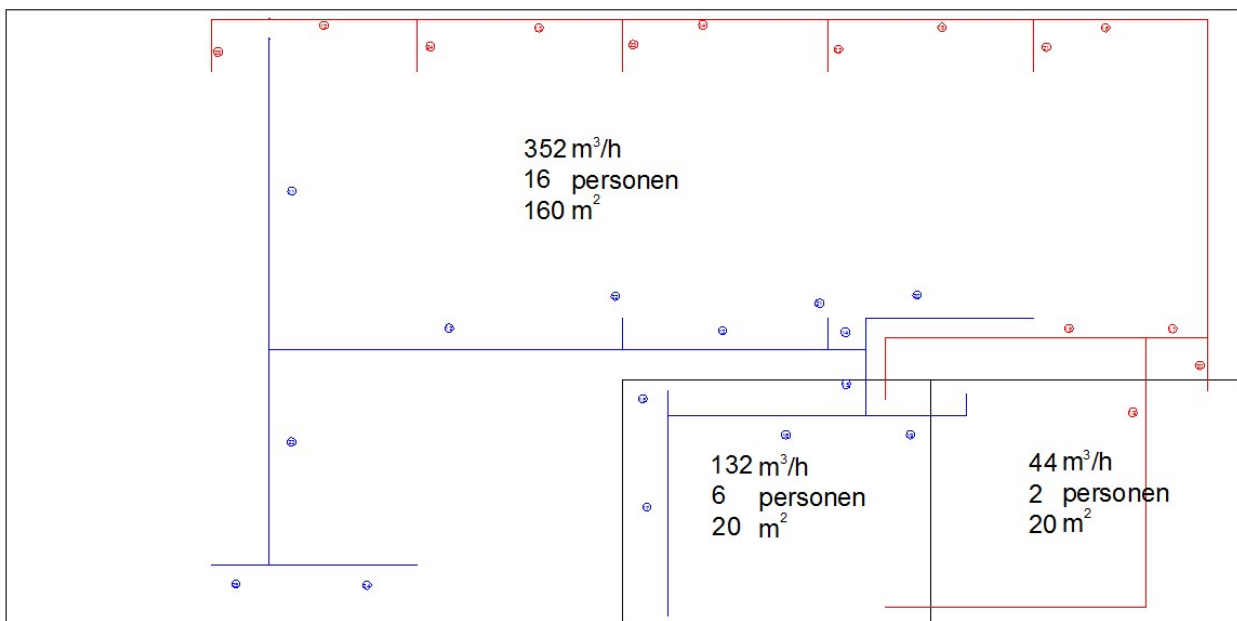
Figuur 20: Grondplan gelijkvloers



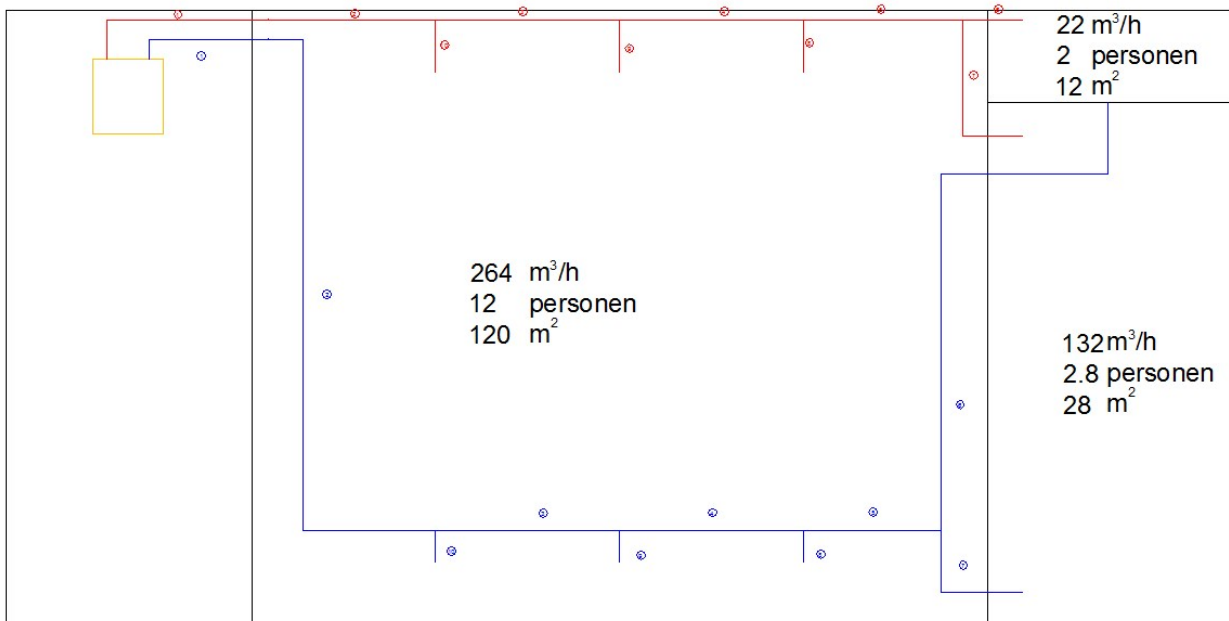
Figuur 21: Grondplan eerste verdiep

Deze figuren geven een overzicht van de gebouwen voor een kleine BVBA. De hier gebruikte grondplannen bevatten zes ruimtes. Binnen deze ruimtes staan drie waarden vermeld. De onderste staat voor de oppervlakte, de middelste voor de minimumbezetting en de bovenste voor de debieten die in deze ruimtes gehaald moeten worden. Deze debieten zijn bepaald op basis van de norm *NBN EN 13779*.

Op basis van deze grondplannen kan de topologie van het netwerk bepaald worden. Figuren 22 en 23 geven deze weer.



Figuur 22: Leidingnetwerk gelijkvloers

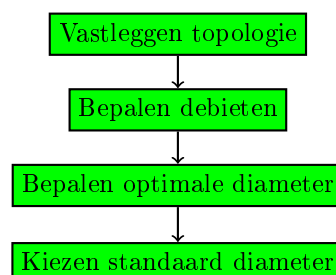


Figuur 23: Leidingsnetwerk eerste verdiep

Bij het ontwerpen van deze topologie zijn een aantal keuzes gemaakt. Om te beginnen is ervoor gekozen om de unit op het eerste verdiep op te hangen (de unit wordt in figuur 23 voorgesteld als de groene kader). Verder is ervoor gekozen om de lucht in de ruimtes met een debiet boven de $150 \frac{m^3}{h}$ door meerdere ventielen binnen te laten blazen. En tot slot is ervoor gekozen om juist na de unit het leidingsnetwerk op te splitsen in de takken voor het eerste verdiep en de takken voor het gelijkvloers. Dit zorgt ervoor dat in heel het gebouw maar één boring door de vloer gemaakt moet worden.

6.2 Dimensioneren kanaalsectie op basis van lichtsnelheid

Voor het dimensioneren van het leidingnetwerk is de eerste stap het dimensioneren van de kanaalsecties op basis van de lichtsnelheid. Dit gebeurt in vier stappen. De eerste stap voegt de topologie (uit voorgaande sectie) in in Excel. De tweede stap bepaalt de debieten voor het hele netwerk. Deze debieten liggen vast voor de ventielen, en op basis van deze debieten en de topologie van het netwerk liggen alle debieten in het netwerk vast. De derde stap bepaalt de minimaal benodigde diameter om de snelheid te beperken, en de vierde kiest een standaard diameter. Figuur 24 geeft een overzicht van deze stappen.



Figuur 24: Overzicht dimensionering

De manuele ontwerpprocedure, zoals hier beschreven, gebeurt met behulp van een Excel rekenblad. De rest van deze subsectie geeft weer hoe de bovenvermelde stappen, met behulp van dit Excel rekenblad, uitgevoerd wordt.

Topologie invoeren in Excel

Om het netwerk te kunnen dimensioneren op basis van de luchtsnelheid in de kanalen moet de topologie van het netwerk gekend zijn. De dimensionering, uitgevoerd in deze sectie maakt gebruik van Excel, de eerste stap is dan ook om deze netwerktopologie in Excel vast te leggen. Figuur 25 geeft dit weer.

Leidingsectie	Diameter	Componenten													
1	80	Kanaal													
2	80		Bocht 90	Kanaal	Tstuk										
3	80		Kanaal	bocht 90	Kanaal		bocht 90	kanaal		Tstuk					
4	80			Kanaal	Tstuk										
5	80														
6	80														
7	80														
8	80														
9	80														
10	80														
11	80														
12	80														
13	80														
14	80														
15	80														
16	80														
17	80														
18	80														
19	80														
20	80														
21	80														
22	80														
23	80														
24	80														
25	80														

Figuur 25: Topologie in Excel

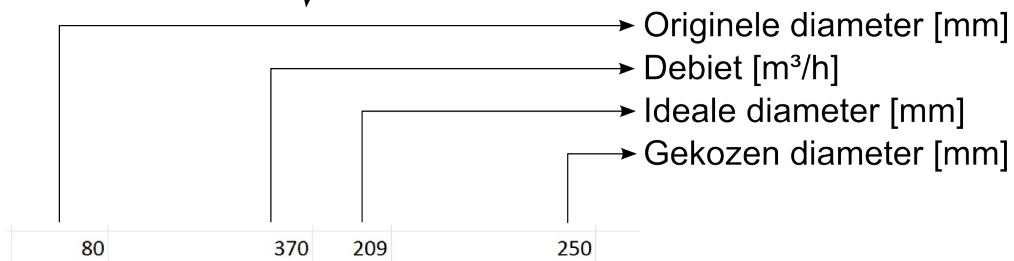
Binnen deze figuur staat elke rij voor een tak. Een tak volgt hier zijn definitie in subsectie 3.4 op pagina 29. Aangezien er nog geen drukvallen gedefinieerd zijn wordt hier aangenomen dat in elk T-stuk een knooppunt ligt en dat de componenten na dit T-stuk in een nieuwe tak zitten. Zo deelt deze testcase heel het netwerk op in takken. Elke tak heeft een nummer en een diameter. Hiernaast geeft de inspringsing aan hoe de takken gekoppeld zijn. De takken met gelijke inspringsing zijn aan de tak gekoppeld met één inspringsing minder. Zo zijn tak 2 en tak 11 gekoppeld aan tak 1.

Bepalen debieten

In het netwerk vloeit een specifiek debiet. Bij aanvang van de berekening zijn enkel de debieten in de laatste takken, waar de ventielen staan, gekend. Maar omdat de topologie gekend is, is het eenvoudig om te bepalen welke debieten in de bovenliggende takken vloeien. Dit gebeurt eenvoudig weg door de debieten van de gekoppelde takken op te tellen. Daar de topologie volledig bepaald is, en er op elk eindpunt een ventiel ligt waarvan de debieten gekend van zijn, liggen de debieten voor het volledige netwerk vast. Hierbij wordt aangenomen dat er binnen het systeem geen lekken optreden. De debieten voor elke tak zijn terug te vinden in het Excel document van deze testcase. Om de link met de topologie goed te bewaren worden ze bijgehouden zoals weergegeven in figuur 26.

Toevoer																				
1	80	898	326	250																
2	80		370	209	250															
3			80	282	183	200														
4				80	194	152	160													
5					80	106	112	125												
6						80	44	73	80											
7						80	62	86	125											
8						80	88	102	125											
9				80	88	102	125													
10			80	88	102	125														
11	80		528	250	250															
12			80	387,2	214	250														
13				80	316,8	194	200													
14					80	246,4	171	200												
15						80	176	145	160											
16							80	132	125	125										
17								80	66	89	125									
18								80	66	89	125									
19									80	44	73	80								
20									80	70,4	92	125								
21					80	70,4	92	125												
22				80	70,4	92	125													
23			80	140,8	129	160														
24				80	70,4	92	125													
25				80	70,4	92	125													

Legende Originele diameter Debiet Optimale diameter Gekozen diameter



Figuur 26: Dimensioneren kanaalsectie op basis van luchtsnelheid

In deze figuur zien we eerst de originele diameter, vervolgens het debiet, dan de minimale diameter (waarbij de snelheid onder de drie meter per seconde ligt) en tot slot de gekozen diameter. Volgende paragrafen bepalen deze minimale en kiezen op basis hiervan de optimale diameter. Zoals eerder vermeld worden de debieten bij de ventielen overgenomen en bij de knooppunten samengeteld. Zo zien we dat het debiet in tak 11 ($528 \frac{m^3}{h}$) de som is van het debiet in tak 12 ($387,2 \frac{m^3}{h}$) en tak 23 ($140,8 \frac{m^3}{h}$).

Bepalen optimale diameter

Na het bepalen van de topologie en de debieten bepaalt deze testcase de optimale diameter, op basis van de technieken uit subsectie 3.3. Voor deze testcase is de optimale diameter afhankelijk van, zoals vergelijking 27 weergeeft, het debiet en de luchtsnelheid.

$$\begin{aligned}
A &= \frac{\phi}{v} \\
\frac{\pi d^2}{4} &= \frac{\phi}{v} \\
d &= \sqrt{\frac{4\phi}{\pi v}}
\end{aligned}
\tag{27}$$

Binnen deze vergelijking staat A voor het oppervlak van het kanaal, dit oppervlak kan bepaald worden met formule $\frac{\pi d^2}{4}$ waarin d staat voor de diameter. Deze formule geldt enkel voor ronde kanalen, aangezien deze testcase enkel gebruik maakt van ronde kanalen is dit een valide aanname. Verder staat ϕ voor het debiet en v voor de lichtsnelheid.

Op dit moment is het debiet al gekend, deze werd berekend in subsectie 6.2. Dit debiet moet wel omgezet worden naar een debiet in $\frac{m^3}{s}$. Verder rekt deze testcase met een lichtsnelheid van $3\frac{m}{s}$ [5, p.6].

Door gebruik te maken van deze waardes bepaalt deze testcase voor elke kanaalsectie de ideale diameter. Zo is in figuur 26 te zien dat de minimale diameter voor tak twee een diameter van 209 mm is.

Kiezen standaard diameter

Voorgaande subsectie bepaalde op basis van het debiet en de lichtsnelheid de optimale diameter. In de industrie bestaan deze maten, in de meeste gevallen, niet. Het is dus nodig om andere diameters te kiezen dan de berekende diameters. Tabel 6 geeft een overzicht van de standaard diameters (veelgebruikte diameters in de industrie) die deze testcase gebruikt.

Tabel 6: Standaard diameters

Diameter [mm]
80
125
160
200
250

Deze testcase kiest voor elke berekende diameter een standaard diameter die in de buurt ligt van deze berekende diameter. Deze standaard diameter moet groter zijn dan de berekende diameter, anders ligt de lichtsnelheid toch hoger dan de maximale lichtsnelheid. De diameters zelf zijn voor elke tak terug te vinden in het Excel rekenblad, en zijn hier weergegeven in figuur 26.

Bij het bestuderen van deze tabel valt op dat, bij tak één, de gekozen diameter kleiner is dan de berekende diameter. Dit was nodig omdat de software, ontwikkeld bij deze thesis, enkel gebruik maakt van standaard diameters gaande tot 250 mm^2 . Dit was kleiner dan de gewenste diameter waardoor er gekozen moest worden voor de standaard diameter.

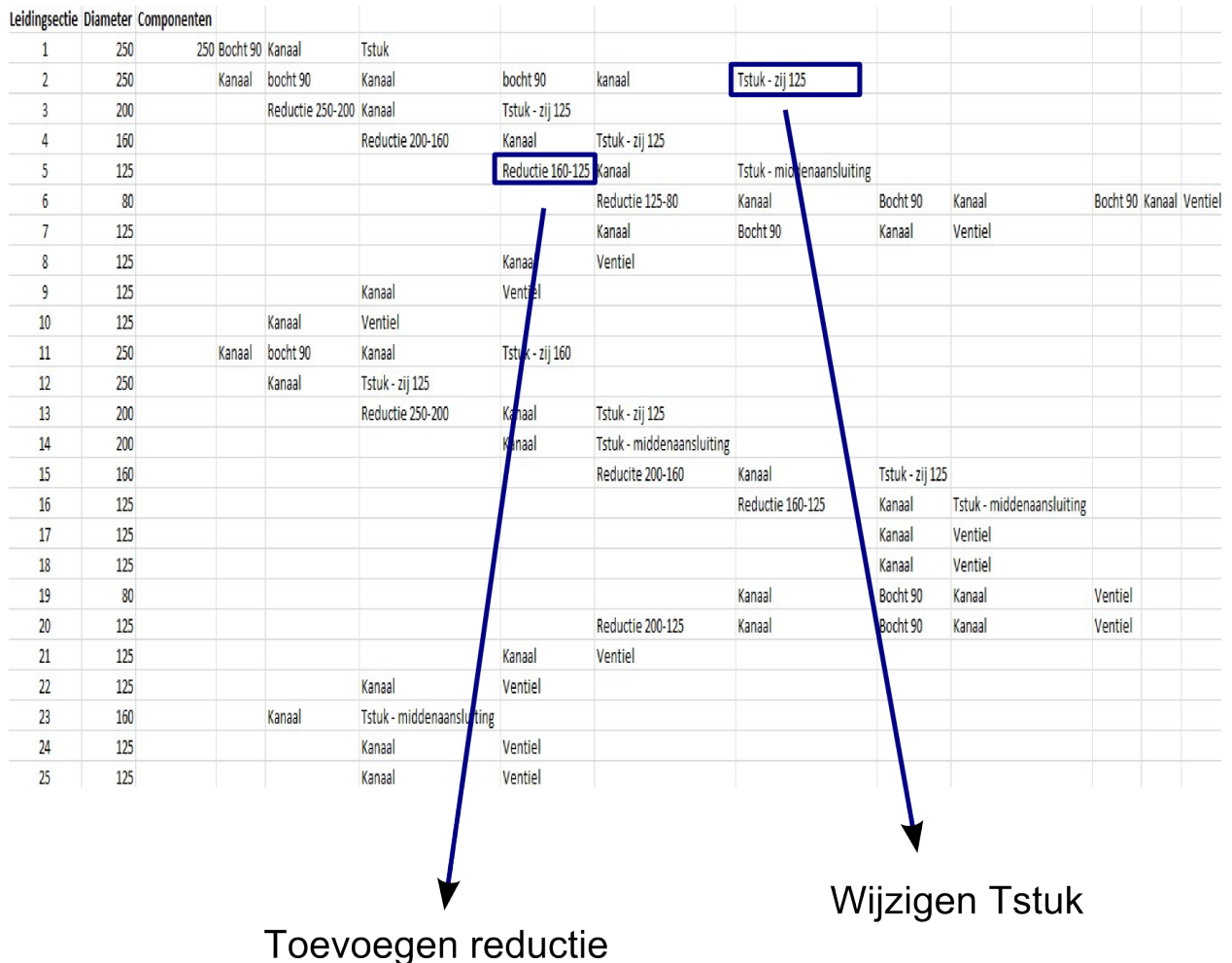
Toevoegen componenten

Door het wijzigen van de diameters van elke sectie bestaat de kans dat niet elke tak meer koppelbaar is. Zo kan na dimensionering, zoals terug te zien in figuur 26, tak twee niet meer gekoppeld worden met tak drie omdat deze een andere diameter heeft. Om deze problemen op te lossen wijzigt deze testcase de topologie van het netwerk.

Deze wijziging kan op twee manieren gebeuren. De eerste wijzigt het T-stuk op het einde van de tak, de tweede voegt een reductie toe. De keuze is afhankelijk van twee vragen. De eerste vraag is of de laatste component een T-stuk is. De tweede vraag is of de onderliggende tak aan de zijaansluiting hangt.

Als beide vragen positief beantwoord kunnen worden kan de zijaansluiting van het T-stuk gewijzigd worden waardoor de tak gekoppeld kan worden. Zo is het mogelijk om een T-stuk te plaatsen met een hoofddiameter van 250 mm en een zijdiameter van 160 mm.

Als één van beide vragen niet positief beantwoord kan worden gebruikt deze testcase de tweede manier om de takken te koppelen. In dit geval voegt de testcase een reductie toe tussen het T-stuk en het begin van de onderliggende tak. Figuur 27 geeft een overzicht van deze aanpassingen.



Figuur 27: Aangepast netwerk

6.3 Formules drukverlies

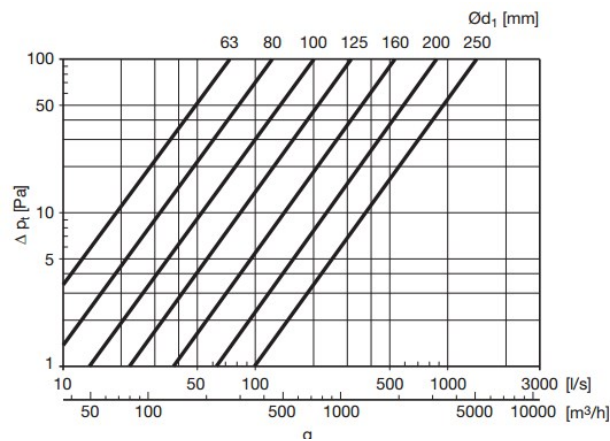
De vorige sectie bepaalde op basis van de topologie en de debieten van het netwerk de optimale diameters van elke kanaalsectie. De volgende sectie dimensioneert het netwerk op basis van de drukonbalans. Voor deze dimensionering moet de drukval per component bepaald worden.

Hoe deze drukval berekend wordt is afhankelijk van het type component. Deze sectie geeft per component weer hoe deze berekening gebeurt, en sluit af met een overzicht van alle formules die gebruikt worden bij de berekeningen.

Bepalen van het drukverlies

De drukval over een component geeft weer hoeveel weerstand een component biedt tegen de luchtstroming die er door vloeit. Algemeen kan men stellen dat bij een grotere luchtstroming (een groter debiet) de drukval over de component groter wordt.

Deze thesis maakt, om de drukval te bepalen gebruik van de grafieken van Lindab. Figuur 28 geeft hiervan een voorbeeld voor de drukval in een bocht.



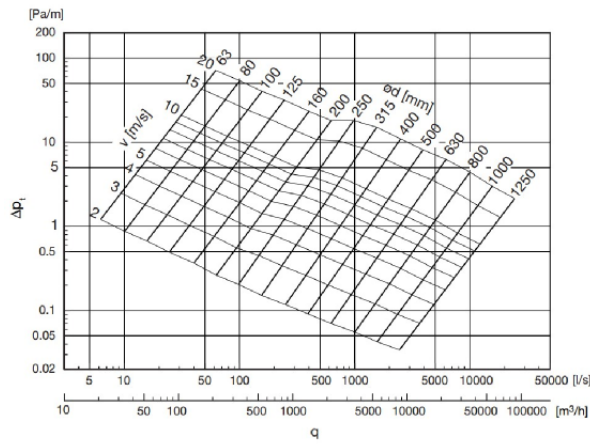
Figuur 28: Grafiek bocht 90 graden

Op deze grafieken kunnen we de waarde aflezen, zo heeft een bocht met een diameter van 80 mm een drukval van 7.8 Pa bij een debiet van $100 \frac{m^3}{h}$.

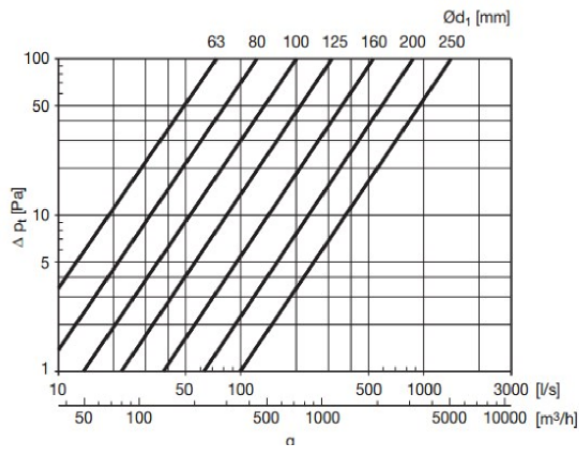
De drukval over een component is afhankelijk van het type component. Zo is de drukval bij een ventiel niet enkel afhankelijk van het debiet maar ook van hoe ver het ventiel open staat. Algemeen bestaan er drie soorten componenten. Ten eerste zijn er de kanalen, bochten en reducties. Hierbij is de drukval enkel afhankelijk van het debiet. Hiernaast zijn er de ventielen en de regelkleppen. Hierbij is de drukval zowel afhankelijk van het debiet als van de doorstroomopening. En tot slot zijn er de T-stukken. Bij deze is de drukval niet enkel afhankelijk van het debiet in de hoofdtak maar ook van het debiet in de zijtak. De rest van deze subsectie bespreekt per type hoe de drukval bepaald wordt.

Kanalen, bochten en reducties

Het bepalen van het drukverlies bij kanalen, bochten en reducties is het eenvoudigste. Bij deze component kan het drukverlies eenvoudig afgelezen worden op basis van de diameter en het debiet. Enkel bij de reductie moet rekening gehouden worden met de stromingsrichting van de stroom. Figuur 29 geeft voor elke component een voorbeeldgrafiek.

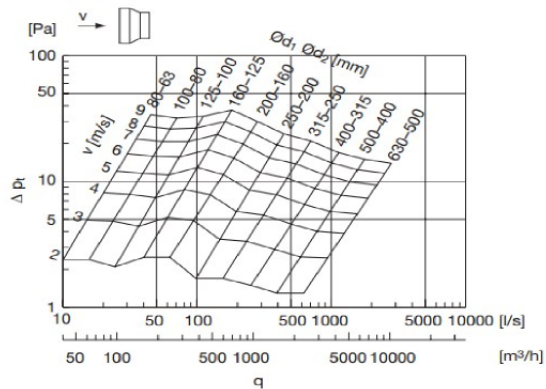


Kanaal



Bocht

1 dimension step



Reductie

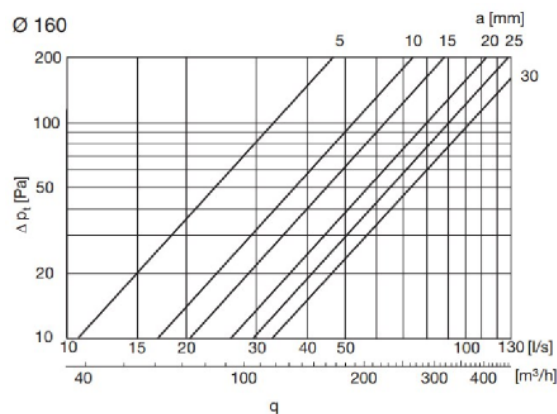
Figuur 29: Grafiek kanaal, bocht en reductie

Ventielen en regelkleppen

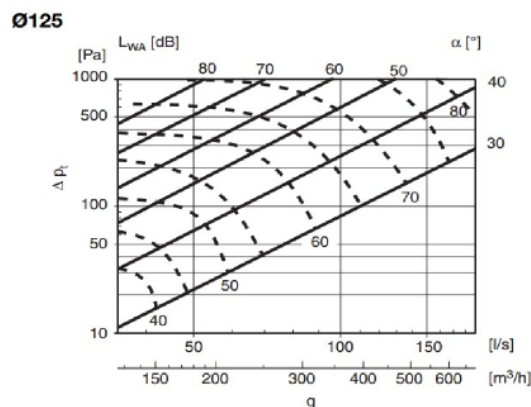
Het bepalen van het drukverlies bij ventielen en regelkleppen is complexer. Hierbij is de drukval niet enkel afhankelijk van het debiet maar ook van de doorstroomopening waar dit debiet door kan vloeien. Ook het feit dat de opening geen natuurlijk maar een reëel getal is draagt bij tot de complexiteit.

Het bepalen van de drukval zelf, bij de gegeven opening, gebeurt met behulp van interpolatie. Dit gebeurt in drie stappen. De eerste stap bepaalt het drukverlies bij een opening groter dan de gegeven opening. De tweede stap bepaalt het drukverlies bij een opening kleiner dan de gegeven opening. En de derde stap interpoleert de gewenste druk op basis van de drukvallen bepaald in de vorige stappen.

Zo is de drukval bij een ventiel, met een diameter van 160 mm en een opening van 22 mm, ongeveer 42 Pa bij een debiet van $200 \frac{m^3}{h}$. Figuur 30 geeft een voorbeeld voor zowel het ventiel als de regelklep.



Ventiel



Regelklep

Figuur 30: Grafiek drukval bij ventiel en regelklep

T-stuk

Het laatste type component is het T-stuk. De drukval over deze component is zowel afhankelijk van het debiet in de hoofdtak, als van het debiet in de zijtak en de stromingsrichting. Daarenboven is de drukval

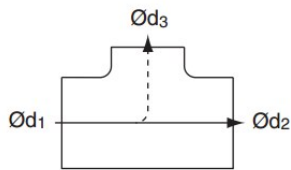
vanaf het beginpunt van het T-stuk naar het eindpunt van de hoofdtak anders dan deze van het beginpunt van het T-stuk naar het eindpunt van de zijtak.

De grafieken voor het bepalen van deze drukval zijn ook anders dan die bij de voorgaande componenten. Bij deze grafieken wordt de drukval afgelezen op basis van de snelheid.

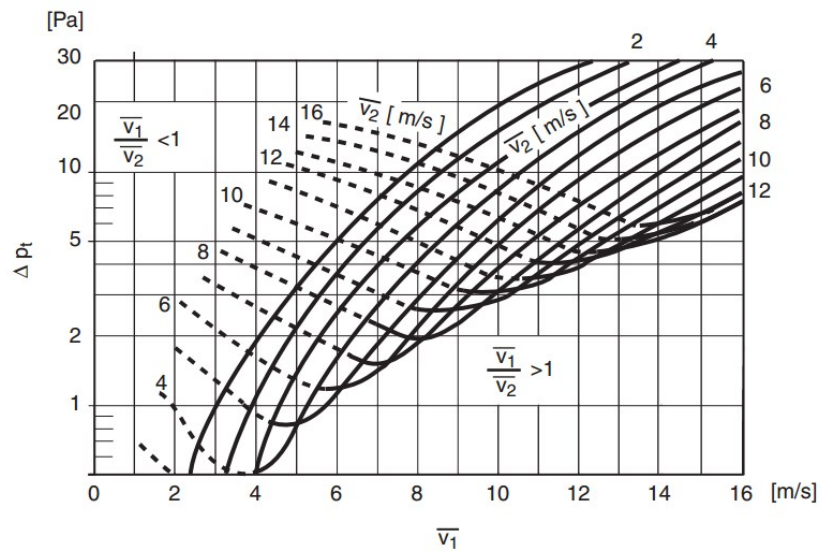
Zo is de drukval voor een T-stuk met een *divergerende flow*, een luchtsnelheid in de hoofdtak van $4 \frac{m}{s}$ en een luchtsnelheid bij instroming van $9.4 \frac{m}{s}$ 5 Pa.

Figuur 31 geeft een voorbeeld van zo een grafiek.

Diverging flow



The diagram is also applicable to reduction in Ød_2 .



Figuur 31: Grafiek drukverlies over de hoofdtak van een T-stuk.

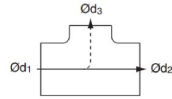
Net zoals de openingen bij de ventielen en regelkleppen zijn de snelheden in het T-stuk geen natuurlijke getallen. Het bepalen van de drukval gebeurt dan ook via interpolatie.

Schetsen bepalen functies

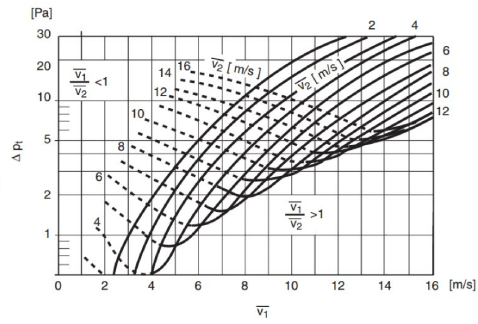
Voorgaande subsectie gaf een overzicht van de mogelijke componenten en hoe hierbij de drukval bepaald kan worden. Bij het bepalen van de drukval in het netwerk is het echter veel werk om elke drukval te gaan aflezen op een grafiek. Daarom bepaalt deze thesis op basis van de grafieken een functievoorschrift voor de drukval. Dit maakt het veel eenvoudiger om de dimensionering op basis van drukonbalans uit sectie 6.4 uit te voeren.

Het bepalen van dit functievoorschrift gebeurt in twee stappen, weergegeven in figuur 32.

Diverging flow



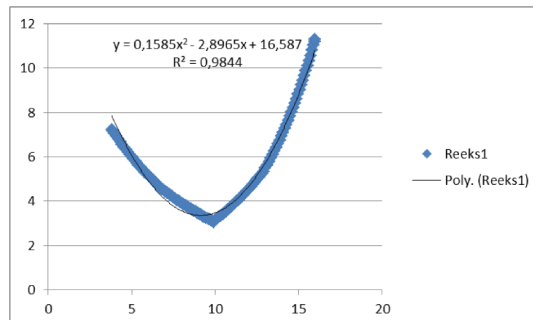
The diagram is also applicable to reduction in $\text{Ø}d_2$.



Grafiek Lindab

Debiet: 5.2137	Druk: 5.8012
Debiet: 5.3159	Druk: 5.7112
Debiet: 5.416	Druk: 5.6244
Debiet: 5.5143	Druk: 5.5404
Debiet: 5.6107	Druk: 5.4593
Debiet: 5.7053	Druk: 5.3808
Debiet: 5.7982	Druk: 5.3048
Debiet: 5.8895	Druk: 5.2312
Debiet: 5.9792	Druk: 5.1599
Debiet: 6.0674	Druk: 5.0908
Debiet: 6.154	Druk: 5.0237
Debiet: 6.2393	Druk: 4.9586
Debiet: 6.3231	Druk: 4.8953
Debiet: 6.4057	Druk: 4.8339
Debiet: 6.4869	Druk: 4.7742
Debiet: 6.5668	Druk: 4.7162
Debiet: 6.6455	Druk: 4.6596
Debiet: 6.7232	Druk: 4.6052
Debiet: 6.8133	Druk: 4.5389
Debiet: 6.92	Druk: 4.4838
Debiet: 7.0385	Druk: 4.4157
Debiet: 7.1557	Druk: 4.3514
Debiet: 7.2711	Druk: 4.2885
Debiet: 7.3849	Druk: 4.2274
Debiet: 7.4972	Druk: 4.168
Debiet: 7.608	Druk: 4.1102
Debiet: 7.7173	Druk: 4.054
Debiet: 7.8252	Druk: 3.9992

Ruwe data



Functievoorschrift

Figuur 32: Overzicht bepalen functies

De eerste stap bepaalt voor een hele reeks waardes de drukval bij een specifiek debiet. Zo bepaalt het voorbeeld uit figuur 32 de drukval om de $0.1 \frac{m}{s}$.

De tweede stap bepaalt op basis van deze punten een functievoorschrift voor deze grafiek. Dit gebeurt met de kleinste kwadraat methode. Hoe meer termen dit functievoorschrift heeft hoe dichter het functievoorschrift bij de opgemeten waardes ligt. Deze thesis bepaalt het aantal termen op basis van de r-kwadraat waarde. Bij deze testcase is een r-kwadraat waarde hoger dan 99,995 % aangenomen.

Alle functievoorschriften gebruikt in deze thesis zijn terug te vinden in bijlage.

6.4 Dimensioneren netwerk op basis van drukonbalans

Deze subsectie dimensioneert het ventilatienetwerk op basis van de drukonbalans. Dit gebeurt op basis van de methode uitgelegd in subsectie 3.4. Deze methode word uitgevoerd in drie stappen, de eerste stap bepaalt het huidige drukverlies en geeft dit visueel weer in Excel. De tweede stap dimensioneert de ventielen om zo het drukverlies in de takken met een te laag drukverlies te verhogen. En tot slot voegt de derde stap regelkleppen toe aan de takken die, na het uitvoeren van voorgaande stappen, niet in evenwicht zijn. Dit komt overeen met het stappenplan in figuur 10 op pagina 31 met als uitzondering dat de druk niet wordt verlaagt. Deze stap is bij dit netwerk niet van toepassing omdat de ventielen in dit netwerk volledig opengezet zijn en er dus geen extra drukverlaging meer kan gerealiseerd worden.

Bepalen verloop drukverlies

De eerste stap in het dimensioneren van het netwerk is het bepalen van het drukverlies. Dit gebeurt door gebruik te maken van de formules beschreven in subsectie 6.3 en terug te vinden in bijlage.

Elke tak houd de drukvallen per component bij van de componenten die in deze tak zitten, met uitzondering van de T-stuken. Bij het T-stuk word de drukval over de hoofdtak bijgehouden in de hoofdtak en de drukval in de zijtak bijgehouden in de zijtak. Zo voldoet de tak aan zijn definitie in subsectie 3.4 op pagina 29. Deze definitie stelt dat de nieuwe tak begint op het punt waar het drukverlies via de ene weg wijzigt ten opzichte van het drukverlies via de andere splitsing. En aangezien het T-stuk zorgt voor een verschillende drukval voor elke tak moet deze drukval in de onderliggende takken bijgehouden worden.

Figuur 33 geeft dit weer.

Tak	Drukval per component												
1	0,18	5,35	1,1										
2		2,15	0,22	1,3	0,92	1,3	0,25						
3			0,32	1,46	0,55								
4				0,39	0,32								
5					0,34	1,46	0,39						
6						2,44	0,03	0,04	0,61	0,02	0,61	0,01	4,97
7						2,7	2,12	0,37	14,09	0,48	43		
8					2,28	0,09	20,91						
9				3,26	0,09	20,91							
10			2,55	0,09	20,91								
11	13,49		0,55	1,95	0,91								
12			3,67	0,57									
13				0,33	1,37	0,57							
14					0,37	0,07							
15						2,59	1,75	0,24					
16							2,7	2,12	1,15				
17								2,57	0,34	13,11			
18								2,57	0,04	13,11			
19							2,42	0,55	0,03	1,89	0,01	14,82	
20						2,42	0,8	0,06	14,53	0,33	14,51		
21					3,1	0,06	14,51						
22				2,34	0,06	14,51							
23			0,42	0,89	0,52								
24				2,45	0,83	0,11	14,51						
25				2,45	0,83	0,28	14,51						

Figuur 33: Drukval per component

Binnen deze figuur zijn de drukvallen van de T-stukken aangeduid in het groen. Zo zorgt het T-stuk in tak één voor een drukval in tak twee en tak elf.

De topologie van deze figuur komt overeen met de topologie zoals weergegeven in figuur 27, en de groene cellen zijn de drukvallen in de takken geïnduceerd door het T-stuk.

Na het bepalen van de drukval per component gaat deze berekening verder met het bepalen van het drukverloop in het netwerk. Figuur 34 geeft dit drukverloop weer.

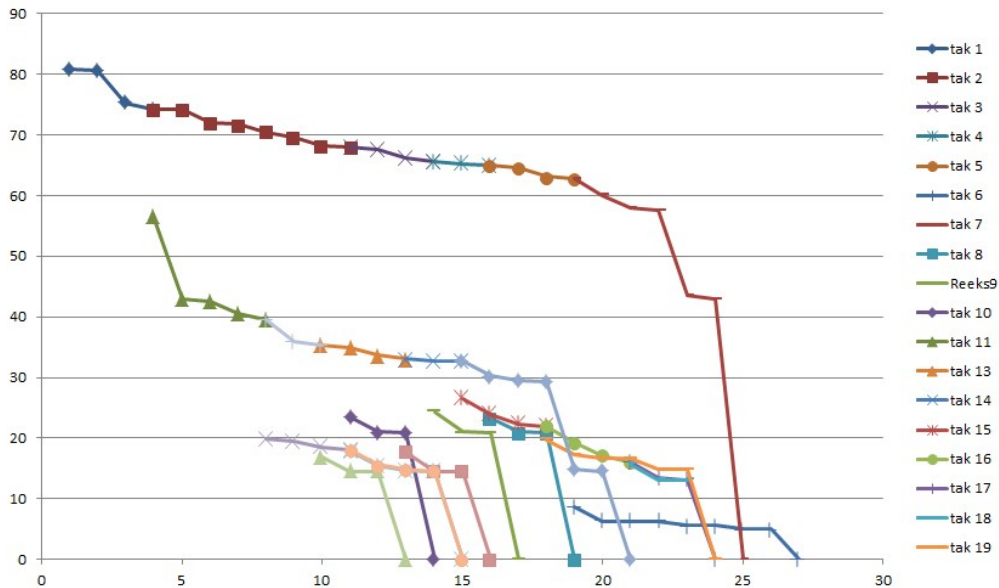
Tak	Drukverloop												
1	80,76	80,58	75,23	74,13									
2		74,13	71,98	71,76	70,46	69,54	68,24	67,99					
3			67,99	67,67	66,21	65,66							
4				65,66	65,27	64,95							
5					64,95	64,61	63,15	62,76					
6						8,73	6,29	6,26	6,22	5,61	5,59	4,98	4,97
7						62,76	60,06	57,94	57,57	43,48	43		
8					23,28	21	20,91						
9				24,26	21	20,91							
10			23,55	21	20,91								
11	56,5	43,01	42,46	40,51	39,6								
12		39,6	35,93	35,36	33,09								
13			35,36	35,03	33,66	33,09							
14				33,09	32,72	32,65							
15					26,57	23,98	22,23	21,99					
16						21,99	19,29	17,17	16,02				
17							16,02	13,45	13,11				
18							15,72	13,15	13,11				
19							19,72	17,3	16,75	16,72	14,83	14,82	
20					32,65	30,23	29,43	29,37	14,84	14,51			
21					17,67	14,57	14,51						
22				16,91	14,57	14,51							
23		19,9	19,48	18,59	18,07								
24			17,9	15,45	14,62	14,51							
25				18,07	15,62	14,79	14,51						

Figuur 34: Drukverloop in het netwerk

In deze figuur staan de groene cellen voor de drukval in de takken geïnduceerd door de bovenliggende T-stukken en de blauwe cellen voor de hoogste drukval van de onderliggende tak.

Als het netwerk in evenwicht zou zijn dan zouden de drukverliezen in de groene cellen gelijk zijn. Met evenwicht wordt hier bedoeld dat de drukvallen in elk knooppunt gelijk zijn (als dit niet het geval is verdeelt de lucht zich anders dan gewenst). Dit is echter niet het geval waardoor deze hele dimensionering

nodig is. Het is ook mogelijk om dit grafisch weer te geven, zoals te zien is in figuur 35.



Figuur 35: Grafiek drukverloop

In deze figuur zien we het drukverliesverloop per tak terug. Bij een ventiel start dit drukverlies met nul pascal. Bij een T-stuk wordt het hoogste drukverlies uit de onderliggende tak overgenomen en wordt hiermee het drukverlies in deze tak verder bepaald. Het doel van de volgende subsectie is om deze drukverliezen in de T-stukken gelijk te maken, waardoor de lijnen van de drukvallen voor elke tak bij de T-stukken samenvallen.

Dimensioneren ventielen

Voorgaande subsectie bepaalde het verloop van het drukverlies bij de huidige instellingen. Na deze bepaling blijkt dat de luchtverdeling niet zal plaatsvinden zoals gewenst. Daarom moet de drukval per component gewijzigd worden. Bij het netwerk zoals het nu bestaat is er maar één manier om dit te doen, door het dichtdraaien van de ventielen. Dit zorgt, zoals te zien is in figuur 30, voor een verhoging van de drukval van dit ventiel. De wijziging in de drukval die het ventiel moet leveren bepaalt deze thesis met formule 28.

$$\Delta p_{ventiel} = \sum \Delta p_{knooppunt} \quad (28)$$

Hierin staat $\Delta p_{ventiel}$ voor de extra drukval die het ventiel moet genereren en $\sum \Delta p_{knooppunt}$ voor de som van de te overwinnen drukverschillen in elk knooppunt. Dit drukverschil is het drukverschil, in een knooppunt, tussen de drukval aan het einde van de bovenliggende tak en het begin van de onderliggende tak. De som van deze drukverschillen, voor elk knooppunt tussen het ventiel en het begin van het netwerk, is de extra drukval die het ventiel moet overwinnen, de $\Delta p_{ventiel}$ uit de formule.

Zo moet bijvoorbeeld het ventiel in tak 17, zoals te zien in figuur 34 het drukverschil in twee knooppunten overwinnen. Ten eerste het drukverschil tussen de druk op het einde van tak 14 (32,65 Pa) en de druk aan het begin van tak 15 (26,57 Pa). Ten tweede het drukverschil tussen de druk op het einde van tak 1 (74,13 Pa) en de druk aan het begin van tak 11 (56,5 Pa). De extra drukval die dit ventiel moet genereren wordt, op basis van formule 28:

$$\Delta p_{ventiel} = (32,65 - 26,57) + (74,13 - 56,5) = 23.62 Pa \quad (29)$$

Hierbij moet de oorspronkelijke drukval over het ventiel opgeteld worden om de nieuwe drukval over dit ventiel te bepalen. Zoals te zien in figuur 34 was de originele drukval 13,11. De nieuw in te stellen drukval over het ventiel wordt nu:

$$23.62 + 13,11 = 36.82 \tag{30}$$

Op basis van deze druk kan, door gebruik te maken van de formules voor het drukverlies en interpolatie, de gewenste opening bepaald worden. Zo moet het ventiel dat een drukval moet overwinnen van 36,81 Pa een opening krijgen van 8,78 mm.

Deze berekening moet voor elk knooppunt uitgevoerd worden, na het wijzigen van deze drukken in het overzicht van de drukvallen per component geeft dit het, in de volgende figuur weergegeven, drukverloop:

	Debiet	Drukverloop																				
1	946	80,76	80,58	75,23	74,13																	
2	418		74,13	71,98	71,76	70,46	69,54	68,24	67,99													
3	330			67,99	67,67	66,21	65,66															
4	242				65,66	65,27	64,95															
5	154					64,95	64,61	63,15	62,76													
6	22						33,21	30,77	30,74	30,7	30,09	30,07	29,46	29,45								
7	132						62,76	60,06	57,94	57,57	43,48	43										
8	88					64,95	62,67	62,58														
9	88				65,66	62,4	62,31															
10	88			67,99	65,44	65,35																
11	528		74,13	60,64	60,09	58,14	57,23															
12	387,2			57,23	53,56	52,99																
13	316,8				52,99	52,66	51,29	50,72														
14	246,4					50,72	50,35	50,28														
15	176						50,28	47,69	45,94	45,7												
16	132							45,7	43	40,88	39,73											
17	66									39,73	37,16	36,82										
18	66									39,73	37,16	37,12										
19	44								45,7	43,28	42,73	42,7	40,81	40,8								
20	70,4						50,28	47,86	47,06	47	32,47	32,14										
21	70,4					50,72	47,62	47,56														
22	70,4				52,99	50,65	50,59															
23	140,8			57,23	56,81	55,92	55,4															
24	70,4				55,4	52,95	52,12	52,01														
25	70,4				55,4	52,95	52,12	51,84														

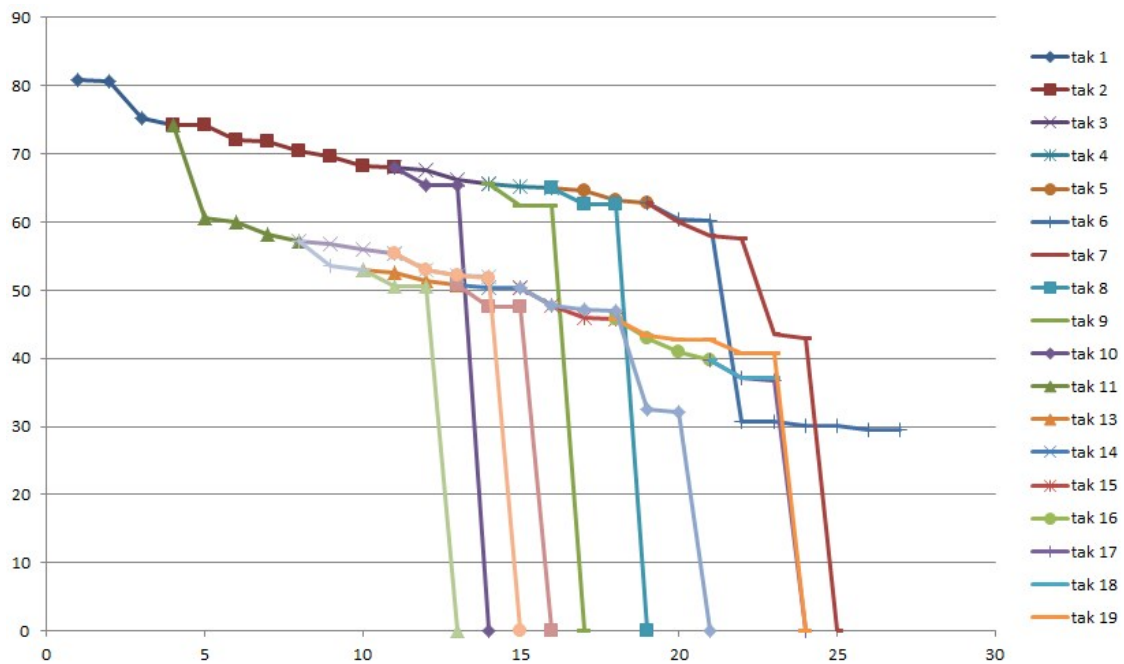
Figuur 36: Drukverloop na dimensionering ventiel

In sommige gevallen kan het ventiel niet zo ver dichtgedraaid worden. Dit is duidelijk te zien in figuur 36 waar na het wijzigen van de drukvallen over de ventielen de druk aan het einde van tak 5 niet gelijk is aan de druk aan het begin van tak 6. In deze gevallen moet deze thesis componenten toevoegen. De volgende subsectie behandelt deze problemen.

Componenten toevoegen

In sommige gevallen is het netwerk, na het dimensioneren met ventielen zoals gezien in vorige subsectie, nog niet in balans. Om te zorgen dat de drukvallen in de knooppunten toch gelijk zijn moeten er componenten toegevoegd worden. Deze thesis voegt regelkleppen toe om dit drukverlies te kunnen leveren. De opening van deze regelkleppen kan op dezelfde manier bepaald worden als de opening van het ventiel.

Bij de testcase, uitgevoerd in deze sectie, moet er enkel een regelklep toegevoegd worden aan tak 6. Na het toevoegen en instellen van deze regelklep is het voorbeeldnetwerk in evenwicht, zoals grafisch weergegeven in figuur 37.



Figuur 37: Grafiek drukverloop na dimensionering

6.5 Vergelijking resultaten met resultaten software

De voorgaande subsecties gaven een overzicht van de handmatige dimensionering voor een ventilatienetwerk. Deze subsectie vergelijkt deze handmatige dimensionering met een automatische dimensionering, uitgevoerd door de software ontwikkeld voor deze thesis. Dit door de berekende drukval in beide netwerken te vergelijken. Het vergelijken van de drukken gebeurt aan de hand van formule 31.

$$f_{\%} = \frac{|\Delta p_s - \Delta p_h|}{\Delta p_h} \quad (31)$$

In deze vergelijking staat $f_{\%}$ voor de procentuele fout tussen de druk berekend volgens de software (Δp_s) en de druk volgens de hardware (Δp_h). Deze vergelijking kiest voor de druk bepaald volgens de hardware als referentie.

Door deze vergelijking uit te rekenen voor elke component is het mogelijk om een goed beeld te krijgen van de fout in de berekeningen. Figuur 38 geeft dit weer.

Vergelijken fouten											
0,64	0										
0	0	1,15	0	1,15	0						
	0	0	0								
		0	0								
			0	0	0						
				0	0	0,000677	0	0	0	0	0,00034
					0	0	0	0	0	0	
					0	0,00032					
					0	0,005136					
					0	0,000306					
	0	0	0,97	0							
		0	0								
			0	0	0						
				0	0	0					
					0	0	0				
						0	0	0			
							0	0,030147			
								0,029903			
									0	0,027206	
										0,034536	
											0,023339
											0,021743
											0,021342
											0,021412

Figuur 38: Procentuele fout tussen drukval volgens software en volgens handmatige berekening

Deze figuur heeft een specifieke kleurcodering. Elke fout tussen de 1% en de 5% is aangeduid in het oranje, en elke fout boven de 5% is aangeduid in het rood.

Bij het bestuderen van figuur 38 vallen twee fouttypes op. Het eerste type fout treedt op bij bochten met een diameter van 250 mm en zorgen voor een procentuele fout veel groter dan 5%. Dit zijn alle rood ingekleurde vakken. De oorzaak van deze fout ligt in het feit dat de software een verkeerde formule gebruikt voor de berekening van deze druk. Bij de laatste versie van de software is deze fout weggewerkt maar om de lezer een idee te kunnen geven van wat er kan mislopen is deze in de versie van de testcase blijven staan. Het tweede type fout treedt op bij de ventielen. Hier zien we een verschil van maximaal 3,5% tussen de automatische berekening en de handmatige berekening. Dit valt te verklaren door het doorrekenen van afrondingen bij de handmatige berekeningen. Bij de handmatige berekeningen werd namelijk gewerkt met Excel die een ander systeem van afronding gebruikt dan Java.

De gemiddelde fout, berekend op basis van de procentuele fouten weergegeven in figuur 38, bedraagt 4,49%. Deze fout houdt echter rekening met de grote fouten van de bochten. Als deze fout opgelost wordt, wordt de gemiddelde fout per component 0,25%. Dit is een resultaat dat zeker voldoet aan de verwachtingen.

6.6 Besluit

Deze sectie dimensioneerde een voorbeeldnetwerk handmatig, dit door eerst de kanaalsecties te dimensioneren op basis van de luchtsnelheid en vervolgens het netwerk te dimensioneren op basis van de drukonbalans. Hierbij maakte deze sectie gebruik van de grafieken voor een aantal standaard componenten van Lindab.

Subsectie 6.5 vergeleek deze resultaten met de automatische dimensionering via de software. Uit deze vergelijking blijkt dat de resultaten zeer goed overeenkomen, wat laat zien dat de software in staat is een realistische dimensionering uit te voeren.

Naast deze zekerheid over de correctheid van de software kan in deze sectie ook een besluit getrokken worden naar snelheid. De handmatige berekening heeft elf uur in beslag genomen, hierbij rekening houdend met het feit dat de formules voor de grafieken gekend zijn. De automatische dimensionering van ditzelfde

netwerk nam dertig minuten in beslag. Naast de zekerheid dat deze dimensionering juist is kunnen we dus ook stellen dat deze manier van werken het automatiseringsproces versnelt.

7 Conclusie

Deze thesis ontwerpt een applicatie voor het dimensioneren van een ventilatiesysteem. Om deze applicatie te ontwerpen is deze thesis opgedeeld in vijf hoofdstukken. Het eerste hoofdstuk bepaalt het fysisch model van het ventilatiesysteem. Deze geeft een overzicht van wat er allemaal aanwezig is in zo een ventilatiesysteem en aan welke eigenschappen dit systeem zich moet houden. Het tweede hoofdstuk bepaalt, op basis van dit fysisch model, de problemen die ontstaan bij een niet gedimensioneerd netwerk en de methodes om deze op te lossen. Deze methodes geven een algemene oplossingsstrategie zonder in te gaan op de technieken om dit te realiseren in een software applicatie. Dit is waar het derde hoofdstuk verder op ingaat. Dit gebruikt de beschreven methodes en geeft hier een algemene oplossingsmethode voor. Verder beschrijft dit hoofdstuk hoe de dataopbouw van het netwerk binnen Javagebeurt. Vervolgens geeft een vierde hoofdstuk een voorbeeld van een applicatie die in staat is om de volledige dimensionering uit te voeren. En tot slot vergelijkt het laatste hoofdstuk de resultaten van deze applicatie met een testcase.

De eerste conclusie die getrokken mag worden is dat de ontwikkelde applicatie de gewenste resultaten haalt. De applicatie is in staat om het volledige netwerk te dimensioneren, zowel op basis van luchtsnelheid als op basis van drukonbalans. Hierbij moet de gebruiker enkel

Deze opdeling biedt een aantal specifieke voordelen voor de lezer. Zo kan hij zelf kiezen welke delen hij wil gebruiken als hij een gelijkaardige applicatie wil ontwerpen. Hiernaast kan hij de voorgestelde applicatie eenvoudig aanpassen, hij moet er enkel rekening mee houden dat de uitbreiding past binnen het huidige model. En tot slot kan hij de applicatie eenvoudig integreren in een andere applicatie.

Naast de voordelen van de modulaire opbouw biedt het model nog een aantal voordelen ten opzichte van al bestaande applicaties. Eerst en vooral is het een eenvoudig model. Het omvat in tegenstelling tot veel andere systemen geen eindige elementenanalyses of iteratieve processen. Hiernaast is het model ook volledig platform- en applicatieonafhankelijk. Er is geen externe software zoals Autocad voor nodig en het kan ontworpen worden binnen elke programmeertaal. Tot slot is het ook nog eens volledig gratis. Dit in tegenstelling tot zo goed als alle alternatieve applicaties.

Om af te sluiten schetst dit besluit het toekomstig gebruik van dit model. Dit model maakt het eenvoudig om een applicatie te ontwerpen die de dimensionering uitvoert. Deze applicatie kan alleenstaand zijn of geïntegreerd worden binnen bijvoorbeeld Autocad of Visio. Ook kan de modulaire structuur overgenomen worden als leidraad bij het ontwikkelen van andere modellen. Tot slot bestaat natuurlijk de mogelijkheid dat de, door deze thesis ontwikkelde, voorbeeldapplicatie verder uitgebreid wordt.

Referenties

- [1] K. Develin, *The Joy of Sets*, Springer, 1993
- [2] Y. Nakayama en R.F. Boucher, *Introduction to fluid mechanics*, London: Arnold, 1999
- [3] Belgisch Instituut voor Normalisatie, NBN D 50-001, *Ventilatievoorzieningen in woongebouwen*, Brussel, BIN, 1991
- [4] Belgisch Instituut voor Normalisatie, NBN EN 13779 *Ventilatie voor niet-residentiële gebouwen - Prestatie-eisen voor ventilatie- en luchtbehandelingssystemen*, Brussel, BIN, 1991
- [5] Paul Van den Bossche, Sabrina Prieus en Pieter Coortjans, *Ventilatiegids: stappenplan voor comfortabel en energiezuinig ventileren* WTCB, IWT, De Nayer Instituut
- [6] Merlie C. Potter en David C. Wiggert, *Mechanics of Fluids*, Prentice-Hall International Editions 1991
- [7] *Ashrea handbook fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating & Air-Conditioning Engineers, 2013
- [8] *MagiCAD the professional's choice for Building Services*, <http://www.magicad.com/en>
- [9] *Optivent*, www.optivent.be
- [10] *Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf*, www.wtcb.be
- [11] *air duct systems, we simplify construction*, catalogus Lindab

Bijlage: Formules voor drukverliesberekening

Tabel 7: Functievoorschriften bocht 90°

Diameter	Functievoorschrift
80	$5 * 10^{-15}x^6 - 8 * 10^{-12}x^5 + 5 * 10^{-09}x^4 - 2 * 10^{-06}x^3 + 0,0008x^2 + 0,0112x$
125	$2 * 10^{-11}x^6 + 1 * 10^{-08}x^5 - 2 * 10^{-06}x^4 + 0,0002x^3 - 0,0116x^2 + 0,5186x$
160	$7 * 10^{-18}x^6 - 3 * 10^{-14}x^5 + 4 * 10^{-11}x^4 - 4 * 10^{-08}x^3 + 5 * 10^{-05}x^2 + 0,0016x$
200	$2 * 10^{-18}x^6 - 9 * 10^{-15}x^5 + 2 * 10^{-11}x^4 - 2 * 10^{-08}x^3 + 2 * 10^{-05}x^2 + 0,0007x$
250	$5 * 10^{-19}x^6 - 2 * 10^{-15}x^5 + 4 * 10^{-12}x^4 - 5 * 10^{-09}x^3 + 8 * 10^{-06}x^2 + 0,0004x$

Tabel 8: Functievoorschriften kanaal

Diameter	Functievoorschrift
80	$7 * 10^{-15}x^6 - 9 * 10^{-12}x^5 + 5 * 10^{-09}x^4 - 2 * 10^{-06}x^3 + 0,0007x^2 + 0,0053x$
125	$2 * 10^{-17}x^6 - 6 * 10^{-14}x^5 + 8 * 10^{-11}x^4 - 6 * 10^{-08}x^3 + 6 * 10^{-05}x^2 + 0,0011x$
160	$7 * 10^{-19}x^6 - 3 * 10^{-15}x^5 + 7 * 10^{-12}x^4 - 9 * 10^{-09}x^3 + 2 * 10^{-05}x^2 + 0,0005x$
200	$3 * 10^{-20}x^6 - 2 * 10^{-16}x^5 + 8 * 10^{-13}x^4 - 2 * 10^{-09}x^3 + 5 * 10^{-06}x^2 + 0,0002x$
250	$2 * 10^{-21}x^6 - 2 * 10^{-17}x^5 + 1 * 10^{-13}x^4 - 2 * 10^{-10}x^3 + 2 * 10^{-06}x^2 + 2 * 10^{-05}x$

Tabel 9: Functievoorschrift reductie

Type	Functievoorschrift
A125-80	$0,0008x^2 + 0,003x$
A160-80	$0,0013x^2 - 0,021x$
A160-125	$4 * 10^{-05}x^2 + 0,0018x$
A200-125	$8 * 10^{-05}x^2 + 0,0006x$
A200-160	$1 * 10^{-05}x^2 + 0,0028x$
A250-125	$0,0002x^2 - 0,0072x$
A250-160	$3 * 10^{-05}x^2 + 8 * 10^{-05}x$
A250-200	$5 * 10^{-06}x^2 + 0,0017x$
T125-80	$0,0008x^2 + 0,003x$
T160-80	$0,0005x^2 - 0,0096x$
T160-125	$7 * 10^{-05}x^2 + 0,0068x$
T200-125	$8 * 10^{-05}x^2 + 0,0057x$
T200-160	$2 * 10^{-05}x^2 + 0,0064x$
T250-125	$0,0001x^2 - 0,0179x$
T250-160	$3 * 10^{-05}x^2 + 0,0021x$
T250-200	$7 * 10^{-06}x^2 + 0,0021x$

Tabel 10: Functievoorschrift Regelklep

Type	Functievoorschrift
80 O30	$0,0034x^2 + 0,027x$
80 O40	$0,0135x^2 - 0,0939x$
80 O50	$0,0267x^2 - 0,0358x$
80 O60	$0,0563x^2 - 0,2776x$
80 O70	$0,0997x^2 - 0,2658x$
80 O80	$0,1559x^2 - 0,016x$
125 O30	$0,0006x^2 + 0,018x$
125 O40	$0,0018x^2 + 0,0338x$
125 O50	$0,0046x^2 + 0,0095x$
125 O60	$0,008x^2 + 0,1165x$
125 O70	$0,0147x^2 + 0,239x$
125 O80	$0,0271x^2 + 0,1086x$
160 O30	$0,0002x^2 + 0,0094x$
160 O40	$0,0007x^2 + 0,0134x$
160 O50	$0,0014x^2 + 0,0484x$
160 O60	$0,0029x^2 + 0,0948x$
160 O70	$0,0053x^2 + 0,201x$
160 O80	$0,0087x^2 + 0,1613x$
200 O30	$6 * 10^{-05}x^2 + 0,035x$
200 O40	$0,0002x^2 + 0,0995x$
200 O50	$0,0004x^2 + 0,1734x$
200 O60	$0,0009x^2 + 0,2786x$
200 O70	$0,0018x^2 + 0,4667x$
200 O80	$0,0036x^2 + 0,6163x$
250 O30	$4 * 10^{-05}x^2 + 0,0044x$
250 O40	$1 * 10^{-04}x^2 + 0,0158x$
250 O50	$0,0003x^2 + 0,0086x$
250 O60	$0,0005x^2 + 0,0311x$
250 O70	$0,0009x^2 + 0,028x$
250 O80	$0,0016x^2 + 0,0427x$

Tabel 11: Functievoorschrift T-stuk toevoer

Type	Functievoorschrift
Divergerend hoofd	
$v_h = 1$	$0, 272x^2 - 0, 994x + 1, 3386$
$v_h = 2$	$0, 2465x^2 - 1, 165x + 1, 7002$
$v_h = 3$	$0, 2224x^2 - 1, 3661x + 2, 4473$
$v_h = 4$	$0, 2301x^2 - 1, 8621x + 4, 1355$
$v_h = 5$	$0, 2105x^2 - 2, 0089x + 5, 4452$
$v_h = 6$	$0, 1979x^2 - 2, 2048x + 7, 1446$
$v_h = 7$	$0, 1819x^2 - 2, 3459x + 9, 0812$
$v_h = 8$	$0, 1863x^2 - 2, 7712x + 12, 222$
$v_h = 9$	$0, 1696x^2 - 2, 7807x + 13, 917$
$v_h = 10$	$0, 1585x^2 - 2, 8965x + 16, 587$
$v_h = 11$	$0, 1672x^2 - 3, 4591x + 21, 664$
$v_h = 12$	$0, 1532x^2 - 3, 5258x + 24, 846$
$v_h = 13$	$0, 1332x^2 - 3, 3877x + 26, 718$
$v_h = 14$	$0, 1238x^2 - 3, 4325x + 29, 843$
$v_h = 16$	$0, 1109x^2 - 3, 4649x + 33, 417$
Divergerend midden	
$v_m = 2$	$0, 1844x^2 - 0, 2201x + 2, 4891$
$v_m = 3$	$0, 1065x^2 + 0, 2079x + 5, 662$
$v_m = 4$	$0, 0893x^2 + 0, 1582x + 10, 111$
$v_m = 5$	$0, 1233x^2 - 0, 1475x + 16, 048$
$v_m = 6$	$0, 1395x^2 - 0, 0907x + 23, 314$
$v_m = 7$	$0, 1802x^2 - 0, 9816x + 33, 994$
$v_m = 8$	$0, 2041x^2 - 1, 4807x + 44, 444$
$v_m = 9$	$0, 1436x^2 - 0, 6216x + 53, 414$
$v_m = 10$	$0, 1086x^2 - 0, 4177x + 78, 153$
$v_m = 11$	$0, 109x^2 - 0, 4749x + 91, 517$
$v_m = 12$	$0, 0904x^2 - 0, 2754x + 104, 59$
$v_m = 13$	$0, 0185x^2 + 0, 997x + 115, 63$
$v_m = 14$	$0, 0369x^2 + 0, 7888x + 135, 86$
$v_m = 16$	$0, 0807x^2 + 0, 12x + 154, 68$
Divergerend zij	
$v_z = 2$	$0, 117x^2 + 0, 6599x + 0, 3342$
$v_z = 3$	$0, 4537x^2 - 0, 179x + 1, 5253$
$v_z = 4$	$0, 3516x^2 + 0, 2025x + 2, 4081$
$v_z = 5$	$0, 312x^2 + 0, 4706x + 3, 486$
$v_z = 6$	$0, 1626x^2 + 1, 3342x + 4, 1814$
$v_z = 7$	$0, 2825x^2 + 0, 6772x + 6, 7912$
$v_z = 8$	$0, 2071x^2 + 1, 4222x + 7, 9489$
$v_z = 9$	$0, 2682x^2 + 1, 0585x + 10, 689$
$v_z = 10$	$0, 2399x^2 + 1, 4847x + 12, 37$
$v_z = 11$	$0, 2644x^2 + 1, 2599x + 15, 767$
$v_z = 12$	$0, 2505x^2 + 1, 4655x + 18, 314$
$v_z = 13$	$0, 2854x^2 + 1, 3669x + 22, 329$
$v_z = 14$	$0, 275x^2 + 1, 8081x + 24, 481$
$v_z = 15$	$0, 3132x^2 + 1, 4567x + 30, 657$

Tabel 12: Functievoorshrift T-stuk afvoer

Type	Functievoorschrift
Concaaf hoofd	
$v_h = 1$	$0,3229x^2 - 0,0894x - 1,0744$
$v_h = 2$	$0,3267x^2 - 0,6734x + 0,5308$
$v_h = 3$	$0,3477x^2 - 1,5229x + 2,6481$
$v_h = 4$	$0,3634x^2 - 2,2848x + 5,3056$
$v_h = 5$	$0,3698x^2 - 2,9119x + 8,4518$
$v_h = 6$	$0,3651x^2 - 3,3533x + 11,427$
$v_h = 7$	$0,3889x^2 - 4,3437x + 17,266$
$v_h = 8$	$0,4237x^2 - 5,4371x + 23,72$
$v_h = 9$	$0,4268x^2 - 6,0172x + 29,362$
$v_h = 10$	$0,4596x^2 - 7,2443x + 38,4$
$v_h = 11$	$0,4956x^2 - 8,4934x + 48,031$
$v_h = 12$	$0,4093x^2 - 7,3307x + 47,754$
$v_h = 13$	$-0,0319x^3 + 1,5149x^2 - 20,319x + 100,68$
$v_h = 14$	$-0,0482x^3 + 2,1657x^2 - 29,438x + 145,33$
$v_h = 15$	$-0,0516x^3 + 2,4177x^2 - 35,082x + 184,01$
$v_h = 16$	$-0,0712x^3 + 3,3097x^2 - 49,041x + 257,94$
Concaaf midden	
$v_m = 1$	$1,5688x - 1,2456$
$v_m = 2$	$0,1302x^2 + 1,3773x - 0,1453$
$v_m = 3$	$0,2422x^2 + 1,088x + 1,0485$
$v_m = 4$	$0,3083x^2 + 1,0416x + 2,3332$
$v_m = 5$	$0,3283x^2 + 0,9626x + 5,3388$
$v_m = 6$	$0,3485x^2 + 1,0636x + 7,6258$
$v_m = 7$	$0,3082x^2 + 2,0002x + 8,8384$
$v_m = 8$	$-0,0916x^3 + 2,4952x^2 - 12,461x + 37,154$
$v_m = 9$	$-0,1087x^3 + 2,9468x^2 - 15,713x + 48,285$
$v_m = 10$	$-0,1119x^3 + 3,0297x^2 - 16,376x + 55,36$
$v_m = 11$	$-0,1216x^3 + 3,3048x^2 - 18,796x + 67,277$
$v_m = 12$	$-0,1211x^3 + 3,35x^2 - 20,084x + 79,873$
$v_m = 13$	$-0,1097x^3 + 3,0777x^2 - 18,99x + 89,474$
$v_m = 14$	$-0,1392x^3 + 3,8509x^2 - 24,458x + 103,65$
$v_m = 15$	$-0,1689x^3 + 4,616x^2 - 30,45x + 124,45$
Concaaf zij	
$v_z = 1$	$0,4227x^2 + 1,1101x + 1,686$
$v_z = 2$	$0,3663x^2 + 2,1928x - 0,9008$
$v_z = 3$	$0,3405x^2 + 2,7777x - 4,0572$
$v_z = 4$	$0,3176x^2 + 3,2867x - 6,9035$
$v_z = 5$	$0,3005x^2 + 3,6826x - 11,205$
$v_z = 6$	$0,3651x^2 - 3,3533x + 11,427$
$v_z = 7$	$0,2356x^2 + 5,7421x - 25,742$
$v_z = 8$	$0,2034x^2 + 6,7647x - 33,968$
$v_z = 9$	$0,166x^2 + 7,9994x - 44,263$
$v_z = 10$	$0,1454x^2 + 8,9736x - 56,347$
$v_z = 11$	$0,1434x^2 + 9,4618x - 66,207$
$v_z = 12$	$0,1517x^2 + 9,983x - 76,768$
$v_z = 13$	$0,1077x^2 + 11,795x - 96,31$
$v_z = 14$	$0,1231x^2 + 12,252x - 109,07$
$v_z = 15$	$0,1158x^2 + 13,292x - 125,96$
$v_z = 16$	$0,1276x^2 + 14,226x - 146,58$

Tabel 13: Functievoorschrift ventiel

Type	Functievoorschrift
80o5	$0,562x^2 + 0,34x$
80o10	$0,5837x^2 - 0,0657x$
80o15	$0,6435x^2 - 0,3451x$
125o5	$0,5841x^2 - 0,0155x$
125o10	$0,5493x^2 - 0,2532x$
125o15	$0,5184x^2 - 0,329x$
125o20	$0,5475x^2 - 0,4441x$
160o5	$0,5787x^2 - 0,2396x$
160o10	$0,5578x^2 - 0,392x$
160o15	$0,551x^2 - 0,4493x$
160o20	$0,5334x^2 - 0,5x$
160o25	$0,534x^2 - 0,5485x$
160o30	$0,5318x^2 - 0,586x$
200o5	$0,6061x^2 - 0,3232x$
200o10	$0,6102x^2 - 0,5927x$
200o15	$0,6014x^2 - 0,6834x$
200o20	$0,5914x^2 - 0,7296x$
200o25	$0,5758x^2 - 0,7929x$
200o30	$0,5632x^2 - 0,8228x$
200o35	$0,5834x^2 - 0,8983x$
200o40	$0,5909x^2 - 0,9432x$
250o5	$0,5202x^2 - 0,1678x$
250o10	$0,5084x^2 - 0,3294x$
250o15	$0,5084x^2 - 0,4769x$
250o20	$0,4968x^2 - 0,5359x$
250o25	$0,4985x^2 - 0,5969x$
250o30	$0,4834x^2 - 0,6092x$

Auteursrechtelijke overeenkomst

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

Ontwikkeling van een methode en software tool voor het automatisch dimensioneren van ventilatienetwerken

Richting: **master in de industriële wetenschappen: energie-elektrotechniek**

Jaar: **2014**

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

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

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

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

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

Voor akkoord,

Leflere, Thomas

Datum: **24/08/2014**