



Deeltaak 5.3 Globale conclusie: optimaal HVAC ontwerp

Auteur(s): Damien Picard

Datum: 31/08/2017

Deze studie werd uitgevoerd in het kader van het IWT-VIS traject Smart Geotherm (2011-2017)

Inhoudstafel

1	Inleiding.....	3
2	Methodiek en aannamen.....	3
2.1	Optimaal HVAC programma.....	3
2.2	Economisch model.....	4
2.3	HVAC component informatie.....	4
2.4	Belastingduurdiagramma (BDD) van een kantoor, een rusthuis en een school.....	6
3	Parameters.....	7
4	Resultaten.....	7
4.1	Gebruiksaanwijzing.....	7
4.2	Rekenvoorbeeld.....	8
4.3	Flowcharts.....	9
4.3.1	Flowchart voor BEO-systeem, BKA toegelaten.....	9
4.3.2	Flowchart voor BEO-systeem, BKA niet toegelaten.....	10
4.3.3	Flowchart voor KWO-systeem, BKA toegelaten.....	11
4.3.4	Flowchart voor KWO-systeem, BKA niet toegelaten.....	12
4.4	Algemeen advies.....	13
5	Referenties.....	14

1 Inleiding

Dit document stelt flowcharts voor die aangeven wanneer (hybride) geothermische systemen economisch rendabel zijn. Vier flowcharts zijn opgesteld om volgende gevallen te beschrijven: wanneer KWO-systemen niet toegelaten of opportuun zijn en wanneer wel, en wanneer BKA wordt gebruikt of koelplafonds eerder worden verkozen. De flowcharts zijn opgesteld met behulp van een Python programma (zie [1]) die voor een vooropgestelde energievraag van een gebouw de netto huidige kost (NPC) van alle mogelijke HVAC systemen berekent. De flowchart geeft aan wanneer de NPC van (hybride) geothermische HVAC systemen lager liggen dan conventionele systemen.

De flowcharts bepalen ook of het beste systeem al dan niet hybride moet zijn, wat de optimale hybride fractie is (hoe groot moet de warmtepomp en de passieve koeling zijn t.o.v. de condenserende gasboiler en de koelmachine) en welke afgiftesysteem hieraan gekoppeld moet worden. Merk op dat bij hybride systemen werd er aangenomen dat de twee systemen volledig onafhankelijk van elkaar kunnen werken.

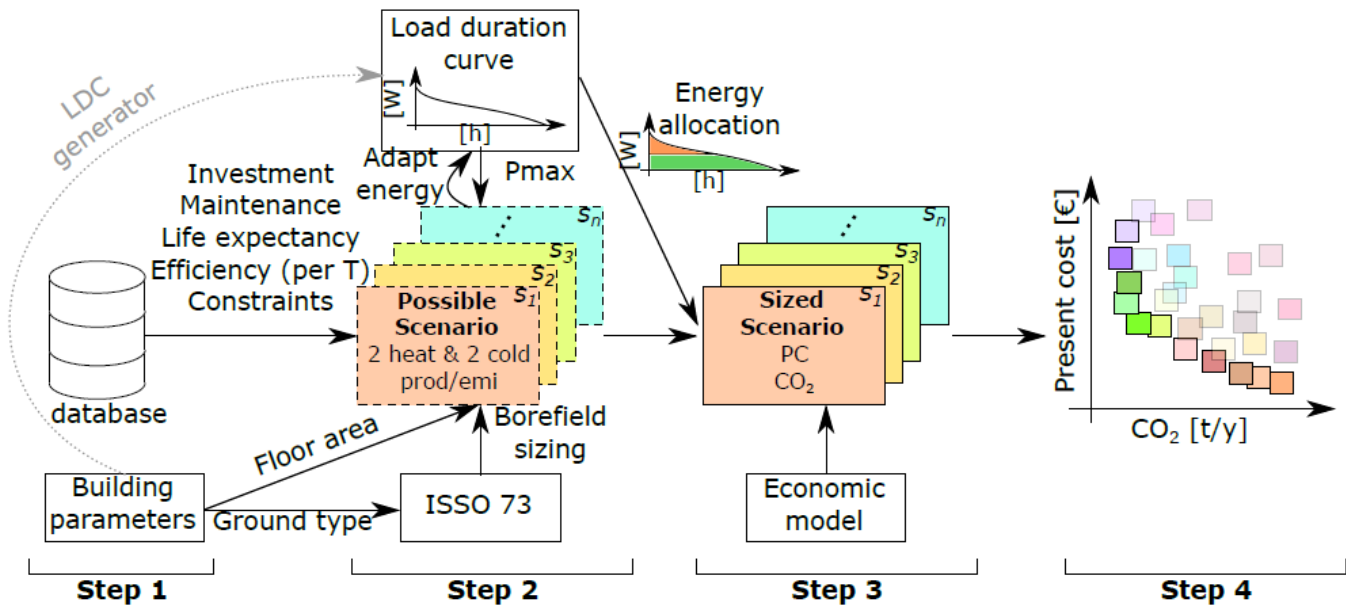
Sectie 2 beschrijft de methodiek en de aannamen waarop de flowcharts gebaseerd zijn, sectie 3 de parameters die de gebruiker moet invullen om de flowchart te kunnen gebruiken, sectie 4 presenteert de flowcharts en geeft algemene adviezen.

2 Methodiek en aannamen

De sectie beschrijft de Python tool die werd gebruikt voor het opstellen van de flowcharts en de aannamen waarop ze gebaseerd zijn.

2.1 Optimaal HVAC programma

De flowcharts zijn opgesteld op basis van een Python programma ontworpen door Picard (2017, [1]). Voor een volledige beschrijving van het programma wordt de lezer naar [1] verwezen. Het principe van het programma is in Figuur 1 weergegeven. Als eerste stap, werd een database van HVAC componenten opgesteld (zie sectie 2.3) die de kostfunctie die de geïnstalleerde kost van het HVAC component in functie van zijn grootte weergeeft, zijn onderhoudskost, zijn levensduur, zijn rendement op verschillende temperatuurniveaus en potentiële beperkingen bevat. Op basis van de database en de geschatte gebouw belastingduurdiagramma, zal het programma alle mogelijke HVAC scenario's die uit de HVAC componenten uit de database bestaan, voorstellen, dimensioneren en zijn huidige kost en zijn CO₂ uitstoot berekenen. De huidige kost van de scenario bevat alle kosten over 20 jaren: de investeringskost, de energiekost, de onderhoudskost, de vervangingskosten en de restwaarde (zie sectie 2.2). Het programma retourneert dan een lijst met alle gedimensioneerde HVAC scenario's gerangschikt volgens hun huidige kost of hun CO₂ uitstoot.



Figuur 1: Schematische voorstelling van de optimaal HVAC ontwerp programma.

2.2 Economisch model

De huidige netto kost (NPC) wordt gebruikt als maatstaf voor de economische rentabiliteit van het HVAC-systeem en wordt als volgt berekend:

$$NPC = I_0 + \sum_j^N [(C_e + C_m + C_r) R_j] - V_r R_n$$

Met I_0 de initiële investering, C_e , C_m en C_r respectievelijk de energie-, de onderhouds- en de vervangingskosten en V_r de restwaarde na N jaar tijd (hier wordt $N=20$ jaar gebruikt). R_j stel de discontering voor: $R_j = \frac{1}{(1+i)^j}$ met i de discontovoet (gelijkgesteld aan 4%).

Merk op inflatie en prijsstijging zijn niet in rekening gebracht wegens de grote onzekerheid van deze parameters. De restwaarde van de component is wel in rekening gebracht via een lineaire afschrijving en verdiscontering.

2.3 HVAC component informatie

Alle component-informatie wordt in de verschillende tabellen opgesomd. Tabel 1 lijst de beschouwde HVAC-componenten met hun afkorting, kostfunctie, onderhoudskost en levensduur op. De kostfuncties zijn opgesteld op basis van (geïnstalleerde) kostdata van 18 recente gebouwen behalve waar anders vermeld. De onderhoudskosten en de levensduur komen uit de norm NBN EN 15 459. Tabel 2 geeft de efficiëntie van de verschillende productiesystemen weer. Tabel 3 vat de aangenomen nominale werkingpunten van de verschillende afgiftesystemen. Tabel 3 bevat ook de verhouding tussen het koel- en verwarmingsvermogen voor reversibele afgiftesystemen en het afgifterendement als bepaald in de norm NBN EN15316-2-1 [12]. De rendementen stellen het extra warmteverlies van het systeem voor t.g.v. een niet ideale werking van de regeling en het systeem. Meer informatie over de componenten, hun eigenschappen en hun kostfuncties zijn in [1] terug te vinden.

Tabel 1: afkorting, naam, kostfunctie met geldigheidsinterval, onderhoudskost in percent per jaar van de investeringskost en levensduur van elke beschouwde HVAC-component.

Abb.	Component	Cost function [€] (*1)	Maint. Cost [%/y]	Life. exp. [y]
CGB	Condensing gas boiler	$85.405x + 9451$ $x \in [25, 800]$ kW	1.5%	20
GSHP	Ground source heat pump	$83.368x + 11725$ $x \in [34, 300]$ kW	3.0 %	20
WSHP	Water source heat pump	$83.368x + 11725$ $x \in [34, 300]$ kW	3.0 %	20
CCM	Compression cooling machine	$80.084x + 12456$ $x \in [21, 1335]$ kW	4.0%	15
GSPC	Plate HEX for passive ground source cooling	$14.421x + 1814$ $x \in [28, 472]$ kW	2% (*2)	20 (*2)
GHEX-V	Vertical ground heat exchanger	$32.0x$ (*3) $x \in [0, \infty]$ m	0.25%	50
ATES	Aquifer thermal energy storage	$10417.061x^{0.438}$ (*4) $x \in [38, 1050]$ kW	2% (*5)	40 (*5)
R-HT	High temperature radiator	$134.100x$ $x \in [0, \infty]$ kW	1.5%	35
R-LT	Low temperature radiator	$287.791x$ $x \in [0, \infty]$ kW	1.5%	35
FC2P-HT-coo	High temperature 2-pipes fan coil unit (cooling)	$456.621x$ $x \in [0, \infty]$ kW	4.0%	15
FC2P-LT-coo	Low temperature 2-pipes fan coil unit (cooling)	$267.142x$ $x \in [0, \infty]$ kW	4.0%	15
FC4P-HT	High temperature 4-pipes fan coil unit (reversible)	$223.814x$ $x \in [0, \infty]$ kW	4.0%	15
FC4P-LT	Low temperature 4-pipes fan coil unit (reversible)	$397.417x$ $x \in [0, \infty]$ kW	4.0%	15
CCA	Concrete core activation	$21.650x$ $x \in [0, \infty]$ m ²	2.0 %	50
FH	Floor heating	$34.593x$ $x \in [0, \infty]$ m ²	2.0 %	50
CC	Cooling Ceiling	$2500x$ $x \in [0, \infty]$ kW	2.0 %	30

(*1) Based on cost data from real buildings, see appendix.

(*2) Assumption based on VEA2013 because no data in NBN EN 15459 [15].

(*3) Data provided by Boringen Verheyden [16].

(*4) Cooling power is assumed to be 78% of heating power based on (*5).

(*5) Data provided by IFTECH [17].

Tabel 2: Efficiëntie van de productiecomponenten gebaseerd op waarden uit technische fiches en uit Annex 48 [18]. In het geval van GSHP en WSHP, komen de gegeven efficiënties overeen met de SPF waar een circulatiepompvermogen van 2.5% van de thermisch vermogen van de warmtepomp is aangenomen. De COP van de warmtepompen zijn tussen haakjes gegeven (brontemperatuur van 5°C voor GSHP en 10°C voor WSHP). Voor CGB is de efficiëntie t.o.v. de lagere calorische waarde van gas gedefinieerd.

	Efficiencies [-]							[°C]
	30	35	45	60	10	15	20	
CGB	1,06	1,06	1,02	0,98	-	-	-	(*1)
GSHP	4.91 (5,60)	4.44 (5,00)	3.55 (3,90)	2.62 (2,80)	-	-	-	(*2)
WSHP	5.45 (6,3)	4.96 (5,7)	3.94 (4,4)	2.80 (3,0)	-	-	-	(*2)
GSPC	-	-	-	-	-	20,00	20,00	
WSPC	-	-	-	-	-	40,00	40,00	(*3)
CCM	-	-	-	-	3,90	4,30	4,70	(*4)

(*1) from TS: Riello [19]. (*2) from TS: AlphaInnoTec [20], Carrier [21], Viessmann [22] Daikin, Stiebel-Eltron. (*3) from IFTECH [17]. (*4) from Annex 48 [18].

Tabel 3: Parameters van de afgiftecomponenten. De nominale werkingpunten zijn als $T_s/T_r/T_a$ gegeven met T_s , T_r , en T_a de aanvoer, retour en zone luchttemperatuur.

	Nominal conditions (°C)		Power ratio	η_{HVAC}
	Heating	Cooling	Cooling/heating	(*4)
CCA	30/-/-	20/-/-	125% (*1)	0.83
FH	35/-/-	20/-/-	30% (*2)	0.83
CC	30/-/-	20/-/-	250% (*3)	0.83
HTR	60/50/20	-	-	0.91
LTR	45/35/20	-	-	0.91
FC4P-HT	60/50/20	10/15/25	60%	1
FC4P-LT	45/35/20	15/20/25	63%	1
FC2P-coo-HT	-	15/20/25	-	1
FC2P-coo-LT	-	10/15/25	-	1

(*1) It is assumed that CCA can provide a maximum of 40 W/m² for heating and 50 W/m² for cooling

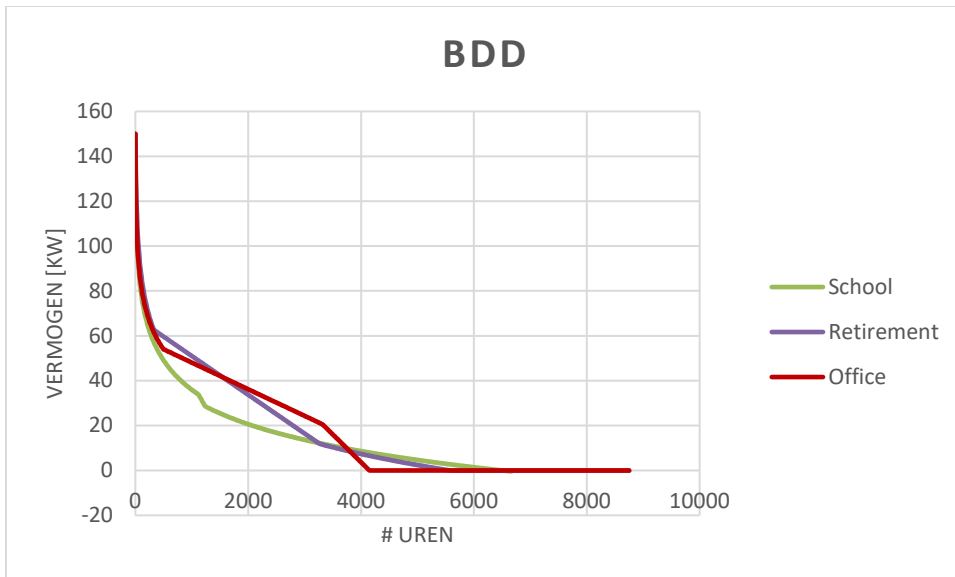
(*2) It is assumed that FH can provide a maximum of 100 W/m² for heating and 30 W/m² for cooling

(*3) It is assumed that CC can provide a maximum of 40 W/m² for heating and 100 W/m² for cooling

(*4) Taken from NBN EN15316-2-1:2007 [12]

2.4 Belastingduurdiagramma (BDD) van een kantoor, een rusthuis en een school

De analyse is gebaseerd op de BDD van een kantoor, een rusthuis en een school. Elke BDD is aangepast om het juiste piekvermogen en aantal volle lasturen weer te geven. Het bleek dat er weinig verschil was tussen de optimale HVAC-systemen van de verschillende gebouwen, daarom werd er verder met de BDD van het kantoorgebouw gewerkt. Enkel voor de BDD's met maar 800 vallusturen (VLU) werd voor de BDD van de school gekozen.



3 Parameters

Dankzij voorgaande aannames kan het beste HVAC-systeem bepaald worden in functie van enkel 3 bouwparameters: het specifieke verwarmingsvermogen (P_{spe}) dat het benodigde vermogen per vloeroppervlakte voorstelt, de verhouding α tussen de koelenergie en de verwarmingsenergie ($\alpha = \frac{E_{koel}}{E_{verw}}$) die het gebouw nodig heeft, en het aantal vollasturen (verwarming) **VLU**.

4 Resultaten

4.1 Gebruiksaanwijzing

De flowcharts van de volgende sectie geven aan welke HVAC best moet geïnstalleerd worden. De parameters die de gebruiker moet invullen zijn: P_{spe} , α en **VLU**.

De flowchart geeft dan het optimale scenario weer met het percentage van het verwarmingsvermogen dat door de warmtepomp (WP) gedekt wordt en het percentage van het koelvermogen door de passieve koeling (PK). De WP en de PK zijn beide altijd op de BKA, de vloerverwarming (VV) of het koelplafond (KP) aangesloten. De rest wordt door een conventioneel systeem geleverd, nl. een condenserende gasketel, een compressiekoelmachine gekoppeld aan 4-pijps hoge-temperatuursventilo-convectoren (VC4P), of hoge-temperatuursradiatoren (R) aangevuld met 2-pijps lage-temperatuursventilo-convectoren (VC2P) voor de koeling. De flowchart kan ook nog een *puur geothermisch* systeem aanbevelen (nl. WP + PK + BKA (of VV, of KP), zonder tweede afgifte/productiesysteem) maar kan ook geothermie afraden indien het in geen enkele configuratie als interessant naar voor komt.

Pas op: de flowcharts worden met de aanname opgesteld dat de koel en verwarmingsvermogens dezelfde verhouding hebben als α (de verhouding tussen koel- en verwarmingsenergie). Als een gebouw dus een verwarmingspiekvermogen heeft van 150 kW, 1400 VLU en $\alpha=50\%$, zal het gebouw een koelpiekvermogen van 75 kW hebben. Ook de koelproductie systeem zal 1400 VLU draaien.

Merk op dat de berekeningen enkel voor volgende hybride fracties werden uitgevoerd: 0, 25, 50, 75 en 100% van het maximale verwarmings- of koelvermogen nodig voor het gebouw.

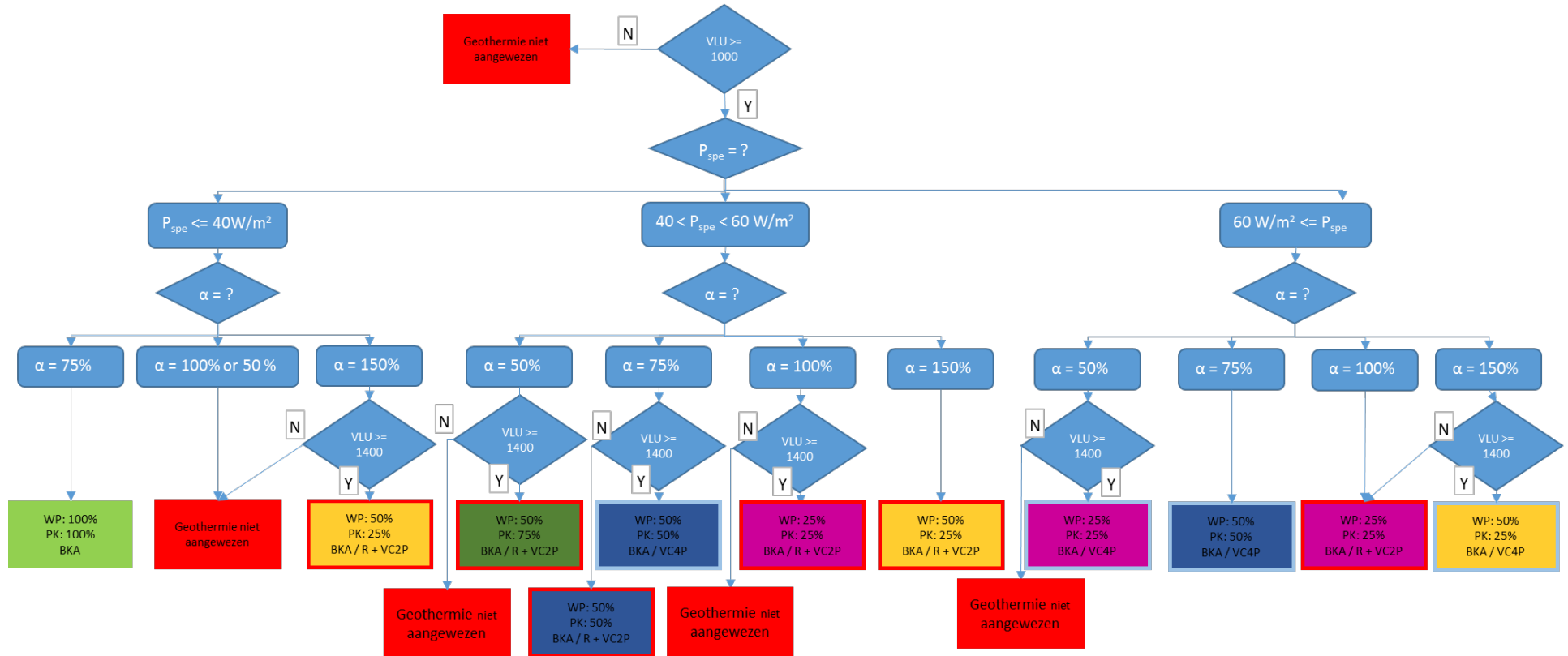
4.2 Rekenvoorbeeld

Stel dat een gebouw een piekvraag van 150 kW verwarming en 75 kW koeling heeft en dat zijn jaarlijkse energievraag wordt op 250 MJ / jaar verwarming geschat. Het gebouw heeft verder een vloeroppervlakte van 3000 m². Wat is het optimale HVAC systeem met de veronderstelling dat KWO niet toegelaten is maar dat BKA mag gebruikt worden?

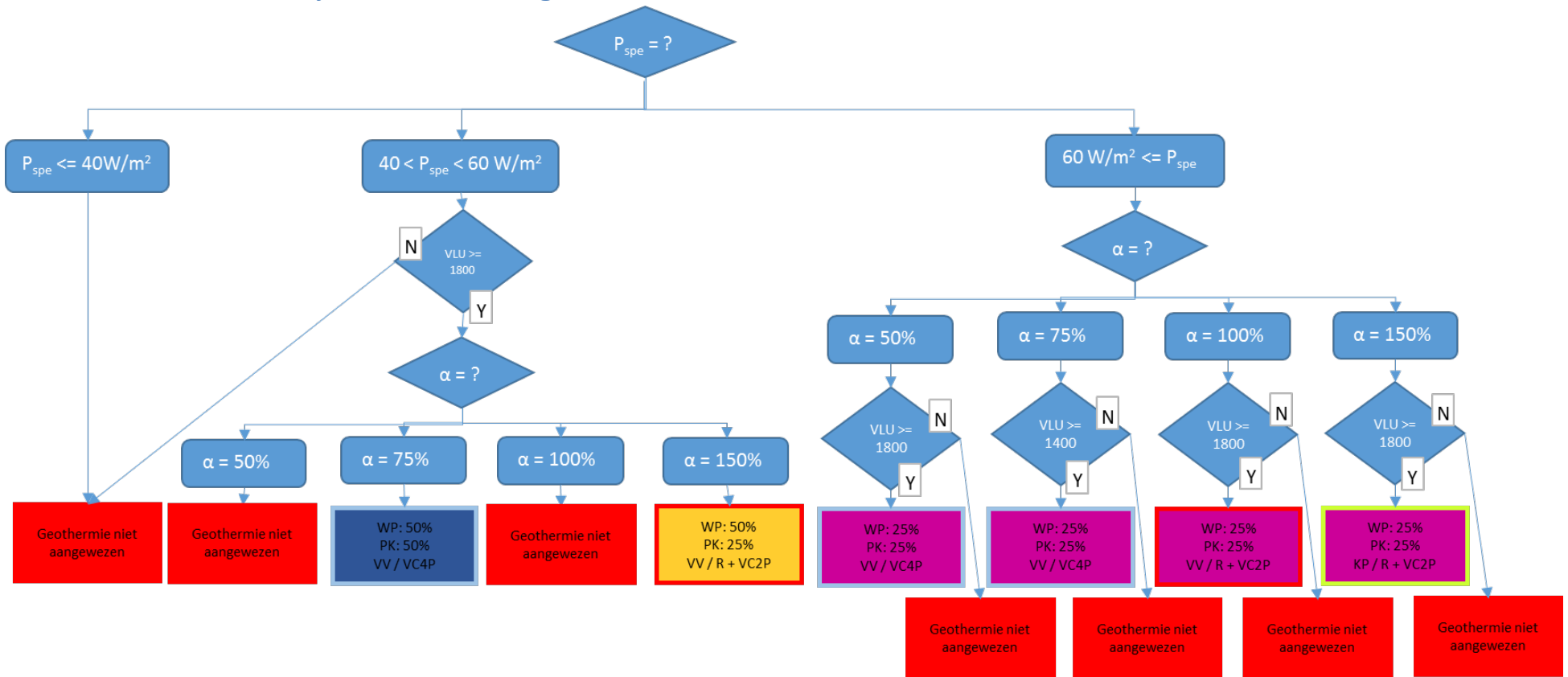
- Berekening van P_{spe} , α en VLU:
 - $P_{spe} = 150 \text{ kW} / 3000 \text{ m}^2 = 50 \text{ W/m}^2$
 - $\alpha = \text{koelenergie} / \text{verw.energie} = (\text{volgens aanname van flowcharts}) \text{ koelvermogen/verw.vermogen}$
 $\alpha = 75 / 150 = 50\%$
 - $VLU = \text{verw.energie} / \text{verw.vermogen} = 250 \text{ MJ} / \text{jaar} / 150 \text{ kW} = 1666 \text{ u}$
- Aangezien geen KWO mag geïnstalleerd worden maar BKA mag gebruikt worden, wordt er met de eerste flowchart gewerkt. Omdat $40 < P_{spe} < 60 \text{ m}^2$ en omdat $VLU > 1000$, moet de middelste tak gebruikt worden. Hieruit blijkt dat het volgende systeem optimaal is: WP 50%, PK: 75%, BKA + R + VC2P.
- Het te installeren HVAC systeem is dus een **warmtepomp** van $50\% \times 150\text{kW} = 75 \text{ kW}$ en een **condenserende gasketel** van $150 - 75 \text{ kW} = 75 \text{ kW}$, een (passieve) **warmtewisselaar** van $75 \text{ kW} \times 75\% = 56.25 \text{ kW}$ en een **koelmachine** van $75 - 56.25 = 18.75 \text{ kW}$. De warmtepomp en de warmtewisselaar worden aan de **BKA** gekoppeld, en de gasketel en de koelmachine aan **hoge temperatuurradiatoren (75 kW)** en **2-pijpse ventilo-convectoren (18.75 kW)**.

4.3 Flowcharts

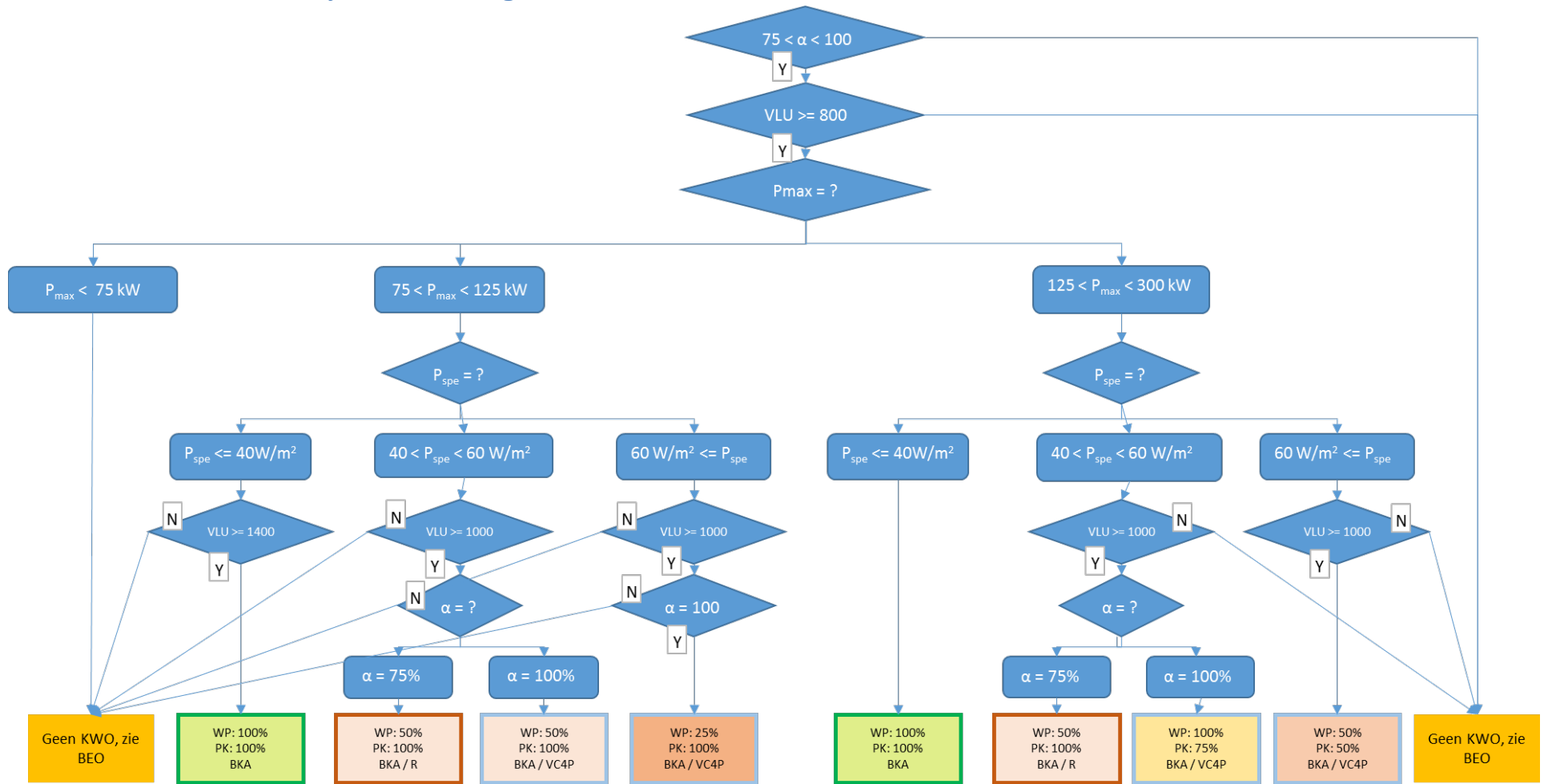
4.3.1 Flowchart voor BEO-systeem, BKA toegelaten



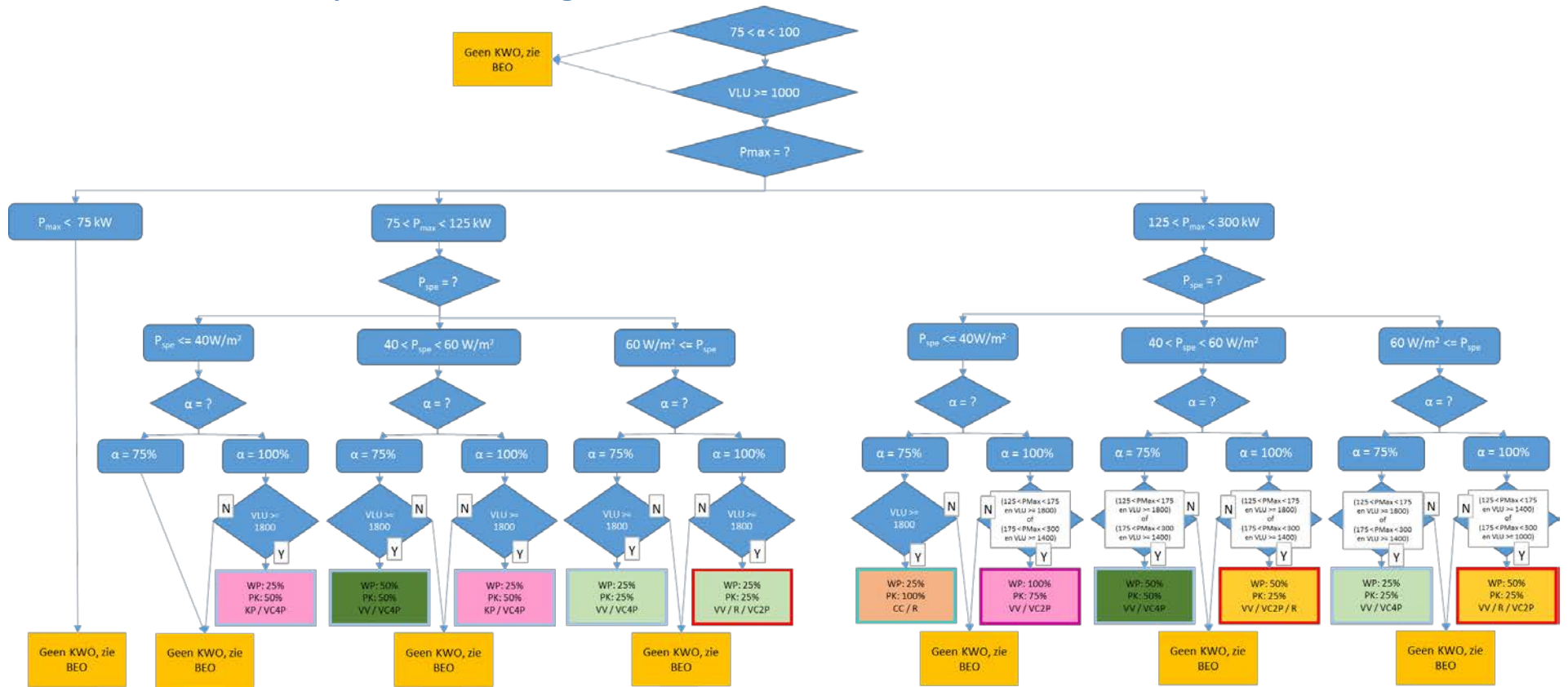
4.3.2 Flowchart voor BEO-systeem, BKA niet toegelaten



4.3.3 Flowchart voor KWO-systeem, BKA toegelaten



4.3.4 Flowchart voor KWO-systeem, BKA niet toegelaten



4.4 Algemeen advies

Uit de verschillende flowcharts kunnen volgende richtlijnen afgeleid worden:

- 1) Algemeen:
 - a. Bij hybride systemen is het aangewezen om de basislast door het geothermische systeem en de pieklast door het 2^{de} systeem te dekken aangezien geothermie het meest efficiënt is. Voor de dimensionering en de regeling moet er in rekening worden gebracht dat de twee systemen in parallel moeten kunnen werken. Dit betekent dat het 2^{de} systeem niet de volledige pieklast moet kunnen dekken maar enkel het vermogen dat ontbreekt bij het geothermische systeem. Regeltechnisch is het te verkiezen dat er ook twee onafhankelijke circuits geïnstalleerd worden.
 - b. Ondanks zijn hogere verwarmingsvermogen (100 W/m² voor vloerverwarming, 40 W/m² voor BKA), is vloerverwarming (VV) meestal minder voordelig dan BKA wegens de hogere kostprijs (35 €/ m² voor VV, 22 €/ m² voor BKA) en een lagere koelvermogen (30 W/ m² voor VV, 50 W/ m² voor BKA). Een koelplafond wordt zelden de beste oplossing wegens de hoge kost (100 €/ m²) en het lage verwarmingsvermogen (40 W/ m²) en dit ondanks het hoog koelvermogen (100 W/ m²).
 - c. Reversibele ventilo-convectoren (4 pijps, VC4P) zijn enkel economisch interessant wanneer de nodige koel- en warmtebehoefte gelijkaardig zijn (rekening houdend dat het koelvermogen van de VC4P typisch maar 60% is van het verwarmingsvermogen). Als er bijvoorbeeld een veel groter verwarmingsvermogen dient geïnstalleerd te worden dan het koelvermogen, plaatst men best radiatoren en een paar niet-reversibele ventilo-convectoren (2 pijps, VC2P) om te koelen.
 - d. BEO-systemen moeten groter gedimensioneerd worden wanneer ze koeling (ipv verwarming) gedomineerd zijn. Een optimaal ontwerp zal dus meestal een verwarming gedomineerd geothermisch systeem verkiezen.
 - e. Het is economisch niet rendabel om lage-temperatuursventilo-convectoren of lage-temperatuursradiatoren te koppelen aan een condenserende gasketel en/of koelmachine wegens hun hogere investeringskost en eerder beperkte invloed op het productierendement.
 - f. KWO-systemen zijn meestal verplicht om de thermische balans in de grond te bewaren. Enkel gebouwen met een verhouding tussen koude en warmtevraag (α) tussen 75% en 100% zijn daarom mogelijk voor dit systeem.
 - g. KWO-systemen vertonen een belangrijk schaalvoordeel: hoe groter het gebouw, des te interessanter wordt het systeem. KWO voor gebouwen met een geïnstalleerd vermogen kleiner dan 75 kW zijn bijna nooit interessant.
- 2) (Hybride) Grondgekoppelde geothermische systemen **(BEO) met BKA**
 - a. (Hybride) BEO-systemen zijn economisch niet rendabel voor gebouwen met een te lage energievraag, namelijk < 1000 VLU, en zijn bijna altijd rendabel als het gebouwen ten minste 1800 VLU heeft.
 - b. Als de koude en warmtevraag van het gebouw zo is dat de grond jaarlijks in thermische balans is, zal een (hybride) BEO systeem altijd de laagste NPC hebben.
 - c. Enkel gebouwen met een laag specifiek vermogen P_{spe} (max 40 W/ m² voor verwarming, 50 W/ m² voor koeling) kunnen volledig door BKA worden geconditioneerd. Gebouwen met een hogere P_{spe} moeten dus een 2^{de} afgiftesysteem hebben. Het is meestal goedkoper en efficiënter dat dit 2^{de} afgiftesysteem een snel

- reagerende systeem is dat aan een condenseerde gasketel en/of aan een koelmachine wordt gekoppeld.
- d. De meest economische hybride BEO systemen met BKA hebben typisch een BEO systeem dat maximum 50% van de koude en maximum 50% van de warmtevraag dekken.
- 3) (Hybride) Grondgekoppelde geothermische systemen **(BEO) zonder BKA**
- a. Als BKA niet mag gebruikt worden en in de plaats hiervan koelplafonds of vloerverwarming wordt toegepast, worden BEO-systemen duurder en kan BEO enkel rendabel zijn voor energie intensieve gebouwen (meer dan 1800 VLU).
 - b. De meest economische hybride BEO-systemen zonder BKA hebben typisch een BEO-systeem dat maximum 25% van de koude en 25% van de warmtevraag dekt.
- 4) (Hybride) **KWO systemen met BKA**
- a. Vanaf 125 kW is het bijna altijd economisch rendabel om een (hybride) KWO-systeem met BKA te installeren.
 - b. De meest economische hybride KWO-systemen met BKA hebben typisch een KWO-systeem dat minimaal 50% van de warmtevraag en 75% van de koudevraag dekt.
- 5) (Hybride) **KWO systemen zonder BKA**
- a. KWO-systemen zonder BKA worden pas interessant vanaf een geïnstalleerd vermogen van minimaal 125 kW en een hoge energievraag (meestal VLU > 1800 maar kan ook > 1400).

5 Referenties

[1] Picard, D. *Modeling, optimal control and HVAC design of large buildings using ground source heat pump systems*. PhD, University of KU Leuven, Leuven, Belgium, 2017.